



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

NUEVOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA CON BASE EN MATERIALES PLÁSTICOS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
SELENE PÉREZ GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL  
SERGIY, KHOTYAINITSEV, FACULTAD DE INGENIERÍA  
COMITÉ TUTOR  
OLEKSANDR, MARTYNYUK, FACULTAD DE INGENIERÍA  
VÍCTOR, RANGEL, LICEA, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Oleksandr Martynyuk

Secretario: Dr. Víctor Rangel Licea

Vocal: Dr. Sergiy Khotyaintsev

1 er. Suplente: Dra. María Elena Luna Elizarrarás

2 d o. Suplente: Dr. Juan A.Hernández Cordero

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: MÉXICO, D.F

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Sergiy Khotyaintsev

-----  
**FIRMA**

(Segunda hoja)

## **Agradecimientos**

Con todo mi amor agradezco a mi familia, a mi esposo e hijo, Orlando y Orly por ser los motores en mi vida, mi alegría y mi vida entera, a mis padres por estar incondicionalmente apoyándome en todos mis proyectos; mis triunfos son el resultado de todo su esfuerzo, a mis hermanos Vero, Ángel y Gerardo por estar siempre a mi lado y a mis sobrinos Osmar y Chris por muchos momentos de diversión.

A mi asesor de tesis Dr. Sergiy Khotyaintsev, ha sido un placer contar con su guía y ayuda, sus conocimientos, paciencia, experiencia y motivación han logrado que yo concluya este trabajo y han sido fundamentales para mi formación como profesora e investigadora.

Al Dr. Oscar Esteban Martínez por su apoyo y por las facilidades prestadas en la Universidad de Alcalá de Henares para realizar parte de la investigación de esta tesis; a Conchi, Laura y Arantza por ser un magnifico equipo de trabajo, por su buena disposición para ayudarme y recibirme en su grupo.

A mis compañeros y amigos del laboratorio, Amalia, Carmen, Juan, Alberto, Alfredo y Christian, por los gratos momentos, los consejos y la ayuda recibida para la conclusión de este trabajo y muchos otros.

A mi comité tutorial Dr. Oleksandr Martynyuk y Dr. Víctor Rangel Licea y a los miembros del jurado, Dra. Elena Luna Elizarrarás y Dr. Juan Hernández Cordero por sus revisiones, críticas y sus aportaciones a este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM (CEP) por la beca otorgada para la realización de este trabajo. A la DGAPA-PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto de investigación científica "Implementación de un nuevo método de monitoreo del comportamiento de estructuras hasta su falla de elementos de concreto y materiales compuestos, con arreglos de fibras ópticas" con número de referencia IT102515.

A la UNAM por permitirme ser parte de esta gran y grandiosa Universidad como estudiante y profesora.

# RESUMEN

En esta tesis presentamos un estudio de nuevos sensores con base en materiales plásticos, fabricados con polimetilmetacrilato y con fibras ópticas de plástico comerciales.

Se presentan dos tipos de sensores, el primero es un sensor refractométrico basado en la resonancia de plasmones superficiales, el cual fue fabricado con una fibra óptica adelgazada y un recubrimiento de plata, en este caso el sensor no tuvo un tiempo de vida mayor a un minuto, por lo que aún se requiere realizar mayor investigación en cuanto al proceso de fabricación de los mismos.

El segundo sensor es un sensor basado en la reflexión en un elemento de detección óptico semicilíndrico, el presente trabajo proporciona datos amplios cuantitativos teóricos y experimentales sobre las propiedades de los sensores bajo diferentes combinaciones de sus parámetros geométricos y ópticos. Se demuestra que los elementos de detección tienen ciertas zonas de transmisión en función de la posición relativa de las fibras ópticas con respecto al elemento de detección; este parámetro igual que la apertura lineal y angular de las fibras ópticas tiene un efecto significativo sobre la respuesta del sensor al índice externo de refracción: el rango de medición del índice externo de refracción, sensibilidad (el gradiente de la respuesta) y la linealidad de la misma.

Además los resultados de este trabajo revelan los efectos de polarización de luz sobre la respuesta del sensor al índice externo de refracción, dicha respuesta varía notablemente en función de la orientación del plano de polarización de la luz linealmente polarizada de la entrada, hay un cambio significativo en cuanto a la intensidad, sin embargo no hay cambio en cuanto al rango de índices de refracción medidos.

# INDICE

	Página
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Metas.....	2
1.4. Metodología.....	3
1.5. Referencias del capítulo 1.....	3
CAPÍTULO 2. AVANCES EN SENSORES DE FIBRA ÓPTICA CON BASE EN MATERIALES PLÁSTICOS.....	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Antecedentes históricos.....	5
2.3. Materiales ópticos plásticos.....	6
2.4. Sensores refractométricos basados en fibras ópticas de plástico.....	9
- Sensores refractométricos basados en la Resonancia de Plasmones superficiales.....	9
-Sensores basados en la reflexión interna controlada por el medio externo en elementos de detección ópticos extrínsecos.....	11
2.5. Conclusiones.....	12
2.6. Referencias del capítulo 2.....	13
CAPÍTULO 3. SENSOR REFRACTOMÉTRICO BASADO EN LA RESONANCIA DE PLASMONES SUPERFICIALES.....	15
3.1. Introducción.....	15
3.2. Descripción del sensor.....	15
3.3. Metodología de fabricación y caracterización del sensor.....	16
3.4. Caracterización de la fibra óptica adelgazada.....	24
3.5. Depósito de plata en taper.....	25
3.6. Caracterización del sensor basado en la resonancia de plasmón superficial.....	25
3.7. Discusión.....	27
3.8. Conclusiones.....	27
3.9. Referencias del Capítulo 3.....	28
CAPÍTULO 4. INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES REFRACTOMÉTRICOS BASADOS EN LA ALTERACIÓN DE LA REFLEXIÓN INTERNA EN UN ELEMENTO TRANSDUCTOR ÓPTICO DE FORMA SEMICILÍNDRICA.....	30
4.1. Introducción.....	30
4.2. Descripción del sensor refractométrico genérico con elemento transductor óptico semicilíndrico.....	30
4.3. Modelo matemático del sensor.....	31
4.4. Investigación de las características básicas de los sensores refractométricos basados en la alteración de la reflexión interna en un elemento de detección óptico de forma semicilíndrica (con luz no polarizada).....	38
4.5. Investigación de las características básicas de los sensores refractométricos basados en la alteración de la reflexión interna en un elemento de detección óptico hueco de forma semicilíndrica (con luz no polarizada).....	40
4.6. Efecto de desalineamiento y parámetros desiguales de las fibras ópticas en el sensor.....	42
4.7. Efecto de ubicación de las fibras en zonas de bajo acoplamiento.....	47
4.8. Conclusiones.....	51
4.9. Referencias del capítulo 4.....	52

CAPÍTULO 5. ESTUDIO TEÓRICO SOBRE LOS EFECTOS DE POLARIZACIÓN DE LA LUZ EN SENSORES REFRACTOMÉTRICOS CON ELEMENTOS TRANSDUCTORES ÓPTICOS DE FORMA SEMICILÍNDRICA (LUZ POLARIZADA LINEALMENTE).....	53
5.1. Introducción.....	53
5.2. Análisis teórico de la propagación de la luz y propiedades ópticas refractométricas con luz polarizada con elemento de detección semicilíndrico.....	53
5.3. Análisis teórico de la propagación de la luz y propiedades ópticas refractométricas con luz polarizada con elemento de detección semicilíndrico hueco.....	58
5.4. Discusión.....	61
5.5. Conclusiones.....	61
5.6. Referencias.....	61
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE PROPAGACIÓN DE LA LUZ Y CARACTERÍSTICAS REFRACTOMÉTRICAS DEL SENSOR CON ELEMENTO DE DETECCIÓN ÓPTICO SEMICILÍNDRICO.....	62
6.1. Introducción.....	62
6.2. Descripción de la instalación experimental.....	62
6.3. Estudio experimental de la propagación de la luz y propiedades ópticas refractométricas principales de un elemento transductor óptico de forma cilíndrica, con la luz polarizada linealmente.....	68
6.4. Conclusiones.....	87
7. CONCLUSIONES GENERALES.....	88
Anexo 1. Respuesta del sensor teórica al índice de refracción con elemento de detección semicilíndrico, para diferentes posiciones de las fibras ópticas .....	90
Anexo 2. Publicaciones resultados de la tesis.....	92

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes

En la última década se han realizado muchos estudios con fibras ópticas de plástico para transmisión de información [1]. Una de las aplicaciones emergentes es a bordo de vehículos (automóviles, camiones, autobuses, trenes, lanchas, etc.), tanto para transmisión de datos como para sensores ópticos de diversas cantidades físicas compatibles con las mismas redes ópticas. En esta aplicación, consideran las fibras ópticas de diámetro relativamente grande, lo que reduce notablemente el costo de las fuentes de luz y conectores ópticos así como el costo de instalación y mantenimiento de las redes de esta tipo al bordo de vehículos. Otra ventaja de usar las fibras ópticas de plástico, es la implementación de configuraciones complejas de redes de datos y sensado y su económica fabricación, la desventaja principal de las fibras de plástico es su alta atenuación óptica de orden de 73 dB/km [1], pero la longitud de enlaces al borde de vehículos es muy corta (unos metros o decenas de metros) por lo que este factor no impide el uso de fibras óptico de plástico en redes locales al bordo de vehículos.

Para una mejor compatibilidad de los elementos de dichas redes, es muy deseable contar con toda la gama de sensores para vehículos en forma de dispositivos de fibra óptica de plástico.

Todo el conjunto de sensores ópticos se puede dividir en cuatro clases dependiendo del parámetro de la onda óptica que se utilizan para el sensado: sensores de fase, polarización, frecuencia o amplitud [5]. Los sensores de amplitud son los más simples de implementar en comparación a otros clases de sensores ópticos. Varios sensores ópticos de amplitud fueron implementados con base en materiales plásticos. En particular, los sensores refractométricos basados en la variación de la amplitud de la señal en función de índice de refracción del medio externo son importantes para aplicaciones al bordo de vehículos, esencialmente para mediciones de nivel de gasolina o diésel en el tanque de combustible y niveles de diversos otras sustancias: líquido de frenos, líquido de la dirección hidráulica, líquido anticongelante en sus respectivos contenedores. Es importante señalar que los sensores refractométricos tienen también otras aplicaciones importantes en diferentes ramas de actividad humana tales como la medición del índice de refracción de líquidos para conocer la concentración de solutos en el líquido. En trabajos anteriores de la autora de esta tesis se estudiaron algunos sensores refractométricos de fibra óptica de tipo extrínseco; con elemento externo de detección de forma semiesférica y semicilíndrica para mediciones de nivel de líquidos. Una ventaja particular de elementos externos de detección en forma de segmento de cilindro consiste en la facilidad de implementación de arreglos grandes de sensores refractométricos sobre el mismo elemento de detección suficientemente largo [2-4].



Sin embargo, las investigaciones realizadas hasta la fecha no atendieron y no revelaron todas las singularidades de dichos sensores. En particular, los trabajos existentes no consideran los efectos de estado de polarización de la radiación óptica sobre la respuesta de sensores al índice de refracción del medio externo.

Por todo lo expuesto anteriormente, es de interés en el presente trabajo, investigar las propiedades de los sensores ópticos refractométricos de materiales de plástico; más específicamente, los sensores ópticos refractométricos con un elemento externo de sensado de forma semicilíndrica y semicilíndrica hueca, esto con un enfoque sobre los efectos de estado de polarización de la radiación óptica en dicho sensor.

## **1.2. Objetivo Principal**

Obtener nuevos conocimientos científicos básicos y aplicados sobre los sensores ópticos refractométricos de fibra óptica con elementos externos de detección semicilíndricos de materiales plásticos, con un enfoque especial sobre los efectos de estado de polarización de la radiación óptica en este tipo de sensores.

## **Objetivos Particulares**

- Analizar teórica y experimentalmente las características básicas de elementos refractométricos de detección en forma de un semicilindro y un semicilindro hueco, y obtener sus características de transmisión en función del índice de refracción del medio externo bajo diferentes combinaciones de parámetros geométricos y ópticos de los arreglos.
- Analizar teórica y experimentalmente la propagación de la radiación óptica linealmente polarizada en sensores refractométricos con elemento externo de detección en forma de un semicilindro y un semicilindro hueco, y obtener sus características de transmisión en función de orientación azimutal del plano de polarización de la radiación óptica de entrada y el índice de refracción del medio externo.

## **1.3. Metas**

- Obtener datos teóricos sobre características básicas refractométricas de elementos de detección de forma semicilíndrica sólida y hueca en función de parámetros de las fibras ópticas y su posición con respecto a elemento de detección.
- Obtener datos teóricos sobre la respuesta del sensor a índice de refracción del medio externo bajo diferentes orientaciones azimutales del plano de polarización de la radiación óptica de entrada bajo diferentes parámetros de las fibras ópticas y su

posición respecto al elemento de detección, esto para elemento semicilíndrico sólido y hueco.

- Verificar experimentalmente las características de sensor bajo la radiación óptica no polarizada y linealmente polarizada bajo diferentes parámetros geométricos y ópticos de los elementos del sensor.
- Analizar y comparar las predicciones teóricas con los resultados experimentales, y desarrollar las conclusiones y recomendaciones derivadas de los resultados del presente trabajo.

### 1.3. Metodología

La metodología de la presente investigación incluye el uso de los métodos teóricos y experimentales. En particular, el empleo de los modelos matemáticos de propagación de la luz en elementos ópticos objeto del presente estudio; esto utilizando los conceptos de la Óptica Geométrica y el método de trazado de rayos en particular. Se prevé el uso de algunos paquetes de software que permiten el trazado de rayos en elementos externos de detección: el software no comercial SRFO y el software comercial TracePro.

También, la metodología incluye el uso de métodos experimentales, tales como el diseño, fabricación y caracterización experimental de las muestras de los elementos de detección ópticos de plástico utilizando técnicas experimentales de la óptica y electrónica descritas ampliamente en la literatura especializada.

Los estudios experimentales se conducen con las muestras de las fibras ópticas y los elementos ópticos de polimetil-metacrilato (PMMA), por ser un material típico de las fibras ópticas comerciales de plástico, además es un material fácilmente disponible en nuestras condiciones.

### 1.5. Referencias del capítulo 1

- [1] O. Ziemann, and , H. Poisel, "Short distance optical connections for home networks, sensing and mobile systems," in Optical Fiber Communication Conf. 1-3 (2007).
- [2] S. Khotiaintsev, E. Llanito Caudillo, S. Perez García, J. Morales Farah, "Optical-Fiber Refractometric Sensor with Semi-Cylindrical Optical Detection Element for Measuring the Level of Gasoline," In: Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA 2009), IEEE, Cuernavaca, Morelos, México, September 22-25 2009 , pp. 468-473.
- [3] S. Khotiaintsev, E. Llanito Caudillo, S. Perez García, J. Morales Farah "Discrete POF liquid-level sensor for measuring the level of gasoline and detecting water in automobile

tanks” The 18th International Conference on Plastic Optical Fibers, Sydney, Australia, September 9-11 2009.

- [4] S. Perez García, “Estudio de las fibras ópticas de plástico como medio de transmisión y como transductores de los sensores ópticos”, Tesis, UNAM, México, 2010.
- [5] E. Udd. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. New York: Wiley, 2011.

## Capítulo 2. Sensores de fibra óptica con base en materiales plásticos: revisión del estado de arte

### 2.1. Introducción

Históricamente, las fibras ópticas modernas fueron desarrolladas para aplicaciones en telecomunicaciones y el material principal de estas fibras fue el sílice (dióxido de silicio amorfo, SiO<sub>2</sub>) con diversas impurezas (dopantes) utilizadas para aumentar o disminuir el índice de refracción de sílice y de esta manera obtener materiales para el núcleo y revestimiento de la fibra óptica [21]. La existencia de las fibras ópticas de sílice de alta calidad para telecomunicaciones produjo suficientes condiciones para el desarrollo de sensores de diversas cantidades físicas de fibra óptica, basados esencialmente en las fibras ópticas de sílice, aunque fueron propuestos también las fibras ópticas de vidrios de otros tipos para un mejor sensado de algunas cantidades físicas particulares, tal como el campo magnético [20].

Las primeras fibras ópticas de plástico (POF) fueron desarrolladas a finales de los 60's pero ganaron popularidad durante últimos diez años debido a la creciente necesidad en redes locales de bajo costo y fácil manejo, en particular redes locales al bordo de automóviles y otros vehículos. Los sensores ópticos basados en materiales ópticos plásticos son un complemento importante a las redes de datos a bordo de vehículos; son un área emergente e importante de desarrollo tecnológico.

A continuación se presenta una revisión del estado de arte de materiales ópticos plásticos, las fibras ópticas basadas en estos materiales y los sensores ópticos de fibras de plástico, esto con un enfoque a los sensores de tipo refractométricos debido a su importancia para las aplicaciones a bordo de vehículos como dispositivos de sensado de nivel de líquidos: combustible, congelante, líquido de frenos, de dirección hidráulica, etc.

### 2.2. Antecedentes históricos

Las primeras fibras ópticas de plástico fueron desarrolladas en 1968 por Dupont, luego esta empresa vendió la respectiva patente a Mitsubishi Rayon [1]. Las POF no fueron objeto de estudio para transmisión de datos durante muchos años debido a que la atenuación de la señal óptica es mucho más grande en comparación con las fibras ópticas de sílice [2]. Sin embargo, actualmente las POF están ganando gran popularidad para aplicaciones de corto alcance como en redes de área local en edificios, redes locales de fábricas, plantas industriales, almacenes, etc., redes en automóviles y otros medios de transporte, y otras aplicaciones en donde la longitud del enlace no supera unos cientos de metros. A estas

distancias, las POF son capaces de transmitir grandes anchos de banda [3]. En comparación con las fibras de vidrio son más fáciles de instalar, tienen un menor costo y son menos susceptibles a romperse bajo tensión debido a su alta ductilidad. En el caso de fibras ópticas de PMMA, su temperatura máxima de operación y almacenamiento es de 85°C ya que a esta temperatura, el PMMA sufre oxidación [1].

### 2.3. Materiales ópticos plásticos

Existen muchas razones por las cuales los diseñadores de dispositivos ópticos prefieren materiales plásticos ópticos, aunque esencialmente son dos razones principales: 1. costo relativamente bajo y 2. facilidad de implementación de configuraciones complejas ópticas de elementos únicos [4]. Además, los elementos ópticos de plástico presentan mayor resistencia a impactos, menor peso y más posibilidades de configuración para facilitar el ensamblaje de los sistemas. La posibilidad de configuración compleja es muy útil en el caso particular de sistemas con lentes esféricas, por simplificar el diseño del sistema y reducir su masa y costo. Otra ventaja de los plásticos es que estos materiales cuando se rompen no se astillan como el vidrio, los fragmentos son más grandes y tienden a ser más obtusos y menos dañinos [4].

Las principales desventajas de los elementos plásticos ópticos son: 1. una menor intolerancia a cambios severos de temperatura y 2. baja tolerancia a ralladuras.

Sin embargo, las ventajas que el plástico brinda a la mayoría de las aplicaciones ópticas superan típicamente las desventajas señaladas.

Las propiedades más importantes de los materiales ópticos de plástico se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Algunas propiedades de los materiales ópticos de plástico

	<b>Material</b>								
	Características	Acriclo (PMA)	Poliestireno	Policarbonato (Grado Óptico)	NAS	Polioléfin (Zeonex)	Artón F	Optores (OZ100-1100)	Optores (OZ1310-1330)
	Banda espectral (nm)	390-1600	360-1600	395-1600	300-1600	390-?	390-?	410-?	
<b>Propiedades Ópticas</b>	Índice de refracción	1.491	1.590	1.587	1.563	1.525	1.51	1.4995-1.5025	1.5059-1.5096

	íon @ 589nm @25°C								
	Valor Abbe	57.4	30.9	29.9	33.5	56.3	57	57-56	54-52
	Transmitancia (%) espesor 3.2mm	92	92	90	90	91	92	92	92
	Haze (%) Espesor 3.2mm	1.3	1.5(?)	1.7(?)	1.5(?)	1.5(%)	1.5	1(?)	1(?)
<b>Propiedades Físicas</b>	Gravedad específica	1.19	1.06	1.20	1.09	1.01	1.08	1.16	1.19
	Max Temperatura (°C)	90	80	120	85	123	171	95-100(?)	80-100(?)
	CTE Lineal	6.8x10 <sup>-5</sup>	7x10 <sup>-5</sup>	6.6x10 <sup>-5</sup>	7x10 <sup>-5</sup>	7x10 <sup>-5</sup>	6.1	7	7
	Resistencia a Abrasión (1-10)	10	4	2	6	>11	?	?	?
	Resistencia al impacto Izod 1/4" muescas	1	1(?)	12	1.6(?)	3.2(?)	2	?	?
<b>Propiedades Ambientales</b>	dN/dT (x10 <sup>-6</sup> )	-105	-104	-107	-110	-130	-35 (?)	-100	-100
	Sensibilidad a absorción	Alto 2.0	Bajo	Bajo 0.4	Medio	Bajo	Bajo 0.4	Bajo 1	Bajo 1

	ón de humedad (agua) (%) 23°C, 1 semana								
<b>Propiedades de Fabricación</b>	Capacidad de proceso	Exceente	Bueno	Pobre	Exceente	Bueno	Por determinar	Por determinar	Por determinar
	Birrefringencia	Muy bueno	Razonable	Pobre	Bueno	Bueno	Bueno	20% mejor que PMMA	Exceente
<b>Propiedades Químicas</b>	Resistencia a metanol	limitada	?	Limitada	?	?	Bueno	?	?

La variedad de materiales plásticos ópticos es mucho menor que los de vidrios crudos disponibles. Esto se traduce en una menor libertad de diseño debido a la reducida selección de dispersiones e índices de refracción. Sin embargo el uso creativo de plásticos asféricos generalmente compensa la estrecha selección de materiales.

El proceso tecnológico típico de fabricación de elementos ópticos de plástico es el moldeo por inyección (figura 2.1) que permite producir grandes cantidades de piezas de forma económica. Los moldes de multicavidad permiten un proceso de manufactura de bajo costo para ser combinado con materiales crudos baratos para crear una poderosa ventaja económica para grandes volúmenes de producción.

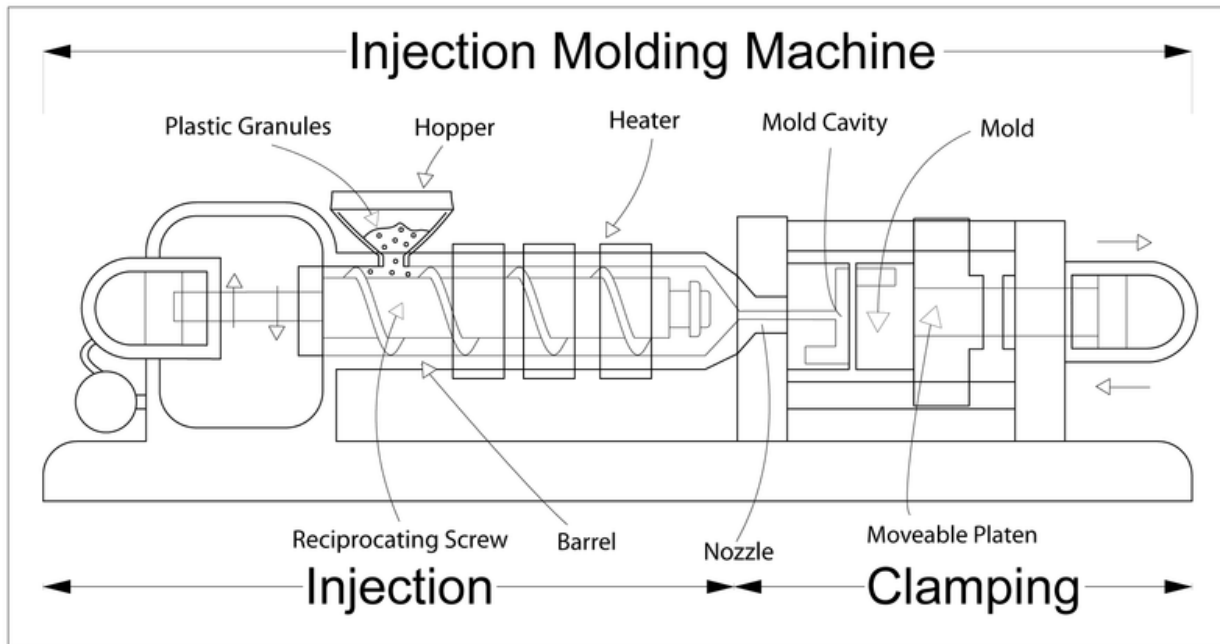


Figura 2.1. Esquema de moldeo por inyección de elementos ópticos en moldes de metal que contienen cavidades con superficies pulidas con una calidad óptica [22].

El proceso de moldeo también permite la fabricación e implementación de distintos elementos de ensamble como soportes de montaje, huecos, ranuras y bridas para ser integradas con el elemento óptico. El resultado es un diseño de una sola pieza que elimina la necesidad de una fase de montaje sobre un soporte físico y simplifica el ensamble y alineamiento. Adicionalmente se pueden combinar múltiples elementos en una configuración óptica única.

Considerando las ventajas de los materiales con propiedades ópticas de plástico, se han desarrollado diversos sensores, a continuación se describen dos tipos de sensores: 1. Sensores basados en la resonancia de plasmones superficiales y 2. sensores basados en la reflexión interna controlada por el medio externo en elementos de detección ópticos extrínsecos, ambos sensores son descritos por ser objeto de estudio en esta tesis.

## 2.4. Sensores refractométricos basados en fibras ópticas de plástico

### - Sensores refractométricos basados en la Resonancia de Plasmones superficiales

La Resonancia de plasmón superficial (SPR) es la oscilación de resonancia de electrones de conducción en la interfaz entre un material de permitividad negativa y positiva estimulado por luz incidente. La condición de resonancia se establece cuando la frecuencia de fotones incidentes coincide con la frecuencia natural de los electrones de la superficie oscilantes contra la fuerza de recuperación de núcleos positivos. SPR es la base de un conjunto de



instrumentos de medición de la absorción de materiales depositados encima de sustrato de un metal: típicamente oro o plata.

Una de las primeras aplicaciones de la resonancia de plasmones superficiales fue la medición del espesor y de índice de refracción de diversas películas sobre sustratos de oro. Las curvas de resonancia cambian a valores mayores cuando el espesor o el índice de refracción del material de la película aumentan. Los sensores están calibrados para la aplicación específica, y se utilizan con la interpolación dentro de la curva de calibración. Además, los plasmones superficiales se utilizan en la espectroscopia óptica en las mediciones de fluorescencia, dispersión de Raman, y generación de armónicas ópticas.

El estudio de la resonancia de plasmones superficiales fue propuesto por Jorgenson y Yee [6], que utilizaron una fibra multimodo a la que se quitó el revestimiento de una pequeña región y sobre la que se depositó alrededor del núcleo una capa de plata para implementar la resonancia de plasmones superficiales para interrogación de longitud de onda. Asimismo mostraron también que el rango de medición de índice de refracción externo se puede adaptar a un rango específico mediante el uso de una capa delgada adicional de dieléctrico de alto índice de refracción y fibras de alto índice de refracción del núcleo [7]. Típicamente, estos sensores usan fibras pulidas lateralmente [8-11].

Partiendo de una configuración base “fibra óptica + metal” habían muchos intentos de mejorar la sensibilidad y optimizar el rango de funcionamiento de los sensores de plasmón superficial para aplicaciones particulares. En varios trabajos añaden un segundo recubrimiento de un material de alto índice de refracción que cambia el rango de índices de refracción que detecta el sensor [8,9]. Sin embargo, esto típicamente reduce la sensibilidad del sensor a las variaciones del índice de refracción con respecto a los sensores sin el segundo recubrimiento debido a la menor concentración de campo. Para lograr una mejor miniaturización de los sensores se utilizan la fibra óptica monomodo [9,11]. Las fibras monomodo presentan resonancia bien marcada de plasmones superficiales ya que solo un modo se propaga por la fibra a una determinada longitud de onda. Además, las fibras monomodo preservan mejor la polarización de la luz incidente en ausencia de curvaturas, torsiones, etc.

La desventaja de los sensores de resonancia de plasmones superficiales basados en fibra monomodo consiste en el rango muy limitado de medición de índice externo de refracción. A la fecha, los intentos de desarrollar los sensores de plasmón superficial basados en fibras ópticas de plástico no fueron tan exitosos como en el caso de fibras de vidrio.

- **Sensores basados en la reflexión interna controlada por el medio externo en elementos de detección ópticos extrínsecos**

El primer sensor refractométrico de tipo amplitud basado en fibras ópticas fue descrito por Abuaf y Zimmer en [23]. Eventualmente, los sensores refractométricos con elementos ópticos extrínsecos de detección acoplados a fibras ópticas lograron competencia sobre sensores refractométricos intrínsecos [14, 15].

En particular, los sensores refractométricos con elementos ópticos externos de detección de vidrio y plástico de diversas formas geométricas fueron estudiados en una serie de trabajos realizados en la Facultad de Ingeniería de la UNAM desde 2000 a la fecha [12-19].

Un sensor refractométrico genérico con elemento de detección semiesférico de vidrio se muestra en la figura 2.2.

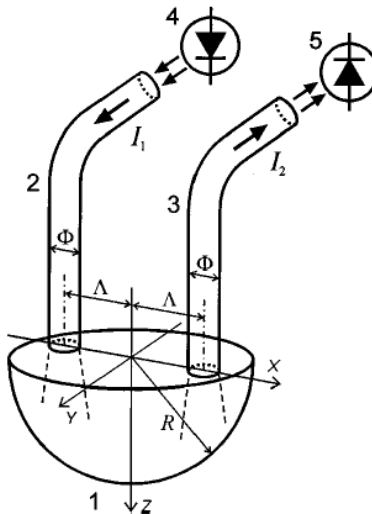


Figura 2.2. Esquema de un sensor refractométrico con elemento externo de detección semiesférico [15].

Este tipo de sensor tiene la desventaja de una respuesta típicamente poco lineal, por lo cual en trabajos subsecuentes fueron investigados los sensores refractométricos con elementos externos de detección de una forma geométrica más compleja: paraboloidal y elipsoidal [12-13], esto con la finalidad de encontrar las formas de superficie de trabajo que resultan en una mayor linealidad de la respuesta del sensor al índice de refracción externo. Se demostró la posibilidad de modificar la respuesta del sensor al variar la forma de superficie, pero sin mejoras significativas de la linealidad de dicha respuesta. Por otro lado, la fabricación de elementos paraboloidales y elipsoidales es más compleja y costosa en comparación a las formas geométricas más sencillas.

También, fueron realizadas investigaciones de los sensores de este tipo en el modo de reflexión (figura 2.3, b) [13], con la finalidad de reducir a la mitad la cantidad de fibras ópticas necesarias en un sensor. La conclusión principal fue que el acoplador direccional (no mostrado en la figura 2.3, b) que se requiere para la separación de la radiación óptica incidente y reflejada en esta configuración es más complejo y costoso que la segunda fibra óptica del sensor en el modo de transmisión. Además, en el mercado no hay ningunos acopladores direccionales comerciales de fibras multimodales de plástico. Por todo lo expuesto anteriormente la operación de sensores refractométricos en cuestión en el modo de reflexión no tiene mucho sentido práctico.

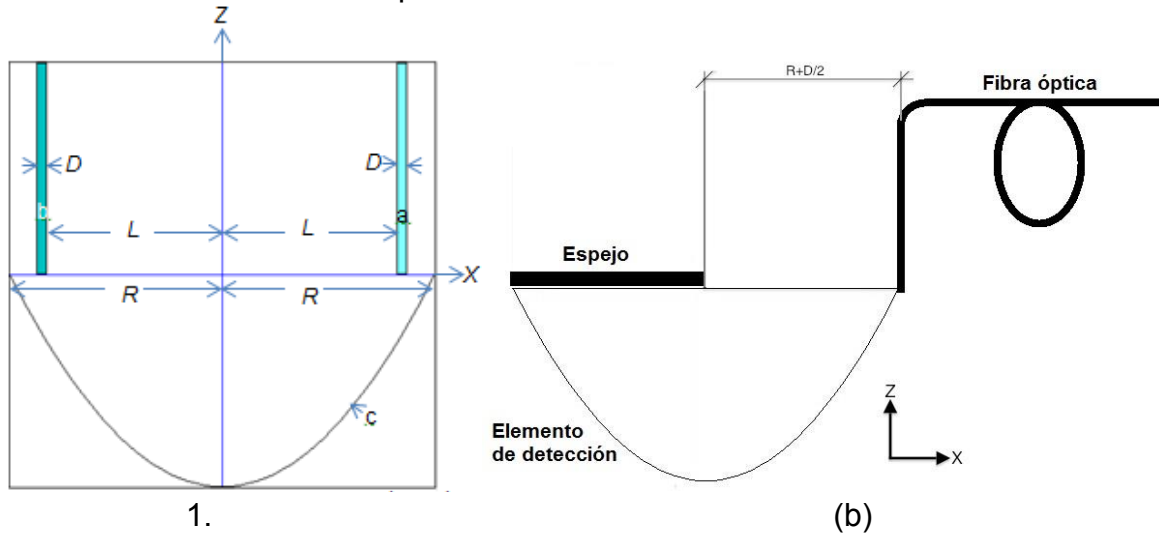


Figura 2.3. Esquemas de sensores refractométricos con elemento externo de detección paraboloidal: (a) modo de transmisión, (b) modo de reflexión [11-12].

A pesar de dichas singularidades y limitaciones, los sensores refractométricos mencionados tiene las siguientes aplicaciones: a) en mediciones de nivel de nitrógeno líquido [16], b) en mediciones de concentración de sal disuelta en agua [18], c) en medidores de nivel de gasolina en tanques [19], y d) en monitoreo de líquido propelente en un sistema de propulsión de una nave espacial, en la etapa de desarrollo y pruebas terrestres de este sistema [17]. Sin embargo, la fabricación de elementos ópticos de vidrio de una forma semiesférica, paraboloidal y elipsoidal es compleja y relativamente costosa. En particular, estos factores complican y dificultan la implementación de arreglos grandes de dichos sensores necesarios para mediciones de nivel de líquidos en tanques y recipientes.

## 2.5. Conclusiones

- a) Las fibras ópticas de materiales plásticos presentan un recurso tecnológico importante para redes locales de datos y sensado de diversas cantidades físicas al bordo de vehículos, en las plantas, fábricas y otras localidades relativamente pequeñas.

- b) Hay dos clases de sensores refractométricos de fibra óptica de mayor importancia práctica: los sensores de plasmón superficial y sensores con elementos externos de detección.
- c) La implementación de ambos tipos de sensores basándose en fibras ópticas de plástico ofrece nuevas ventajas competitivas en comparación a los sensores basados en fibras tradicionales de vidrio (sílice), sin embargo, el desarrollo y perfeccionamiento de dichos sensores enfrente diversos problemas no resueltos.
- d) Dentro de los sensores basados en la resonancia del plasmón superficial el problema principal consiste en encontrar una tecnología eficaz y económica de fabricación de estos sensores en fibras ópticas de plástico.
- e) Dentro de los sensores basados en reflexión controlada por un medio externo en un elemento óptico de detección el problema principal consiste en encontrar una forma eficaz y económica de implementación de arreglos grandes de estos sensores con respuesta bien controlada y estable, para lograr la medición de nivel de diversos líquidos en tanques y recipientes.
- f) Al comienzo de este trabajo, no existían ningunas respuestas a los problemas mencionados y sobre el potencial de cada uno de estos sensores. Sus ventajas y desventajas no se conocían a la profundidad, por lo cual se realizó el trabajo cuyo planteamiento, realización y resultados la autora de esta tesis se presenta en los capítulos siguientes.

## 2.6. Referencias del capítulo 2

- [1] R. J. Bartlett, P. C. Rekha, E. Piers, M. David , R. Morgan, and P. J. Scully, "Plastic Optical Fibre Sensors and Devices," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, pp. 431-457, 2000.
- [2] F. Sulaiman, A. Ahmad, and A. Zin Ahmed. "Coupling Efficiency of Polymer Optical Fiber for Light-Gathering Power in Optical Fiber Daylighting System," in *National Power and Energy Conference 2003 Proceedings*, pp. 296-299, 2003.
- [3] I. T. Monroy, H.P.A. vd Boom, A.M.J. Koonen, G.D. Khoe, Y. Watanabe, Y. Koike, and T. Ishigure. "Data Transmission Over Polymer Optical Fibers," *Academic Press. Optical Fiber Technology* 9, pp. 159-171, 2003.
- [4] S. Bäumer, *Handbook of Plastic Optics*. John Wiley & Sons; 1 edition, 2005.
- [5] F. Berghmans, H. and Thienpont, "Plastic optical fibers for sensing Applications," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014*, pp.1-3 and 9-13, March 2014.
- [6] R.C. Jorgenson, and S.S. Yee, "A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance," *Sensors and Actuators B* 12(3), pp. 213-220, 1993.
- [7] R.C. Jorgenson, and S.S. Yee, "Control of the dynamic range and sensitivity of a surface plasmon resonance based fiber optic sensor", *Sensors and Actuators A* 43(1-3), 44-48,1994.

- [8] R. Slavík, J. Homola, and J. Ctyroky, "Optical Fiber Surface Plasmon Resonance Sensor for an Aqueous Environment," *12th International Conference on Optical Fiber Sensors. Technical Digest. Postconference Edition*, pp. 436-439, 1997.
- [9] R. Alonso, J. Subias, J. Pelayo, F. Villuendas, and J. Tornos, "Single-mode, optical-fiber sensors and tunable wavelength filters based on the resonant excitation of metal-clad modes," *Applied Optics*, Vol. 33(22), pp. 5197-5201, 1994.
- [10] J. Homola, "Optical fiber sensor based on surface plasmon excitation," *Sensors and Actuators*, B 29(1-3), pp. 401-405, 1995.
- [11] J. Homola, R. Slavík, "Fibre-optic sensor based on surface plasmon resonance," *Electron. Lett.*, Vol. 32(5), pp. 480-482, 1996.
- [12] L. Ayvar Campos, "Sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloide y elíptico", Tesis de Licenciatura, UNAM, México, 2012.
- [13] R. Díaz Hernández, "Sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal en modo reflexión", Tesis de Licenciatura, UNAM, México, 2014.
- [14] V. Svirid, S. N. Khotiantsev, "Optoelectronic multipoint liquid level sensor for light petrochemical products," *Proc. SPIE 4148*, Optoelectronic and Hybrid Optical/Digital Systems for Image and Signal Processing, 262, June 14, 2000.
- [15] V. Svirid, S. Khotiantsev, and P. L. Swart, "Linear and steplike characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element," *Opt. Eng.*, Vol. 42(5), pp. 1383-1389, 2003.
- [16] K. E. Romo-Medrano and S. N. Khotiantsev, "An optical-fiber refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 998-1004, 2006.
- [17] K. E. Romo-Medrano, S. N. Khotiantsev and V. 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.
- [18] S. Khotiantsev, K. Khotiantsev 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.
- [19] S. Perez García, "Estudio de las fibras ópticas de plástico como medio de transmisión y como transductores de los sensores ópticos", Tesis de Maestría, UNAM, México, 2010.
- [20] E. Udd, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. New York: Wiley, 2011.
- [21] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1991.
- [22] B. Rockey, University of Alberta Industrial Design, "Injection Molding Machine how to work injection mouldin", Febrero 2009. [Online]. Disponible en: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Injection\\_moulding.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Injection_moulding.png)
- [23] N. Abuaf, O. C. Jones, and G. A. Zimmer, "Optical probe for local void fraction and interface velocity measurements," *Review of Scientific Instruments*, 49, pp. 1090-1094, 1978

## Capítulo 3. Sensor refractométrico basado en la Resonancia de Plasmones Superficiales

### 3.1. Introducción

El principio de funcionamiento de este tipo de sensores se basa en resonancia localizada de plasmones superficiales, con aplicaciones en la medida de índice de refracción e identificación de sustancias líquidas.

El fenómeno de resonancia de plasmones superficiales tiene aplicaciones en sensado de índices de refracción desde hace 25 años [1]. Uno de los problemas principales en el caso de sensores, con base en fibras ópticas de plástico es la pobre repetitividad de varias tecnologías probadas hasta la fecha, para la fabricación de las fibras desgastadas [2-4]. Por esta razón uno de los objetivos de este trabajo es probar las vías para lograr una mayor repetitividad de los parámetros de fabricación de los sensores de resonancia de plasmones superficiales para el caso de fibras ópticas de plástico.

Esta parte de la tesis fue desarrollada durante una estancia de la autora en la Universidad de Alcalá de Henares: España, con el Grupo de Ingeniería Fotónica encabezado por el Dr. Óscar Esteban Martínez, Catedrático de la Universidad de Alcalá.

### 3.2. Descripción del Sensor

El sensor genérico consta de una fibra óptica de plástico adelgazada (con un “taper”), el taper de fibra óptica tiene una capa metálica de plata depositada en la superficie adelgazada. El depósito de plata en la fibra adelgazada se realizó por medio de una reacción química llamada reacción de Tollens [5]. La figura 3.1 muestra una imagen de la fibra óptica adelgazada con un recubrimiento de plata.

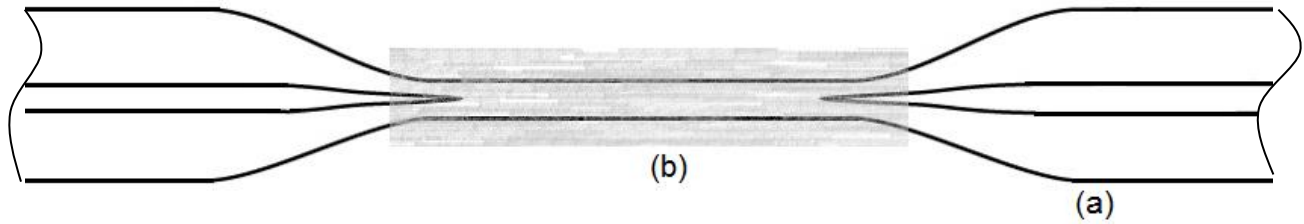


Figura 3.1. Esquema de un sensor de resonancia de plasmones superficiales: (a) fibra óptica adelgazada, (b) la capa de plata depositada en la fibra óptica.

Una fuente de amplio espectro óptico se conecta a uno de los extremos de la fibra óptica, mientras que en el otro extremo se coloca un espectrofotómetro. La lectura de espectro de transmisión se analiza, la longitud de onda de resonancia cambia con el cambio del índice de refracción externo que rodea a la zona de la fibra adelgazada con recubrimiento de plata.

### 3.3. Metodología de fabricación y caracterización del sensor

El diseño y fabricación del sensor se divide en dos fases. La primera es la fabricación de la fibra adelgazada (taper) y la segunda es el depósito de plata en la fibra adelgazada.

Para la fabricación del taper se utilizaron las siguientes técnicas: (A) por medio de calentar y estirar la fibra óptica, (B) por medio de disolución de la fibra con diferentes solventes (C) por la combinación de las dos técnicas anteriores (D) por medio de pulido mecánico. El objetivo de la fabricación fue fabricar un taper con las siguientes características (ver figura 3.2): lo más largo posible (10 cm aproximadamente de longitud del cuello) y de un diámetro de cuello reducido (menor a 0.7 mm).

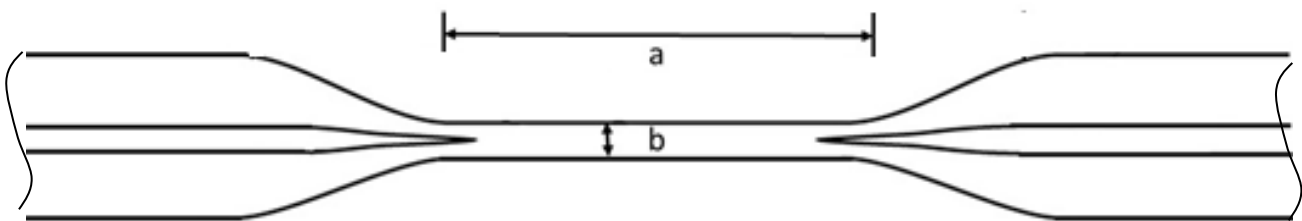


Figura 3.2. Parámetros del taper: (a) longitud del cuello, (b) diámetro del cuello.

A continuación se describen los resultados de los tres métodos de fabricación de la fibra adelgazada.

## A) Fabricación de taper por medio de estirar y calentar

**Objetivo:** Fabricar un taper con fibra óptica de plástico que tenga de largo entre 2 y 5 cm y que tenga un diámetro del cuello menor a 500  $\mu\text{m}$ .

Fibra utilizada:

- Modelo: DD-1000
- Marca: Jiangxi Daisheng
- Diámetro: 1 mm
- Apertura numérica: 0.5
- Material del núcleo: PMMA
- Índice de refracción del núcleo: 1.492
- Material del revestimiento: polímero fluorinado

### Descripción del método:

Se posicionó la fibra óptica a dos sujetadores los cuales estaban sobre unidades de desplazamiento controladas por una computadora que permitía estirar la fibra óptica, a su vez se colocó un conductor rodeando la fibra óptica, montado sobre una unidad de desplazamiento, también controlada por la computadora, el conductor se conectó a una fuente de voltaje para aplicar una diferencia de potencial que caliente el conductor y a su vez caliente la fibra óptica. La figura 3.3 muestra un diagrama esquemático del proceso de fabricación.

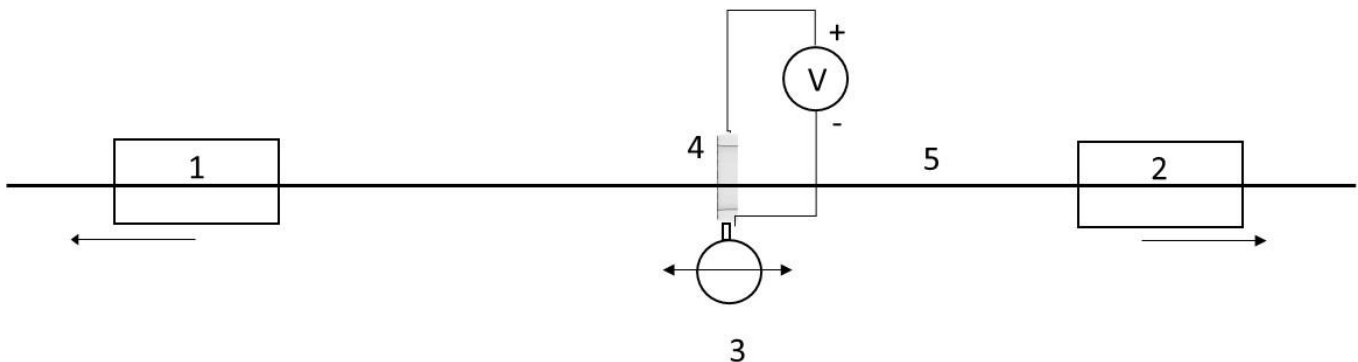


Figura. 3.3. Diagrama esquemático de fabricación de taper por medio de estirar y calentar. (1 y 2) Sujetadores sobre unidades de desplazamiento, (3) unidad de desplazamiento, (4) conductor conectado a fuente de voltaje, (5) fibra óptica.

Por medio de una computadora se controlaron los parámetros para la fabricación del taper, y en la fuente de voltaje se controlaba la corriente de la misma, los parámetros que se controlaban son los siguientes: diámetro del cuello deseado en  $\mu\text{m}$ , la velocidad de estiramiento del taper en  $\text{mm}/\text{min}$ , la velocidad del quemador en  $\text{mm}/\text{min}$ , el parámetro de transición adimensional y la corriente suministrada por la fuente en [A]. Estos parámetros se



introducen a un programa que controla la velocidad y la posición de las unidades de desplazamiento.

Los resultados de fabricación del taper son los siguientes:

### Muestras obtenidas con el método A

Tabla 3.1. Resultados y parámetros del programa de fabricación de taper por el método A

Muestra	Diámetro del cuello	Velocidad de estiramiento	Velocidad del quemador	Amplitud inicial del quemador	Alfa parámetro de transición	Corriente
A1	500	7.5	1.2	7	1.0	2.57
Características del taper fabricado: se fabrica taper de longitud 10.87 mm y de diámetro del cuello de 0.6 mm, se observa que la zona del taper está cristalizada. Por lo que la fibra pierde sus propiedades ópticas.						
A2	500	7.5	1.2	7.2	1.0	2.57
Características del taper fabricado: se fabrica taper de longitud 7.72 mm y un diámetro del cuello de 0.76 mm por lo que se puede observar que no es suficiente con aumentar la amplitud inicial del quemador para hacer tapers más largos.						
A3	500	7.5	1.9	7	1.0	2.57
Características del taper fabricado: se fabrica taper de longitud 7.20 mm y un diámetro del cuello de 0.69 mm por lo que se puede observar que no es suficiente con aumentar la velocidad del quemador para hacer tapers más largos y delgados.						
A4	500	7.5	0.8	7	1.0	2.57
Se rompe la fibra, al disminuir la velocidad del quemador, se aplica mayor temperatura a ciertas zonas y la fibra se funde.						
A5	450	7.5	1.5	7	1.0	2.47
Características del taper fabricado: se fabrica taper con una longitud de 8.56 mm y un diámetro de cuello de 0.74 mm, se observa que este taper ha aumentado un poco la longitud.						
A6	450	7.5	1.5	7	1.0	2.52
Se rompe el taper en 1 minuto y 10 segundos. Se hacen pruebas con corriente de 2.5 y también rompe el taper. Con corriente de 2.49 se fabrica taper de longitud de 8.08 mm y un diámetro de cuello de 0.78mm, de los resultados anteriores se concluye que al aumentar un poco la corriente varían muy poco los parámetros del taper, pero es importante encontrar una corriente de umbral en la cual no se rompan los tapers.						
A7	400	8.5	1.5	7	1.0	2.5
Características del taper fabricado: se fabrica taper con longitud de 7.82 mm y un diámetro de cuello de 0.67 mm, se repite el experimento y se obtiene una longitud de 7.54 mm y un diámetro de cuello de 0.7 mm.						

A8	350	8.5	1.5	7	1.0	2.5
	Características del taper fabricado: se fabrica taper con longitud de 8.4 mm y diámetro del cuello de 0.63 mm. Al modificar el diámetro del cuello se observa que aumenta un poco la longitud del taper, aunque aumenta el tiempo de fabricación del mismo.					
A9	300	8.5	1.5	7	1.0	2.5
	Características del taper fabricado: se fabrica taper de longitud 8.94 mm y diámetro del cuello de 0.62 mm.					
A10	250	8.5	1.5	7	1.0	2.5
	Características del taper fabricado: se fabrica taper de longitud 6.31 mm y diámetro del cuello 0.75 mm, se repite experimento y se mantienen esas condiciones.					

## B) Fabricación de taper por medio de disolución

**Objetivo:** Fabricar un taper con fibra óptica de plástico que tenga de largo entre 2 y 5 cm y que tenga un diámetro del cuello menor a 500  $\mu\text{m}$ .

Fibra utilizada:

- Modelo: DD-1000
- Marca: Jiangxi Daishing
- Diámetro: 1 mm
- Apertura numérica: 0.5
- Material del núcleo: PMMA
- Índice de refracción del núcleo: 1.492
- Material del revestimiento: polímero fluorado

### Descripción del método:

Se introduce la sección de la fibra óptica a un vidrio de reloj que contiene el solvente para disolver el cladding de la fibra óptica y fabricar el taper. Se utilizaron 3 solventes: acetona, diclorometano y tolueno, se probaron diferentes tiempos en los que la fibra se sumergió con cada uno de los solventes.

### Muestras obtenidas con el método B

Las siguientes muestras describen los resultados más importantes de todas las muestras fabricadas.

### Muestra B1

La fibra se sumergió durante 5 minutos en acetona, se fabricó taper (ver figura 3.4) de diámetro de cuello 0.81 mm y una longitud de 70 mm.

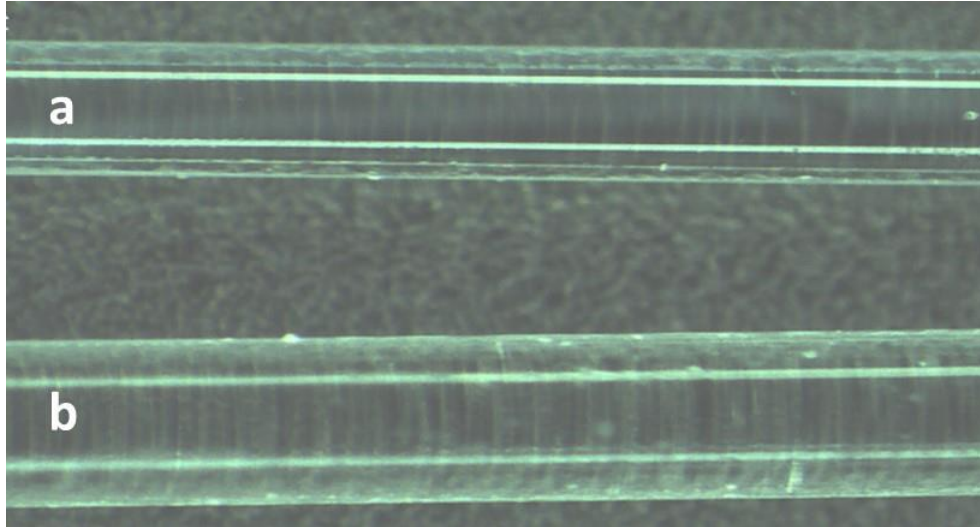


Figura 3.4. Taper fabricado por disolución en acetona, (a) fibra tratada con acetona, (b) fibra de referencia (sin sumergir). En la imagen se aprecia en (a) una fibra estrechada (taper) debido a la disolución en acetona comparada con la fibra (b) de referencia (Fotografía)

### Muestra B2

La fibra se sumergió durante 5 minutos en diclorometano, se fabricó taper (ver figura 3.5) de diámetro de cuello 0.87 mm y una longitud de 70 mm, sin embargo la disolución no se muestra uniforme.

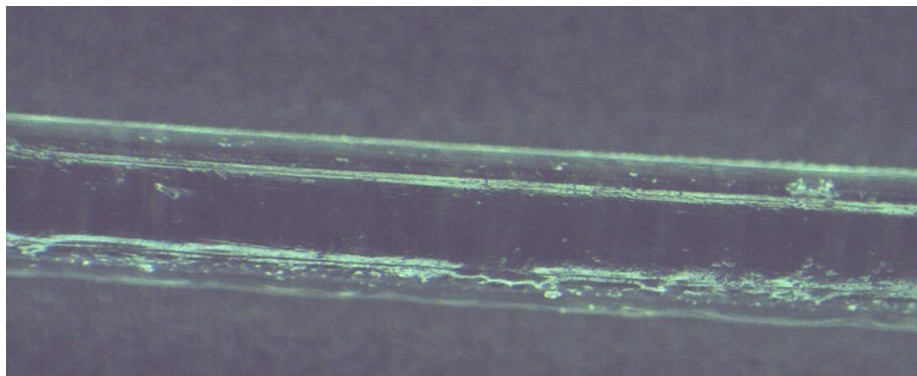


Figura 3.5. Taper fabricado por disolución en diclorometano (parte central del taper). La superficie del taper se observa porosa y la disolución no es homogénea y hay separación del revestimiento en varios puntos (Fotografía).

### Muestra B3

La fibra se sumergió durante 10 minutos en tolueno, se fabricó taper (ver figura 3.6) de diámetro de cuello 0.93 mm y una longitud de 70 mm.

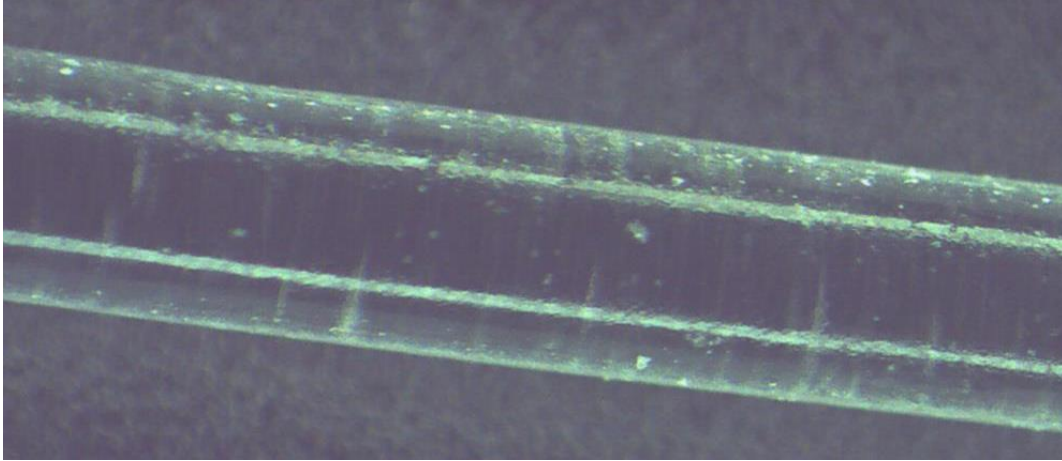


Figura 3.6. Taper fabricado por disolución en tolueno (parte central del taper). La superficie del taper se observa porosa debido al proceso de disolución (Fotografía).

### C) Fabricación de taper por medio de disolución y posteriormente calentado y estirado

**Objetivo:** Fabricar un taper con fibra óptica de plástico que tenga de largo entre 2 y 5 cm y que tenga un diámetro del cuello menor a 500  $\mu\text{m}$ .

Fibra utilizada:

- Modelo: DD-1000
- Marca: Jiangxi Daisheng
- Diámetro: 1 mm
- Apertura numérica: 0.5
- Material del núcleo: PMMA
- Índice de refracción del núcleo: 1.492
- Material del revestimiento: polímero fluorado

#### Descripción del método:

Se introduce la sección de la fibra óptica a un vidrio de reloj que contiene el solvente para disolver el cladding de la fibra óptica y fabricar el taper, posteriormente se realiza sobre el taper anterior un proceso de estirado y calentamiento para obtener un taper con una longitud de cuello mayor y un diámetro de cuello menor.

## Muestras obtenidas con el método C

### Muestra C1

La muestra C1 se muestra en la figura 3.7, la fibra óptica se sumergió en acetona por 5 minutos y posteriormente se aplicó el programa de la muestra A8, se fabricó taper con una longitud de cuello de 7.18 mm y un diámetro de cuello de 0.67 mm.

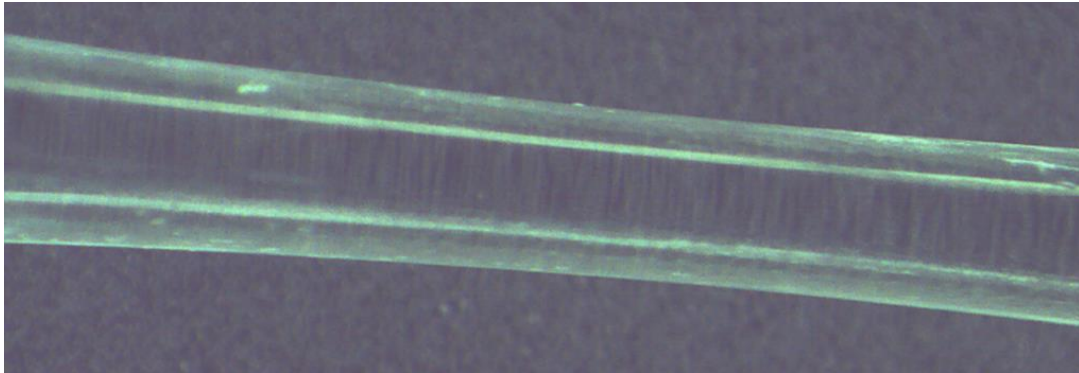


Figura 3.7. Taper fabricado por disolución en acetona y posteriormente se realiza un proceso de calentamiento y estirado

La muestra C1 fue la utilizada para fabricación del sensor debido a que la superficie se observó homogénea sin defectos y el diámetro del cuello del taper se observó más reducido con respecto a las otras muestras.

### Muestra C2

La muestra C2 se muestra en la figura 3.8, la fibra óptica se sumergió en diclorometano por 5 minutos y posteriormente se aplicó el programa de la muestra A8, se fabricó taper con una longitud de cuello de 7.24 mm y un diámetro de cuello de 0.74 mm.

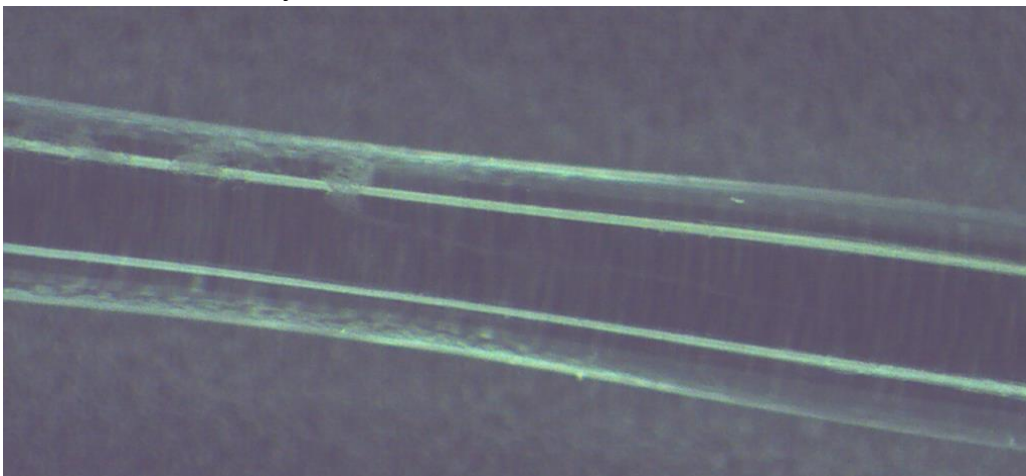


Figura 3.8. Taper fabricado por disolución en diclorometano y posteriormente se realiza un proceso de calentamiento y estirado. Se observan en el taper unas zonas porosas.

### Muestra C3

La muestra C3 se muestra en la figura 3.9, la fibra óptica se sumergió en tolueno por 5 minutos y posteriormente se aplicó el programa de la muestra A8, se fabricó taper con una longitud de cuello de 7.12 mm y un diámetro de cuello de 0.72 mm.

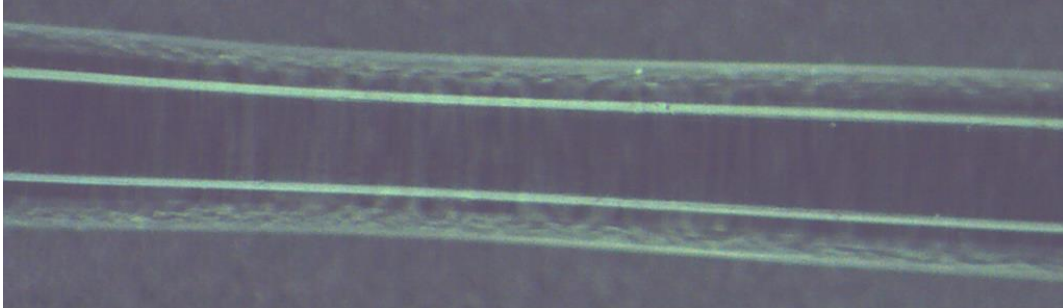


Figura 3.9. Taper fabricado por disolución en diclorometano y posteriormente se realiza un proceso de calentamiento y estirado. Se observa en el taper una superficie no homogénea y porosa debido a la disolución (Fotografía).

### D) Fabricación de taper por medio de desgaste mecánico

**Objetivo:** Fabricar un taper con fibra óptica de plástico que tenga de largo entre 2 y 5 cm y que tenga un diámetro del cuello menor a 500  $\mu\text{m}$ .

Fibra utilizada:

- Modelo: DD-1000
- Marca: Jiangxi Daisheng
- Diámetro: 1 mm
- Apertura numérica: 0.5
- Material del núcleo: PMMA
- Índice de refracción del núcleo: 1.492
- Material del revestimiento: polímero fluorado

#### Descripción del método:

Se pone la fibra óptica en una ranura en V dejando expuesta una zona de la misma, posteriormente se lija con una lija con granos de arena de 3  $\mu\text{m}$ .

#### Muestra obtenidas con el método D

La figura 3.10 muestra el taper fabricado por medio de desgaste mecánico, este método tiene la característica de que el desgaste de la fibra no es simétrico, aunque se pueden obtener tapers mucho más delgados.



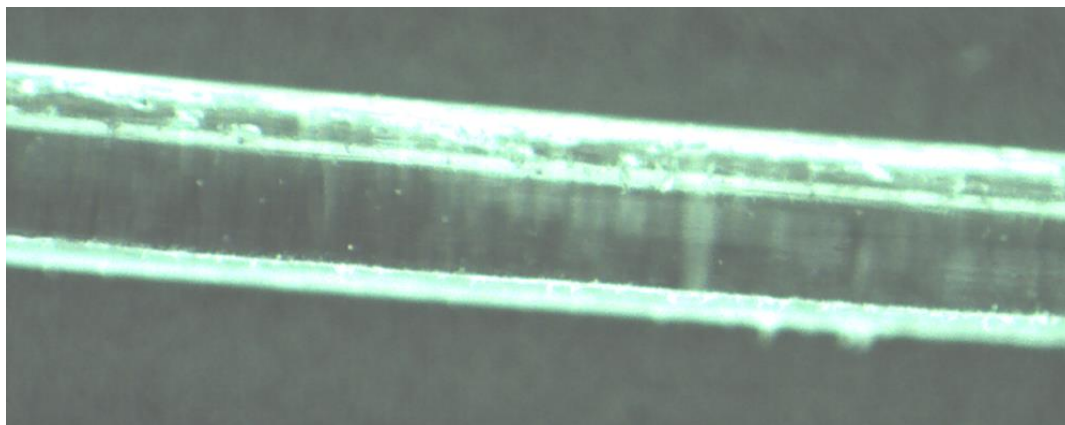


Figura 3.10. Taper fabricado por desgaste mecánico. Se observa desgaste no simétrico. (Fotografía).

### 3.4. Caracterización de la fibra óptica adelgazada

La fibra óptica adelgazada fue caracterizada con el diagrama de instalación de la figura 3.11, la fibra es cortada y se monta en conectores temporales en cada extremo y posteriormente se pule; un extremo de la fibra se coloca a una fuente óptica y el otro extremo a un fotoreceptor óptico, con ayuda de un osciloscopio se miden la intensidad cuando la fibra óptica es rodeada por aire y cuando es rodeada por una solución saturada de azúcar cuyo índice de refracción es de 1.39.

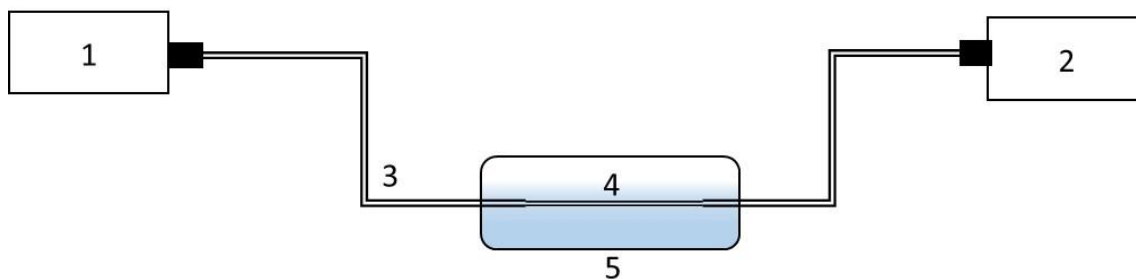


Figura 3.11. Caracterización de la fibra adelgazada, (1) fuente óptica, (2) receptor óptico, (3) fibra óptica, (4) taper, (5) contenedor con líquido.

Los resultados de la caracterización del taper se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Pérdidas en el taper en función del cambio de índice de refracción para diferentes muestras

Muestra bajo prueba	Intensidad en el receptor cuando el taper está rodeado por aire ( $n=1$ ) [mV]	Intensidad en el receptor cuando el taper está en solución de azúcar ( $n=1.42$ ) [mV]	Pérdidas en el taper en función del cambio de índice de refracción [dB]( $\delta n=0.42$ )
Muestra B1	51.2	44.8	1.16
Muestra C1	48	30.4	3.97

Muestra B2	116	115	0.075
Muestra C2	44	42.3	0.34
Muestra B3	159	157	0.11
Muestra C3	165	153	0.66

De la tabla 3.2 se puede observar que la muestra C1 que es un taper fabricado por medio de disolución de acetona y después sometido a un proceso de calentamiento y estirado es la que presentó mayores cambio en la intensidad al cambiar el índice de refracción, por lo cual se utilizará dicho taper para la fabricación del sensor de resonancia de plasmón superficial.

### 3.5. Depósito de plata en taper

Se depositó una capa de plata en el taper (para formar la región del sensor), el depósito se llevó a cabo con la introducción del taper en un vaso de precipitados en el cual se llevaba a cabo la reacción de Tollens [5], dicha reacción sirve para la diferenciación de aldehídos y cetonas. Una vez que se observó una película de plata en la superficie del vaso de precipitados se sacó el taper del vaso y se dejó secar por una hora.

### 3.6. Caracterización del sensor basado en la resonancia de plasmón superficial

El sensor se caracterizó con diferentes soluciones líquidas; para realizar la caracterización la fibra se corta y se montan conectores temporales en cada extremo y posteriormente se pule; un extremo de la fibra se coloca a una fuente óptica de amplio espectro (luz blanca de halógeno), mientras que el otro extremo se conecta a un espectrofotómetro, los datos son guardados y almacenados en una computadora para su posterior procesamiento. Se realizan mediciones con soluciones que tienen índices de refracción diferentes: (1) agua (1.333 RIU), (2) solución de etilenglicol al 20% (1.35 RIU), (3) solución de etilenglicol al 60% (1.39 RIU), (4) etilenglicol (1.43 RIU), (5) glicerol (1.471 RIU).



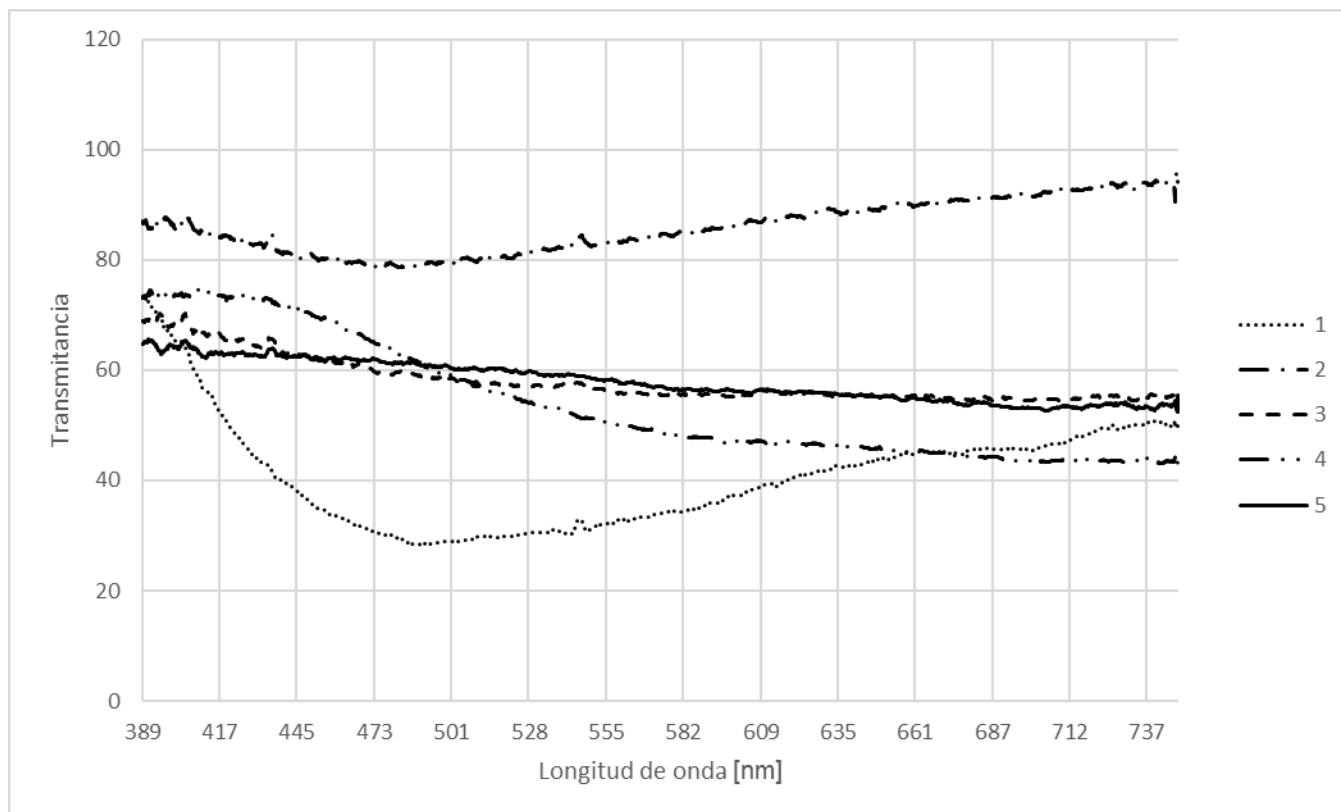


Figura 3.12. Transmitancia experimental vs longitud de onda [nm], (1) agua (1.333 RIU), (2) solución de etilenglicol al 20% (1.35 RIU), (3) solución de etilenglicol al 60% (1.39 RIU), (4) etilenglicol (1.43 RIU), (5) glicerol (1.471 RIU).

La figura 3.12 muestra que la resonancia del plasmón superficial. La respuesta de resonancia solo se presentó cuando se sumergió el sensor en agua, y se observa que para los otros líquidos no se mostró esta respuesta debido a que se utilizó el mismo sensor para realizar todas las mediciones, cuando se sumergió en agua parte de la plata que estaba depositada en el taper se quedó en el agua, por lo que el depósito de plata no tenía adhesión a la fibra óptica. La respuesta del sensor en agua es comparable a la respuesta de otros sensores descritos en [6-7], en el cual la resonancia se muestra con una respuesta muy ancha a diferencia de la respuesta de los sensores de fibras ópticas monomodo.

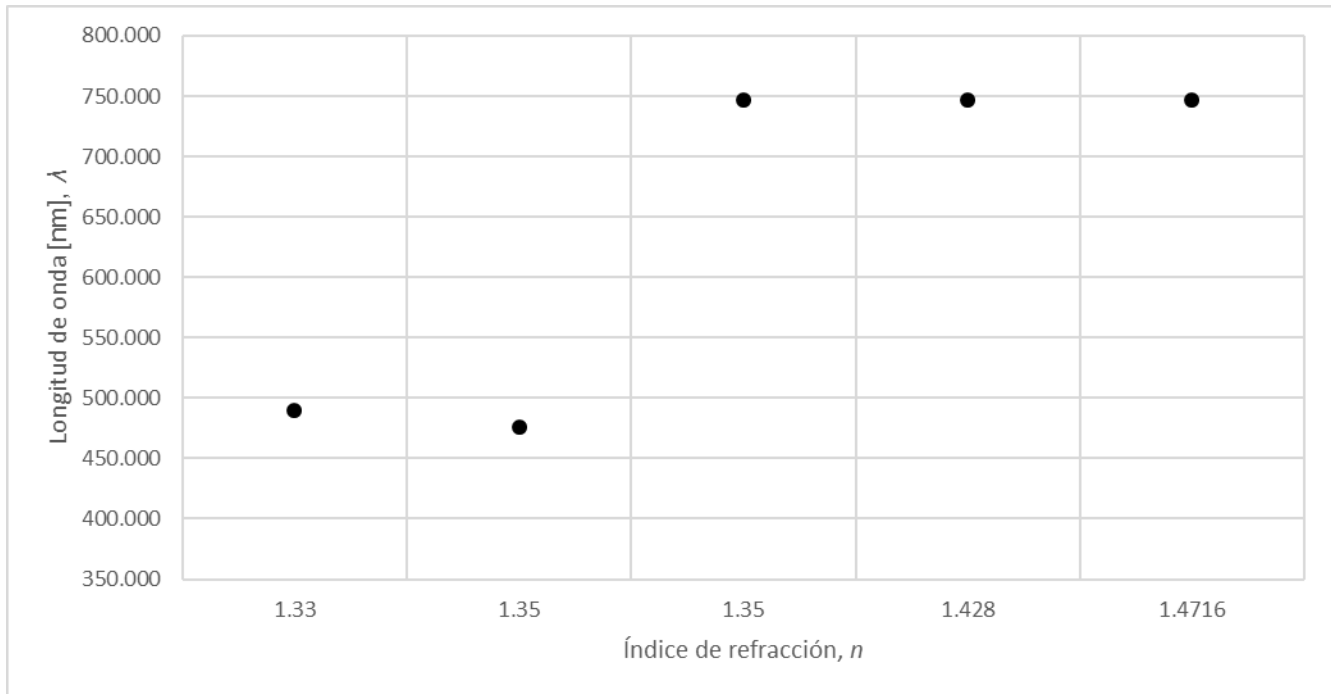


Figura 3.13. Longitud de onda de resonancia [nm] vs índice de refracción: (1) agua (1.333 RIU), (2) solución de etilenglicol al 20% (1.35 RIU), (3) solución de etilenglicol al 60% (1.39 RIU), (4) etilenglicol (1.43 RIU), (5) glicerol (1.471 RIU).

La figura 3.13 muestra la longitud de onda en la cual el sensor tenía intensidad mínima para cada solución líquida, se puede observar que para las soluciones de etilenglicol al 60% etilenglicol y glicerol la longitud de onda mínima es igual, esto es debido a que al realizar las mediciones el taper ya no tenía ningún depósito de plata.

### 3. 7. Discusión

En la presente investigación se presentaron los resultados experimentales sobre un sensor basado en la resonancia del plasmón superficial con base en fibras ópticas de plástico, los resultados experimentales no fueron los esperados debido a la poca repetibilidad que se obtuvo durante el proceso de fabricación del taper y a la adhesión de la plata en el mismo.

### 3. 8. Conclusiones

1. La tecnología de fabricación descrita y probada en este Capítulo es relativamente sencilla y el costo de este sensor es bastante bajo (de orden de decenas de pesos por pieza), por esto en un principio este sensor sirve como un sensor desechable aunque tiene varias deficiencias intrínsecas:

- a) la capa metálica no se adhiere suficiente bien al plástico,
  - b) el método de depositar la plata con el reactivo Tollens, tiene la desventaja de que la capa metálica no es suficientemente resistente en un líquido y se separa de la superficie del taper en aproximadamente 1 minuto,
  - c) el tiempo de vida de 1 minuto del sensor no es suficiente para aplicaciones prácticas, aunque permite hacer mediciones instantáneas; sin embargo hay que resolver el problema de calibración rápida y confiable de este sensor,
  - d) otro problema existente es la repetibilidad de las características del taper y de los sensores, la solución de este problema requiere de un mejor control sobre el proceso de fabricación.
2. En resumen, para que este sensor sea práctico debe mejorar tanto la tecnología de fabricación de tapers de fibra de plástico como el proceso de depósito de metales en plástico y que estos se adhieran a los tapers.
  3. Por todo lo expuesto anteriormente en capítulos siguientes hacemos un enfoque sobre sensores refractométricos con elementos ópticos externos de plástico que no emplean capas metálicas y por esto tienen mejores perspectivas para su implementación práctica: la forma particular geométrica del elemento de detección es un semicilindro.

### 3. 9. Referencias del Capítulo 3

- [1] J. Homola, S. Yee, and G. Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors: review," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 54, 1999.
- [2] N. Cennamo, L. Zeni, G. Alberti, R. Biesuz, G. D'Agostino, D. Merli, M. Pesavento, and A. Profumo, "Chemical sensors based on SPR in a Plastic Optical Fiber: Simultaneous detection of Fe(III) and Cu(II)," *Photonics Technologies, 2014 Fotonica AEIT Italian Conference on*, vol., no., pp.1,4, 12-14 May 2014.
- [3] F. Dejun, L. Guanxiu, L. Qi; C. Jie, Z. Jun, and Y. Zhicheng, "Design of Infrared SPR Sensor Based on Bimetallic Nanowire Gratings on Plastic Optical Fiber Surface," *Sensors Journal, IEEE*, vol.15, no.1, pp.255,259, Jan. 2015.
- [4] N. Cennamo, D. Massarotti, L. Conte, and L. Zeni, "Low Cost Sensors Based on SPR in a Plastic Optical Fiber for Biosensor Implementation," *Sensors (Basel, Switzerland)*, pp. 11752-11760, 2011.
- [5] T. Textor, M. G. Fouda, and B. Mahltig, "Deposition of durable thin silver layers onto polyamides employing a heterogeneous Tollens' reaction," *Applied Surface Science*, vol. 256, pp. 2337-2342, 2010.

- [6] N. Cennamo, G. D'Agostino, R. Galatus, L. Bibbò, M. Pesavento, L. Zeni, "Sensors based on surface plasmon resonance in a plastic optical fiber for the detection of trinitrotoluene," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 188, pp. 221-226, 2013.
- [7] N. Cennamo, D. Massarotti, R. Galatus, L. Conte, L. Zeni, "Performance Comparison of Two Sensors Based on Surface Plasmon Resonance in a Plastic Optical Fiber," *Sensors*, vol. 13, pp.721-735, 2013.

## Capítulo 4. Investigación de las características básicas de los sensores refractométricos basados en la alteración de la reflexión interna en un elemento transductor óptico de forma semicilíndrica

### 4.1. Introducción

En este trabajo hacemos un enfoque sobre sensores refractométricos con un elemento de detección óptica con superficie de trabajo de forma semicilíndrica. Ésta forma en comparación como por ejemplo la esférica que fue estudiada en una serie de trabajos anteriores [2] tiene la ventaja de poder acomodar múltiples sensores individuales sobre un elemento cilíndrico largo. Esto facilita la implementación de arreglos grandes de sensores de este tipo, lo que da una ventaja competitiva en la medición de nivel de líquidos en donde se requieren arreglos verticales de múltiples sensores.

### 4.2. Descripción general del sensor refractométrico con elemento transductor óptico semicilíndrico

El sensor considerado en este trabajo consiste de un elemento óptico de detección semicilíndrico el cual está conectado a un par o varios pares de fibras ópticas multimodo como se muestra en la figura 4.1. El elemento de detección óptico está hecho de un material transparente dieléctrico plástico PMMA (polimetil metacrilato). Cada par de fibras ópticas junto con un segmento del elemento semicilíndrico representan un sensor refractométrico.

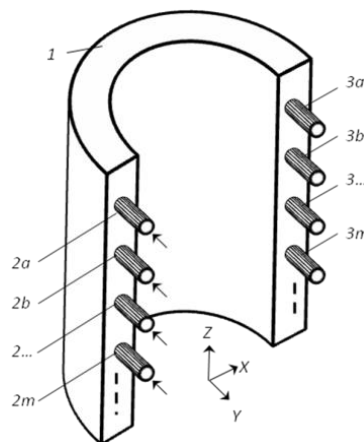


Figura 4.1. Sensor refractométrico genérico, con elemento transductor en forma de un semicilindro (arreglo de sensores con elemento semicilíndrico largo), 1. Elemento de detección, 2. Fibras ópticas transmisoras, 3. Fibras ópticas receptoras. [3]

El principio de operación del sensor consiste en lo siguiente. La luz de una fuente remota es acoplada vía la fibra de entrada, al interior del elemento de detección. La luz se propaga por medio de reflexiones totales internas hasta que llega al plano de salida del elemento de detección. En este plano una parte de la luz es acoplada al núcleo de la fibra de salida y llega a través de esa fibra a un fotoreceptor remoto. Cuando el elemento está en el aire la reflexión es un poco más potente (bajo cierta posición relativa de las fibras en el elemento de detección), cuando el elemento está inmerso en un líquido la reflexión en la superficie del cilindro disminuye o se desvanece por completo debido a una menor diferencia en los índices de refracción en los dos medios. En este sensor óptico la señal de salida que se registra es la magnitud de la corriente del fotodetector, de acuerdo a lo anterior la función de transmisión se representa por medio de la proporción entre la corriente del fotodetector y la influencia del medio exterior. La función de transferencia dependerá entonces de la transmisión óptica en la fuente, el coeficiente de transmisión en la fibra óptica transmisora, el coeficiente de transmisión en el elemento de sensibilidad, el coeficiente de transmisión en la fibra óptica receptora hasta el fotodetector, pero si consideramos que la potencia de la fuente óptica es estable, la característica de fotocorriente del fotodetector en todo su intervalo de trabajo en la entrada sea lineal y la corriente del fotodetector sea proporcional al coeficiente de transmisión de la vía óptica, adicional a esto si consideramos que los coeficientes de transmisión de la fibra óptica transmisora y receptora son constantes, entonces el coeficiente de transmisión de la vía óptica se puede determinar cómo función únicamente de la vía externa por el coeficiente de transmisión en el elemento de sensibilidad. Por consiguiente la transmisión óptica en el elemento de detección es  $T=I_{out}/I_{in}$ , donde  $I_{out}$  e  $I_{in}$  son la intensidad de la luz de salida y entrada respectivamente, las cuales son una medida del índice de refracción externo,  $n$ . La transmisión óptica  $T$  es una función de los parámetros ópticos y geométricos del elemento de detección y las fibras ópticas. En la práctica, es conveniente caracterizar el funcionamiento del sensor en términos de la transmisión relativa  $T^*=I_{out}(n)/I_{out\ air}$ , debido a que esta cantidad no incluye la intensidad de la luz de entrada  $I_{in}$  la cual no puede ser medida experimentalmente.

### 4.3 Modelo matemático del sensor

El modelo matemático que se utiliza para realizar el análisis teórico de la transmisión de la luz en el sensor, utiliza la óptica geométrica y el análisis de propagación de la luz se realiza por medio de trazado de rayos ya que el elemento en el cual se propaga la luz (elemento de detección semicilíndrico) y las fibras ópticas multimodos de plástico son muy grandes con respecto a la longitud de onda, los haces de luz se modelan por medio de un gran número de rayos elementales y la distribución de las direcciones de propagación y la energía de estos haces elementales corresponde a los parámetros del haz y la energía en el mismo.

En el análisis de las propiedades refractométricas del sensor, se empleó un procedimiento que incluye el cálculo de la transmisión del sensor contra el índice de refracción externo [2], con constantes de materiales y geometría de los elementos como parámetros. Para realizar la simulación numérica se utilizó el software no comercial SRFO descrito en [1]. Todos los parámetros del sensor están referenciados al radio del elemento óptico de detección figura

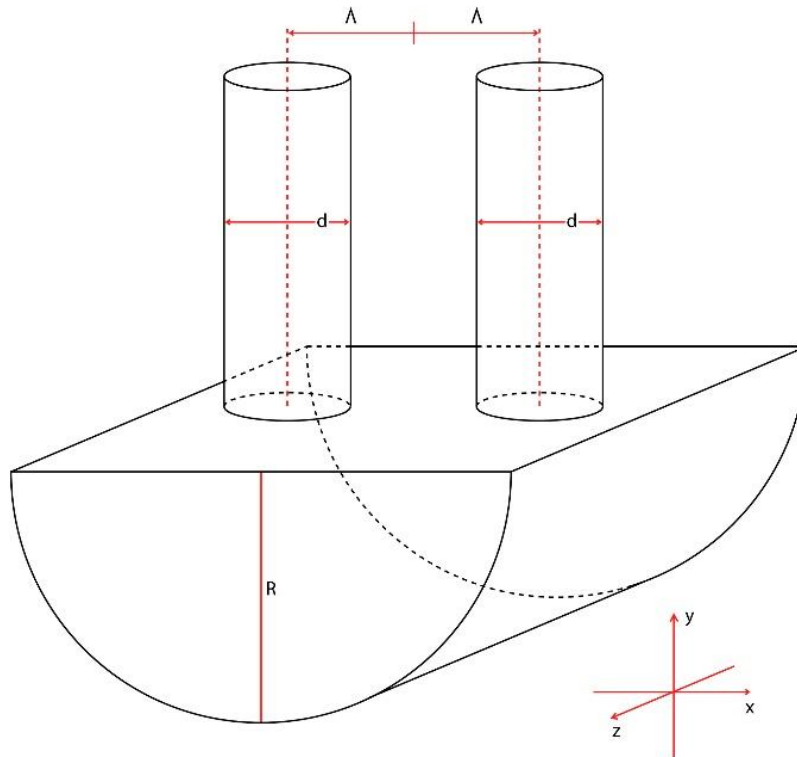


Figura 4.2. Sensor refractométrico genérico, con elemento transductor en forma de un semicilindro.

El modelo que utiliza el software se explica a continuación:

1. El rayo elemental tendrá como punto de salida una ubicación que se encuentre en los límites del círculo que se ubica en el plano xz de la fibra, que tiene como radio el de la fibra óptica. Las coordenadas iniciales del punto son determinadas de la siguiente forma:

$$r_i = \rho \cdot \sqrt{x_1}, \text{ cuando } 0 \leq r_i \leq \rho \quad (1)$$

$$\varphi_i = 2\pi x_2, \text{ cuando } 0 \leq \varphi_i \leq 2\pi \quad (2)$$

En donde:  $r$  es el radio de la fibra,  $x_1$  y  $x_2$  son números aleatorios entre 0 y 1. De esta forma se garantiza la aleatoriedad de la posición de los rayos, para poder realizar un muestreo más efectivo. Las ecuaciones anteriores se encuentran referenciadas a un sistema de coordenadas polares, en el sistema cartesiano, los puntos se pueden encontrar de la siguiente forma:

$$x_i = r_i \cos \Phi_i - \Lambda \quad (3)$$

$$y_i = r_i \sin \Phi_i \quad (4)$$

$$z_i = z_{fibra} \quad (5)$$

En donde  $\Lambda$  es la distancia del centro del semicilindro al centro de la fibra en el eje x.

A la salida de la fibra óptica se calcula la dirección del rayo, la dirección de éste y la posición inicial en el núcleo de la fibra son aleatorias, se calcula el ángulo de salida respecto al plano en el que se encuentra la fibra óptica (plano xz). La dirección aleatoria se encuentra en el rango físico determinado por la apertura numérica de la fibra óptica. Para encontrar la dirección se usan dos ángulos directores, que determinarán la dirección del haz, el intervalo en el que existen estos ángulos tiene como valor mínimo 0 y como valor máximo:

$$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{NA}{n_e}\right) x_3 \quad (6)$$

Donde  $NA$  es la apertura numérica de la fibra óptica,  $n_e$  es el índice de refracción del elemento dieléctrico y  $x_3$  es un número aleatorio entre 0 y 1. De esta forma, el máximo valor que puede alcanzar el ángulo de salida se encuentra dentro de los límites físicos permitidos por la interacción de características entre la fibra óptica y el medio. El máximo ángulo permitido será:

$$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{NA}{n_e}\right) \quad (7)$$

Si la luz no se encuentra en este rango permisible, se reflejará y no pasará al elemento dieléctrico.

El segundo ángulo que determina la dirección del rayo se encuentra en un intervalo entre 0 y  $2\pi$ , por lo que se calcula de la siguiente forma, donde  $x_4$  es un número aleatorio entre 0 y 1:

$$\theta_i = 2\pi x_4 \quad (8)$$

El vector de dirección queda determinado de la siguiente forma:



$$X_i = \text{sen}\theta_i \cos\alpha_i \quad (9)$$

$$Y_i = \text{sen}\theta_i \text{sen}\alpha_i \quad (10)$$

$$Z_i = \cos\theta_i \quad (11)$$

Al tener el vector de posición y de dirección del rayo se puede obtener la ecuación vectorial de la recta que describe la dirección del haz, asimismo es fácil ver que la suma de estos dos dará un tercer vector. Cuando la norma de este tercer vector sea igual al radio de la fibra óptica, el rayo ha entonces interceptado la superficie del semicilindro dieléctrico. Expresado matemáticamente:

$$| \mathbf{a} + \mathbf{b}t |^2 = r^2 \quad (12)$$

Desarrollando la ecuación anterior se obtiene:

$$t^2 (b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) + 2 \cdot t \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + a_3 \cdot b_3) + (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) = r^2 \quad (13)$$

Al resolverla, se encuentra el valor de  $t$  para el cual el haz intersecta al elemento de detección y sustituyéndolo en la ecuación paramétrica de la recta se encuentra el punto de intersección.

$$\mathbf{p} = (a_1 + b_1 t, a_2 + b_2 t, a_3 + b_3 t) \quad (14)$$

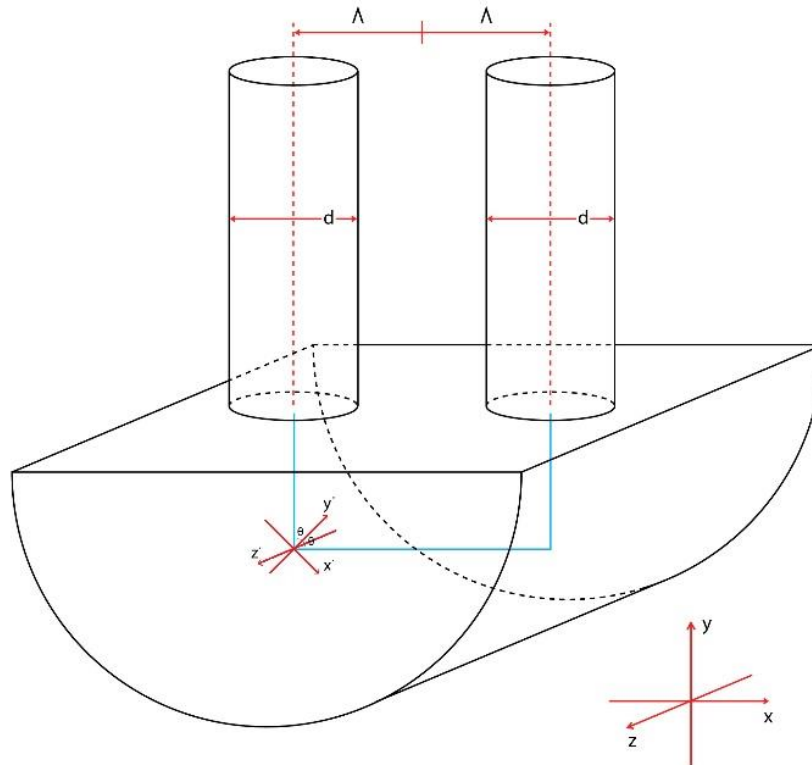


Figura 4.3. Intersección del rayo con la superficie externa del elemento de detección en forma de un semicilindro.

Siguiendo la línea de análisis vectorial presentada anteriormente, el ángulo de incidencia se puede calcular con el producto punto entre dos vectores: el que describe la dirección del haz y el normal a la superficie en el punto de intersección. El primero es uno conocido, y el segundo es un vector que conecta el centro del elemento con el punto, las componentes vectoriales en cada *dirección* (*xyz*) del vector normal, son las coordenadas del punto. Por lo que el ángulo de incidencia queda determinado por:

$$\alpha = \text{acos} \left( \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{p}}{\sqrt{|\mathbf{b}| \cdot |\mathbf{p}|}} \right) \quad (15)$$

En donde  $\mathbf{p}$  es el vector que conecta el centro de la elemento de detección con el punto de intersección (el vector normal a la superficie en el punto de intersección) y  $\mathbf{b}$  el vector de dirección del haz.

Así mismo, para poder determinar si el haz se refleja o se refracta, se debe de calcular el ángulo crítico, que es el ángulo máximo con el que puede incidir el rayo para que pueda reflejarse dentro del elemento de detección, de lo contrario se refracta. Éste ángulo está determinado por la siguiente relación:

$$\beta = \text{asin} \left( \frac{n_i}{n_e} \right) \quad (16)$$

Donde  $n_i$  es el índice de refracción del medio que rodea al elemento de detección y que a su vez varía en cada iteración del programa, y  $n_e$  el índice del material del elemento de detección.

Si el rayo se refleja, en cada reflexión tendrá una relación de potencia saliente diferente a la entrante, siempre menor, es decir, el haz sufre una atenuación en cada reflexión dentro del elemento de detección, la potencia reflejada tiene la siguiente relación con la incidente:

$$P_2 = P_1 R \quad (17)$$

En donde  $R$  es el coeficiente de reflexión entre los medios,  $P_2$  es la potencia saliente y  $P_1$  la incidente. De acuerdo con las fórmulas de Fresnel existen dos planos de reflexión: el de posición paralela  $R_{TM}$  al plano de polarización de la luz y el de posición perpendicular  $R_{TE}$  a éste mismo, descritos por las siguientes relaciones:

$$R_{TM} = \begin{cases} \frac{(n_2/n_1)^2 \cos \alpha - \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}}{(n_2/n_1)^2 \cos \alpha + \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}}, & \text{para } \alpha < \alpha_c \\ 1, & \text{para } \alpha > \alpha_c \end{cases} \quad (18)$$

$$R_{TE} = \begin{cases} \frac{\cos \alpha - \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}}{\cos \alpha + \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}}, & \text{para } \alpha < \alpha_c \\ 1, & \text{para } \alpha > \alpha_c \end{cases} \quad (19)$$

En donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del medio dieléctrico y el medio circundante respectivamente,  $\alpha$  es el ángulo de incidencia y  $\alpha_c$  es el ángulo crítico.

Para la luz polarizada, con ángulo  $\beta$  entre el plano de incidencia y el de polarización el coeficiente de reflexión es:

$$R = R_{TM} \cos^2 \beta + R_{TE} \sin^2 \beta \quad (20)$$

Para la luz no polarizada el coeficiente de reflexión es:

$$R = \frac{R_{TM} + R_{TE}}{2} \quad (21)$$

Se puede encontrar la dirección del rayo reflejado de la siguiente forma: Tomando la proyección del vector incidente sobre el vector normal a la superficie, y después restando 2 veces este resultado al vector incidente.

Para que se pueda verificar si el rayo entra en la fibra óptica se deben de cumplir básicamente dos condiciones: a) que el rayo intersecte la fibra receptora y b) que el ángulo de incidencia sea menor al ángulo crítico.

La comprobación de estas dos condiciones se realizó mediante el siguiente método. La ecuación del plano de la fibra óptica receptora en forma vectorial puede ser expresada de la siguiente forma:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (22)$$

En donde  $\mathbf{n}$  es el vector normal al plano y  $\mathbf{p}_0$  es un punto en el plano. La ecuación vectorial de una recta es:

$$\mathbf{p} = d\mathbf{l} + \mathbf{l}_0 \quad (23)$$

En donde  $\mathbf{l}$  es el vector de dirección de la línea y  $\mathbf{l}_0$  es un punto de la línea. Substituyendo en la ecuación del plano se obtiene:

$$(dl + l_0 - p_0) \cdot n = 0 \quad (24)$$

Distribuyendo  $n$  se obtiene:

$$dl \cdot n + (l_0 - p_0) \cdot n = 0 \quad (25)$$

Resolviendo para  $d$  se obtiene:

$$d = \frac{(p_0 - l_0) \cdot n}{l \cdot n} \quad (26)$$

Con el valor de  $d$ , se sustituye en la ecuación de la recta y se encuentra el punto en el que la recta intersecta con el plano de la fibra óptica receptora. Finalmente se calcula la distancia entre el punto de intersección y el centro de la fibra, si es menor al radio de ésta, el rayo pudo haber entrado a la fibra.

Para finalmente comprobar que el rayo entró en la fibra, se calcula el ángulo de entrada, de una forma análoga a como se hizo para determinar si el rayo se reflejaba o refractaba en la superficie dieléctrica.

Se calcula el ángulo entre el vector de dirección de la recta y el vector normal al plano de la fibra óptica, y si es menor al ángulo crítico de entrada, entonces el rayo entró a la fibra y se almacena la potencia de entrada en un arreglo.

El modelo matemático fue implementado en forma de un programa de cálculo en Visual Basic. Los resultados del trazado de rayos se muestran en la figura 4.4

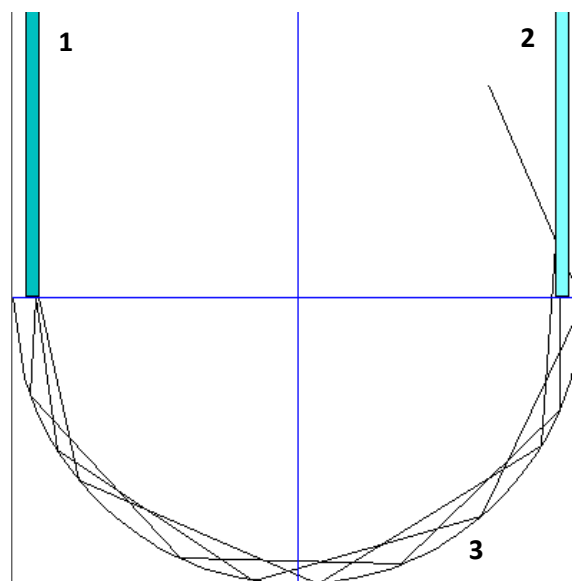


Figura 4.4. Resultados del trazado de rayos en un elemento semicilíndrico, en su plano transversal. 1. Fibra óptica transmisora, 2. Fibra óptica receptora, 3. Elemento de detección.

#### 4.4. Investigación de las características básicas de los sensores refractométricos basados en la alteración de la reflexión interna en un elemento de detección óptico de forma semicilíndrica (con luz no polarizada).

El análisis se realizó con el modelo matemático, algoritmo y programa de cálculo descritos en [1], utilizando 100,000 rayos, para diferentes parámetros de las fibras ópticas y del elemento transductor.

Los parámetros de simulación para obtener la respuesta del sensor con respecto a la posición relativa de las fibras son los siguientes:

1. Elemento de detección sólido de PMMA
2. Índice de refracción del elemento:  $n_{\text{elemento}}=1.4952$
3. Radio adimensional de las fibras transmisora y receptora:  $\phi_1= \phi_2=0.052$
4. Apertura numérica de las fibras:  $NA_1=NA_2=0.5$
5. Luz no polarizada

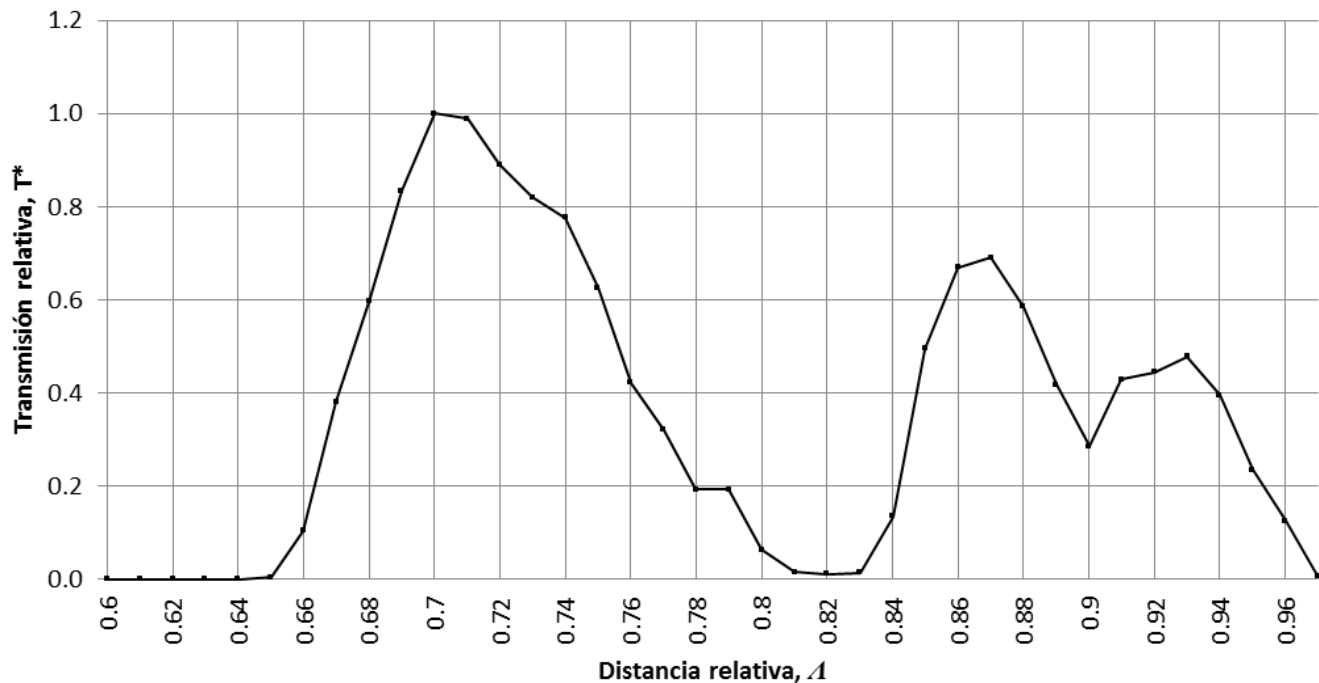


Figura 4.5. Transmisión relativa teórica, vs distancia relativa  $\Delta$  bajo  $n_{\text{elemento}}=1.4952$ ,  $\phi_1= \phi_2=0.052$ ,  $NA_1=NA_2=0.5$ .

Al observar la gráfica 4.5 podemos observar que las posiciones en las que hay mayor transmisión es cuando ambas están a una distancia relativa del elemento de  $\Delta=0.7$ ,  $0.87$  y

0.93, razón por la cual se seleccionaran dichas posiciones para realizar los siguientes estudios numéricos.

Se realizó una simulación numérica para determinar el rango de índices de refracción que el sensor puede detectar en las posiciones relativas en las cuales la fibra óptica transmisora y receptora están acopladas ( $\Lambda=0.7, 0.87$  y  $0.93$ ), el resultado de la misma se muestra en la figura 4.6.

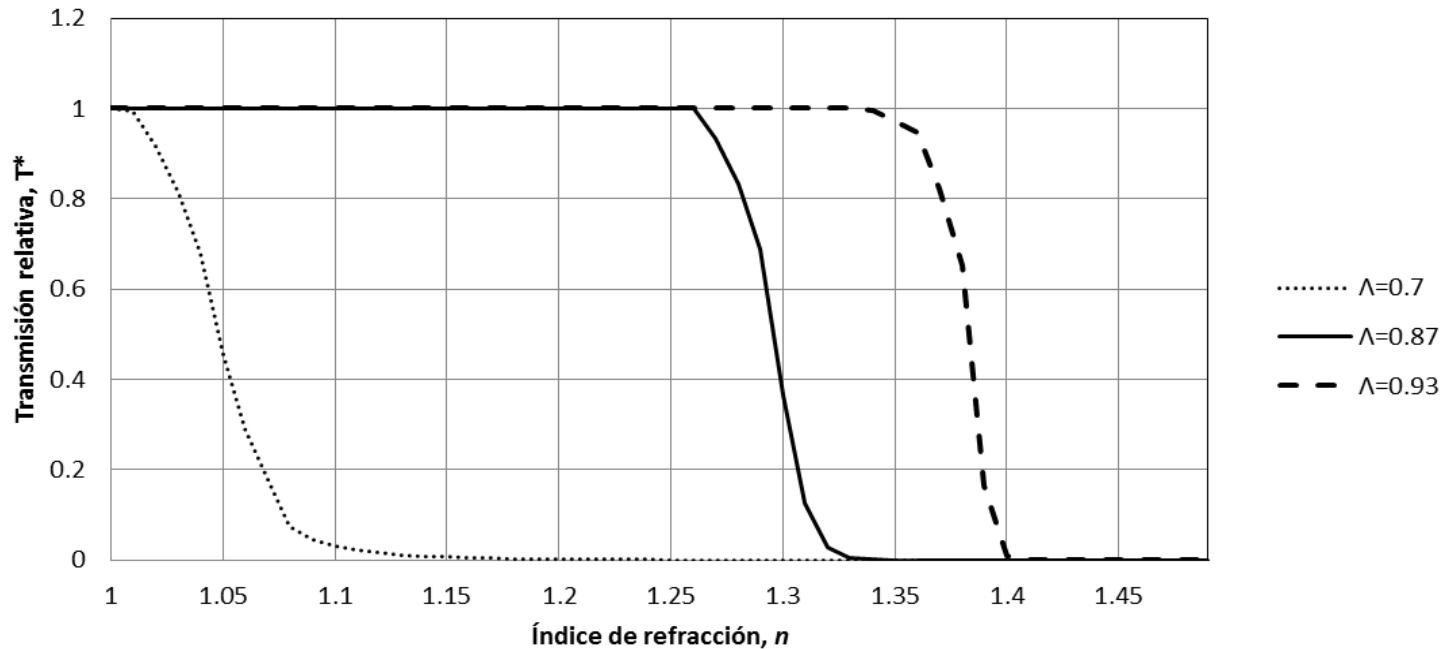


Figura 4.6. Transmisión relativa teórica, vs índice de refracción externo,  $n_{\text{elemento}}=1.4952$ ,  $\phi_1 = \phi_2=0.052$ ,  $NA_1=NA_2=0.5$ .

Como podemos observar en la figura 4.4 la posición de las fibras ópticas determina el rango de índices de refracción que puede detectar el elemento semicilíndrico. La tabla 4.1 muestra los rangos de índice de refracción para las diferentes posiciones relativas de las fibras ópticas en el elemento de detección semicilíndrico, el nivel mínimo es el nivel en el cual la intensidad relativa del sensor es el 90% de la intensidad máxima, mientras que el nivel máximo es el nivel en el cual la intensidad relativa es el 10% de la intensidad máxima.

Tabla 4.1 Respuesta del sensor al índice de refracción externo

Posición relativa de las fibras ópticas $\Lambda$	Rango de detección del elemento	
	$n_{\min}$	$n_{\max}$
0.7	1.02100	1.07400
0.87	1.268	1.312
0.93	1.351	1.396

De la tabla 4.1 podemos determinar que la posición de las fibras ópticas  $\Lambda=0.93$  nos permite caracterizar algunos líquidos que tengan índices de refracción entre 1.351 y 1.396, mientras que la posición de  $\Lambda=0.87$  es conveniente para diseñar un sensor de detección de líquido sin estudiar las características particulares del mismo, es decir de forma discreta y por último la posición de  $\Lambda=0.7$  se puede utilizar para determinar la presencia de algún componente en su fase líquida con índices de refracción bajos, como el Helio líquido, sin embargo esta posición no nos sirve para discriminar entre diferentes gases o detectar la presencia de los mismos ya que el cambio de índice de refracción en los gases es del orden de 0.001 unidades de índice de refracción y la respuesta del sensor en ese rango es la máxima.

#### **4.5. Investigación de las características básicas de los sensores refractométricos basados en la alteración de la reflexión interna en un elemento de detección óptico hueco de forma semicilíndrica (con luz no polarizada).**

El elemento de detección de forma semicilíndrica sólido considerado en la sección anterior del trabajo ocupa un gran volumen, sin embargo como se puede observar en la figura 4.4 de trazado de rayos, los rayos se propagan muy cerca de la superficie externa al elemento de detección, por lo que gran parte de la zona interior del elemento no participa en el proceso de sensado y desde este punto de vista es inútil, por esta razón es de nuestro interés investigar la posibilidad de usar un elemento semicilíndrico hueco para disminuir la masa y el costo del elemento de detección.

El software SRFO no permite simular este tipo de estructuras, así que la simulación se realizó utilizando el software comercial TracePro.

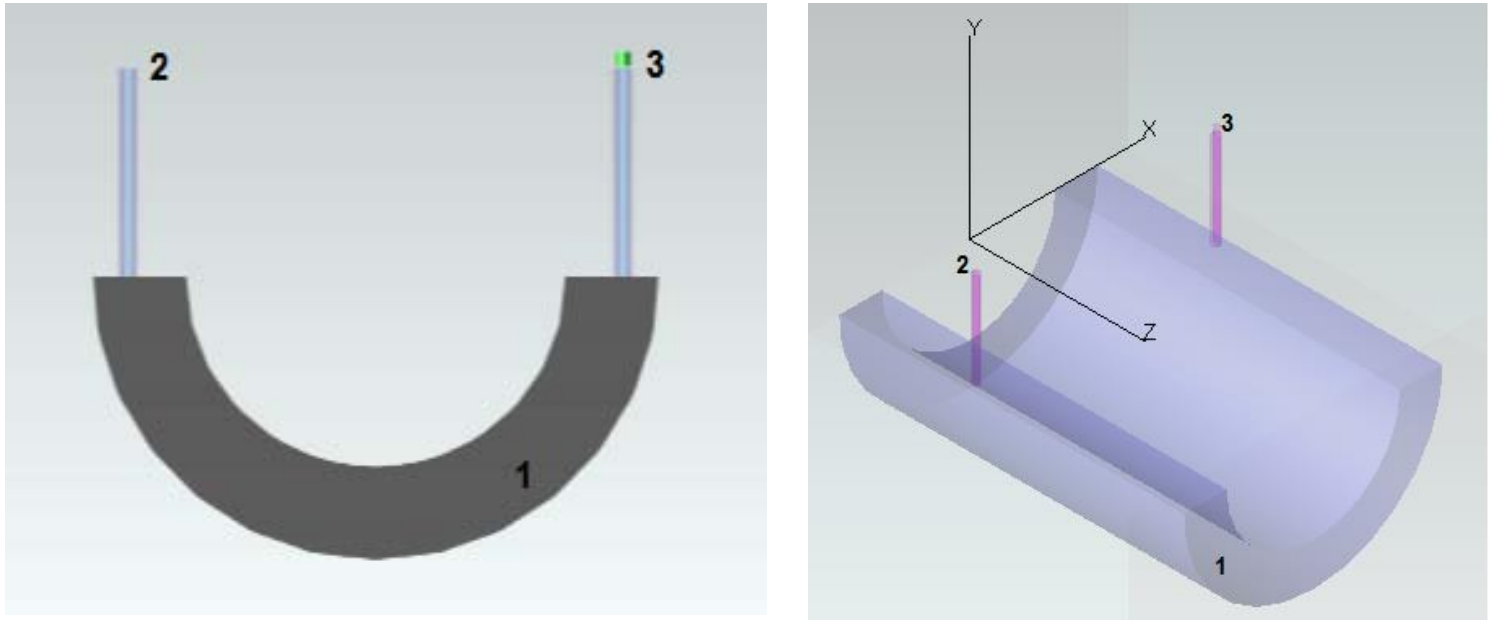


Figura 4.7. Sensor refractométrico con elemento transductor hueco de dieléctrico transparente (vista axial-lado izquierdo) (vista aérea-lado derecho). 1 - Elemento transductor; 2, 3 - fibra óptica de entrada y salida, respectivamente.

Los resultados de la respuesta al sensor, bajo diferentes posiciones simétricas de las fibras ópticas transmisora y receptora, cuando este está rodeado por aire se muestra en la figura 4.8.

Los parámetros de simulación para obtener la respuesta del sensor con respecto a la posición relativa de las fibras son los siguientes:

1. Elemento de detección hueco de PMMA
2. Índice de refracción del elemento:  $n_{\text{elemento}}=1.4952$
3. Radio adimensional de las fibras transmisora y receptora:  $\phi_1 = \phi_2=0.052$
4. Apertura numérica de las fibras:  $NA_1=NA_2=0.5$
5. Luz no polarizada



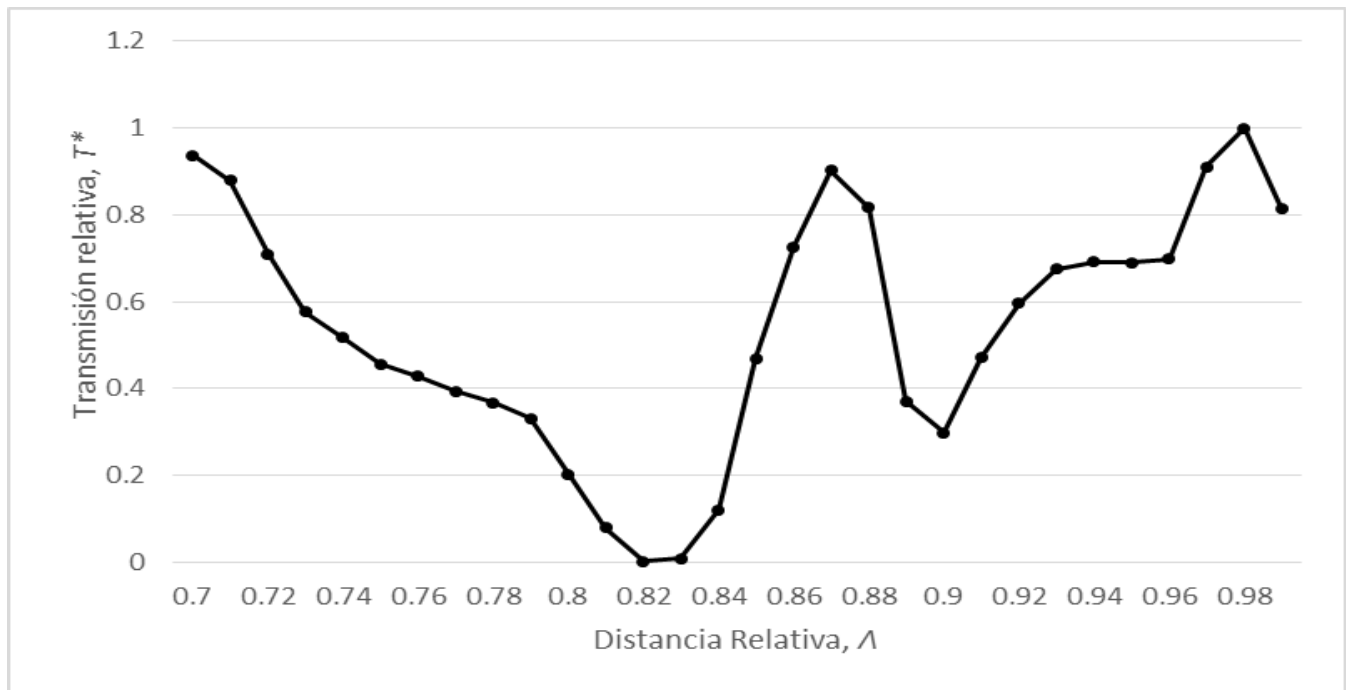


Figura 4.8. Transmisión relativa teórica, vs distancia relativa de las fibras,  $\Lambda$ ,  $n_{\text{elemento}}=1.4952$ ,  $\phi_1=\phi_2=0.052$ ,  $NA_1=NA_2=0.5$ .

En la figura 4.8 se puede observar que el acoplamiento de las fibras ópticas se tiene cuando la distancia relativa con respecto al centro del elemento es  $\Lambda=0.7$ ,  $\Lambda=0.87$ ,  $\Lambda=0.93$  y  $\Lambda=0.98$ .

#### 4.6. Efecto de desalineamiento y parámetros desiguales de las fibras ópticas en el sensor.

El objetivo de este estudio es encontrar los efectos del desalineamiento de las fibras ópticas con respecto al plano de simetría del elemento de detección. A continuación se presentan 2 casos diferentes: A) Efecto de variación de la apertura numérica de la fibra transmisora y B) Efecto de desalineamiento de las fibras ópticas con respecto al plano de simetría del sensor.

##### A) Efecto de variación de la apertura numérica de la fibra transmisora.

La variación de la apertura numérica de una fibra puede ser por imperfecciones de la tecnología de la fabricación de la fibra óptica, diferentes longitudes de fibra o de diferentes proveedores pueden tener NA diferente, además el otro factor es que en el caso de una fibra relativamente corta las características de la fuente y detalles de acoplamiento pueden tener efecto en el cono de salida de la radiación de la fibra óptica (longitud de equilibrio de los modos) y por eso es de un interés teórico y práctico investigar estos efectos.

### A1. Acoplamiento entre la fibra transmisora y receptora.

Los parámetros de simulación para obtener la respuesta del sensor con respecto a la apertura numérica de la fibra óptica transmisora son los siguientes:

1. Elemento de detección sólido de PMMA
2. Índice de refracción del elemento:  $n_{\text{elemento}}=1.4952$ ,
3. Radio adimensional de las fibras transmisora y receptora:  $\phi_1= \phi_2=0.052$ ,
4. Apertura numérica de la fibra receptora:  $NA_2=0.5$ ,
5. Luz no polarizada

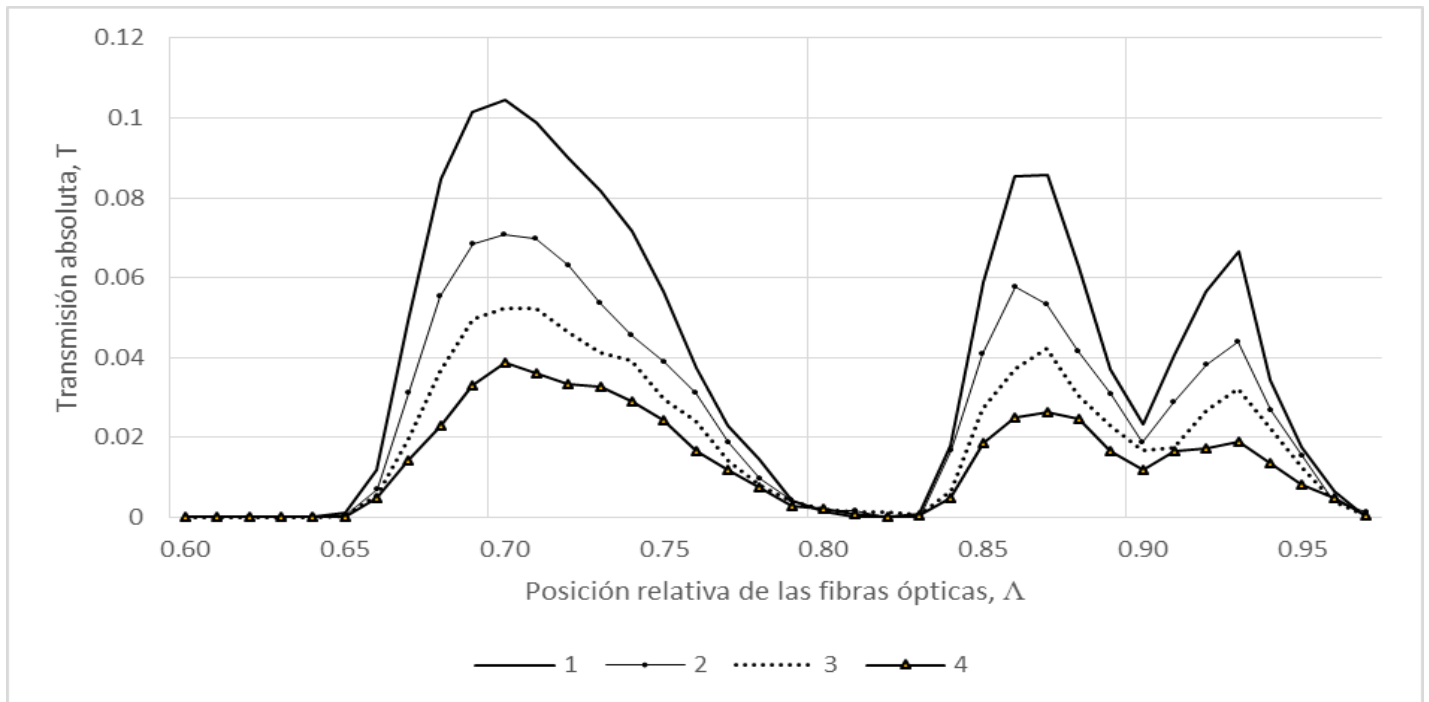


Figura 4.9. Transmisión absoluta\* vs. Posición relativa de las fibras ópticas,  $\Delta$ ,  $AN_2=0.5$ ,  $\phi_1=\phi_2=0.052$ , (1)  $AN_1=0.2$ , (2)  $AN_1=0.3$ , (3)  $AN_1=0.4$ , (4)  $AN_1=0.5$

La figura 4.9 nos muestra que si la apertura numérica de la fibra óptica transmisora es menor, la intensidad en la fibra óptica receptora es mayor, sin embargo las posiciones en las cuales están acopladas con respecto al centro del elemento de detección, siguen siendo las mismas.

A1. Respuesta del sensor al índice de refracción cuando  $\Lambda_1=\Lambda_2=0.7$

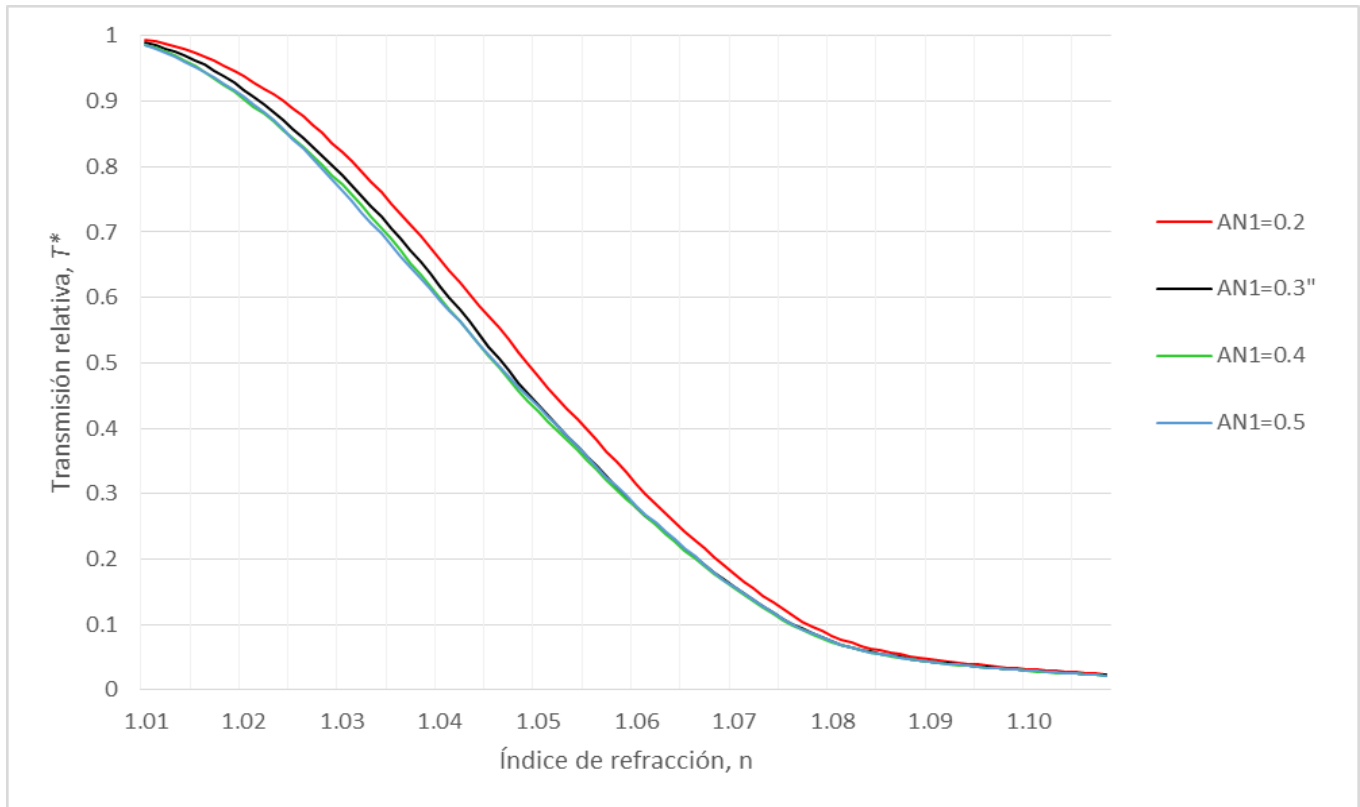


Figura 4.10. Transmisión absoluta\* vs. Índice de refracción,  $n$ ,  $\Lambda_1=\Lambda_2=0.7$ ,  $AN_2=0.5$ ,  $\phi_1=\phi_2=0.052$ .

La figura 4.10 muestra que la respuesta del sensor al índice de refracción cuando las fibras ópticas están en la posición relativa  $\Lambda=0.7$ , el efecto de la apertura numérica de la fibra óptica transmisora es casi igual para  $AN_1=0.3$ ,  $AN_1=0.4$ , y  $AN_1=0.5$ , mientras que cuando la apertura numérica de la fibra es 0.2 hay un cambio máximo en la transmisión relativa,  $T^*$  de hasta 0.0655, para el índice de refracción 1.037.

A2. Respuesta del sensor al índice de refracción cuando  $\Lambda_1=\Lambda_2=0.87$

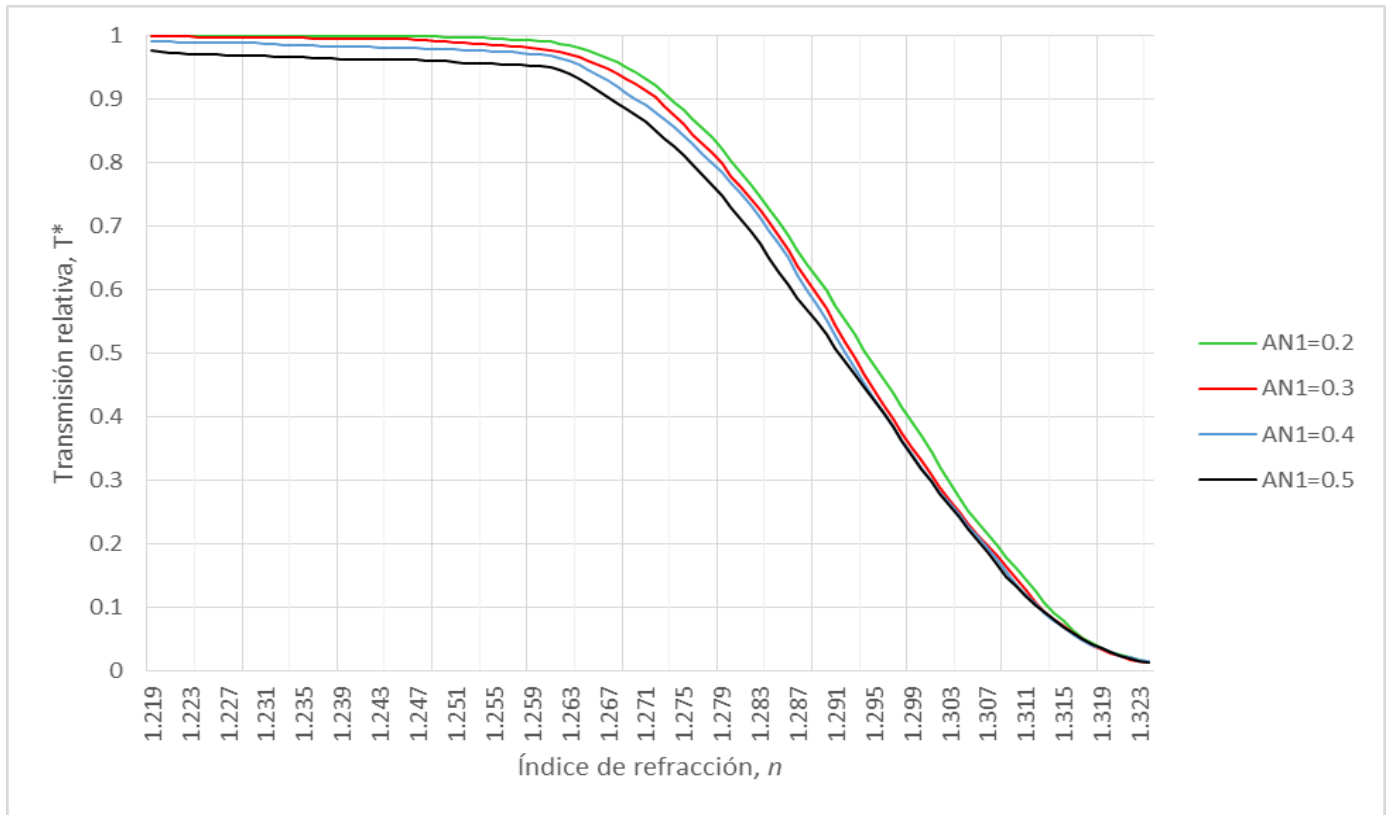


Figura 4.11. Transmisión absoluta\* vs. Índice de refracción,  $n$ ,  $\Lambda_1=\Lambda_2=0.87$ ,  $AN_2=0.5$ ,  $\phi_1=\phi_2=0.052$ .

La figura 4.11 muestra que la respuesta del sensor al índice de refracción cuando las fibras ópticas están en la posición relativa  $\Lambda=0.87$ , el efecto de la apertura numérica de la fibra óptica transmisora es casi igual para  $AN_1=0.3$ ,  $AN_1=0.4$ , mientras que cuando la apertura numérica de la fibra es  $AN_1=0.2$  y  $AN_1=0.5$ , existe una máxima deferencia de la transmisión relativa,  $T^*$  de hasta 0.0778, para el índice de refracción 1.285.

A3. Respuesta del sensor al índice de refracción cuando  $\Lambda_1=\Lambda_2=0.93$

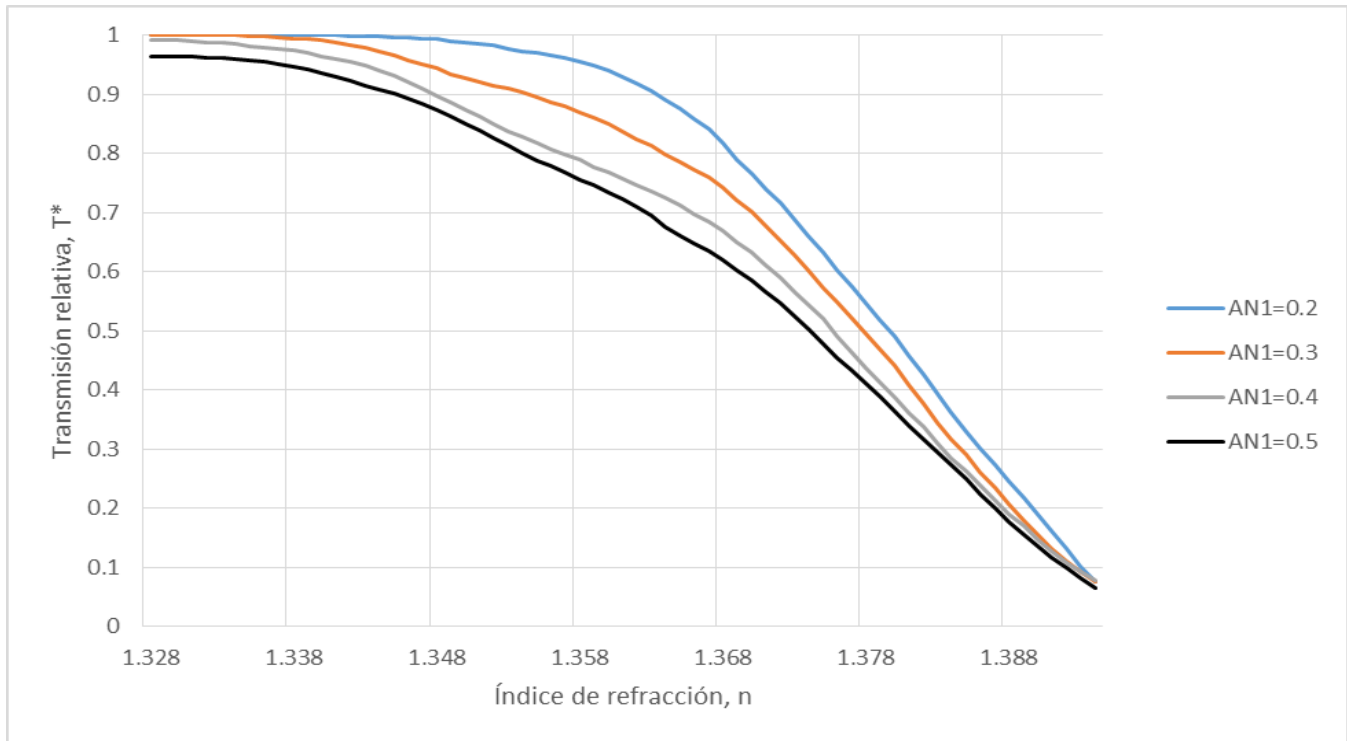


Figura 4.12. Transmisión absoluta\* vs. Índice de refracción, n,  $\Lambda_1=\Lambda_2=0.93$ ,  $AN_2=0.5$ ,  $\phi_1=\phi_2=0.052$ .

La figura 4.12 muestra que la respuesta del sensor al índice de refracción cuando las fibras ópticas están en la posición relativa  $\Lambda=0.93$ , el efecto de la apertura numérica de la fibra óptica transmisora cambia considerablemente, existe una máxima deferencia de la transmisión relativa,  $T^*$  de hasta 0.214, para el índice de refracción 1.364.

B) Efecto de fibras no simétricas

La posición no simétrica de las fibras corresponde a un caso más general de ubicación de las fibras, esto puede ocurrir por errores tecnológicos de fabricación del sensor o con el propósito para obtener características particulares de transmisión.

1. Elemento de detección sólido de PMMA
2. Índice de refracción del elemento:  $n_{\text{elemento}}=1.4952$ ,
3. Radio adimensional de las fibras transmisora y receptora:  $\phi_1= \phi_2=0.052$ ,
4. Apertura numérica de las fibras:  $NA_1=NA_2=0.5$
5. Posición relativa de la fibra óptica transmisora  $\Lambda_1=0.92$
6. Posición relativa de la fibra óptica receptora  $\Lambda_2=0.8-0.92$
7. Luz no polarizada

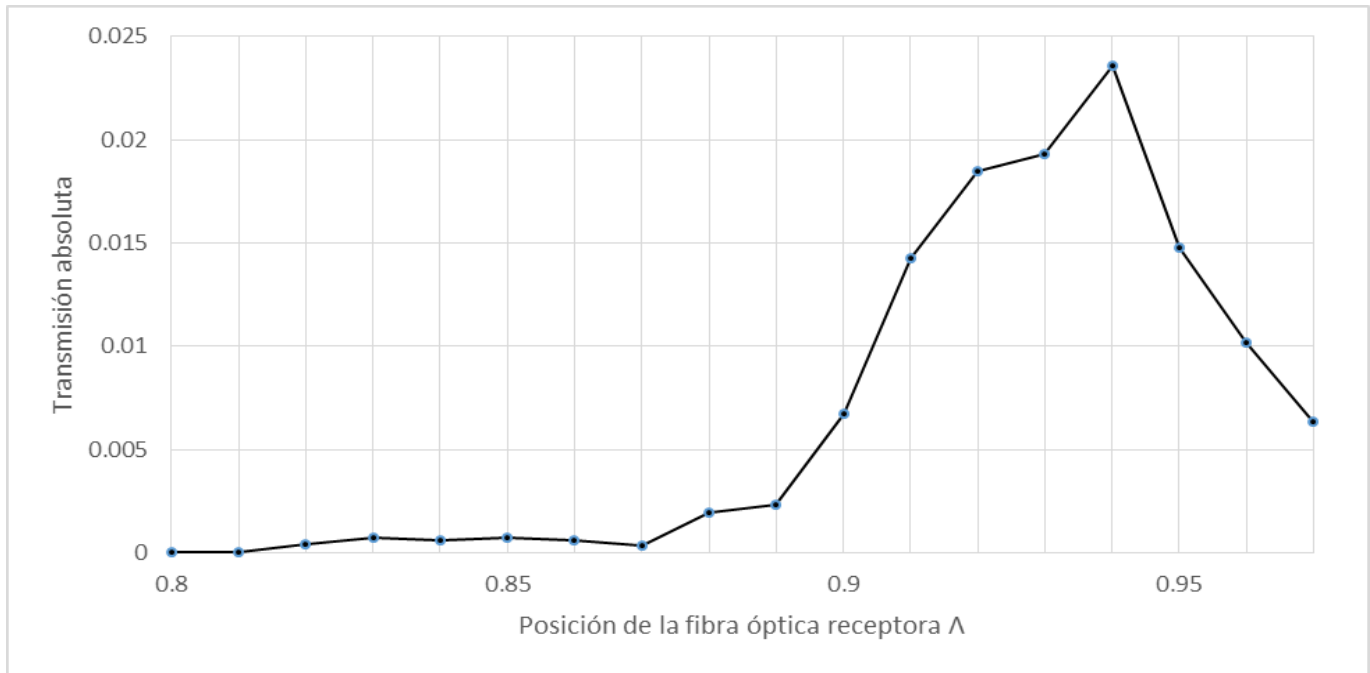


Figura 4.13. Transmisión absoluta\* vs. Posición relativa de las fibra óptica receptora,  $\Lambda_2$ ,  $AN_1=AN_2=0.5$ ,  $\phi_1=\phi_2=0.052$ ,  $\Lambda_1=0.92$

En la figura 4.13 anterior se observa que existe un mejor acoplamiento de las fibras ópticas cuando éstas no son simétricas con respecto a cuándo ambas están en la misma posición, la intensidad máxima se obtuvo cuando la fibra óptica transmisora se posicionó en  $\Lambda=0.92$ , mientras que la fibra receptora en  $\Lambda=0.94$ .

#### 4.7. Efecto de ubicación de las fibras en zonas de bajo acoplamiento

La ubicación de las fibras ópticas en zonas de bajo acoplamiento normalmente no se considera como algo útil debido a las altas pérdidas y señales de baja intensidad que se obtienen, sin embargo esta opción merece ser investigada ya que puede ofrecer características diferentes a las que se obtienen en las zonas de mayor acoplamiento en el sentido del índice de refracción externo.

El objetivo de estas simulaciones es realizar un estudio del posicionamiento de las fibras ópticas en zonas en donde el acoplamiento entre ambas no sea máximo y estudiar la respuesta del sensor al índice de refracción en estas zonas.

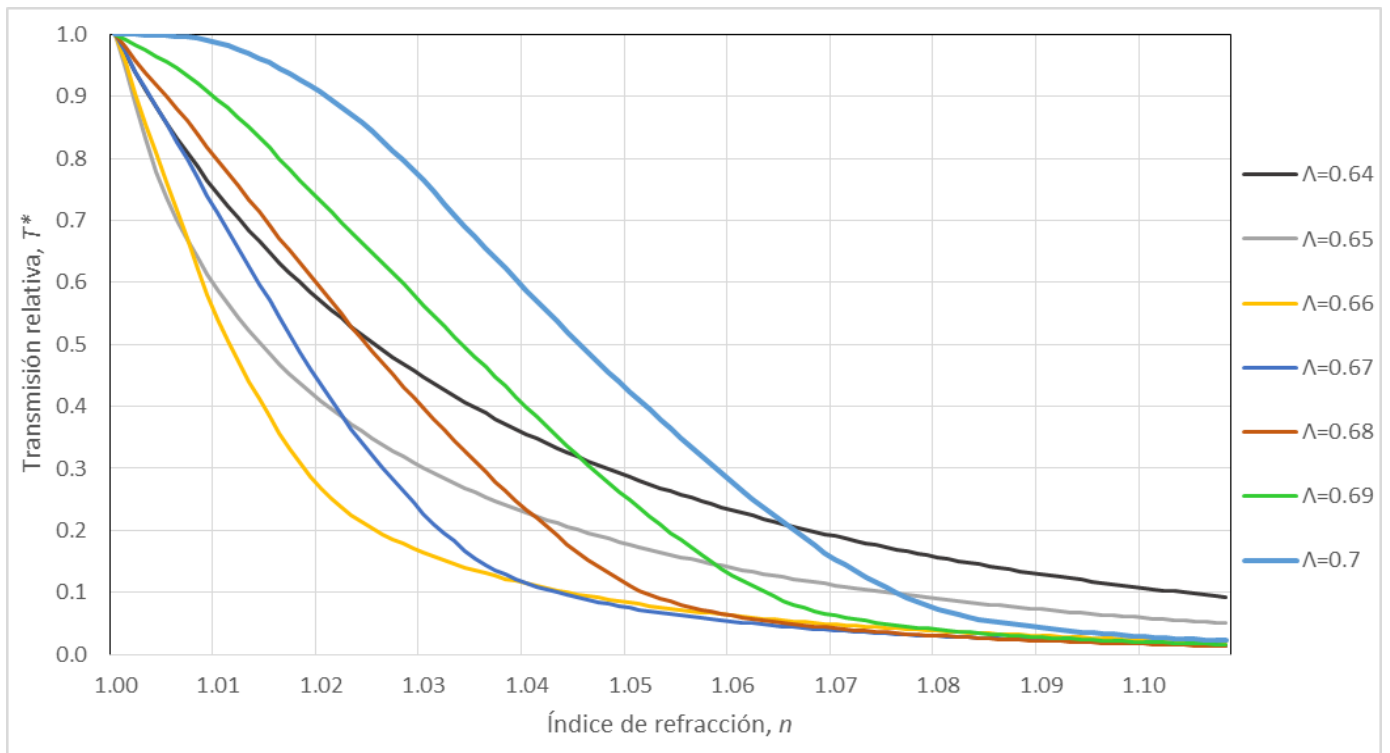


Figura 4.14. Transmisión absoluta\* vs. Índice de refracción,  $n$ ,  $AN_1=AN_2=0.5$ ,  $\varphi_1=\varphi_2=0.052$ ,  $\Lambda=0.64$  a  $\Lambda=0.70$

La figura 4.14 muestra la respuesta del sensor con las fibras ópticas posicionadas desde  $\Lambda=0.64$  hasta  $\Lambda=0.70$ , la figura nos muestra que en estas posiciones el sensor responde a índices de refracción entre 1 y 1.1, el análisis de la sensibilidad del sensor y del rango de índices de refracción para cada posición de las fibras se muestra en el Anexo 1.

La figura 4.15 muestra la respuesta del sensor con las fibras ópticas posicionadas desde  $\Lambda=0.71$  hasta  $\Lambda=0.75$ , la figura nos muestra que en estas posiciones el sensor responde a índices de refracción entre 1.02 y 1.13, la figura 4.16 muestra la respuesta del sensor con las fibras ópticas posicionadas desde  $\Lambda=0.76$  hasta  $\Lambda=0.82$ , la figura nos muestra que en estas posiciones el sensor responde a índices de refracción entre 1.05 y 1.20, la figura 4.17 muestra la respuesta del sensor con las fibras ópticas posicionadas desde  $\Lambda=0.83$  hasta  $\Lambda=0.89$ , la figura nos muestra que en estas posiciones el sensor responde a índices de refracción entre 1.18 y 1.34, la figura 4.18 muestra la respuesta del sensor con las fibras ópticas posicionadas desde  $\Lambda=0.90$  hasta  $\Lambda=0.95$ , la figura nos muestra que en estas posiciones el sensor responde a índices de refracción entre 1.28 y 1.39.

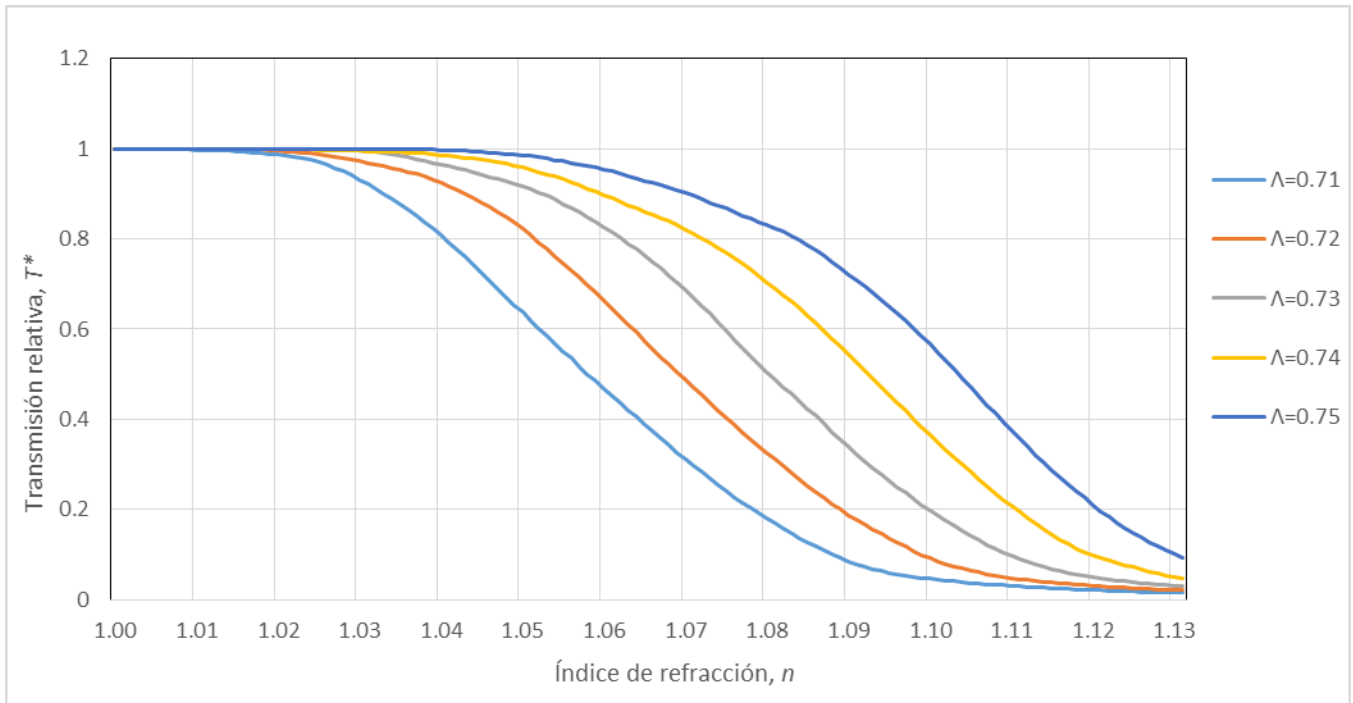


Figura 4.15. Transmisión absoluta\* vs. Índice de refracción,  $n$ ,  $AN_1=AN_2=0.5$ ,  $\varphi_1=\varphi_2=0.052$ ,  $\Lambda=0.71$  a  $\Lambda=0.75$

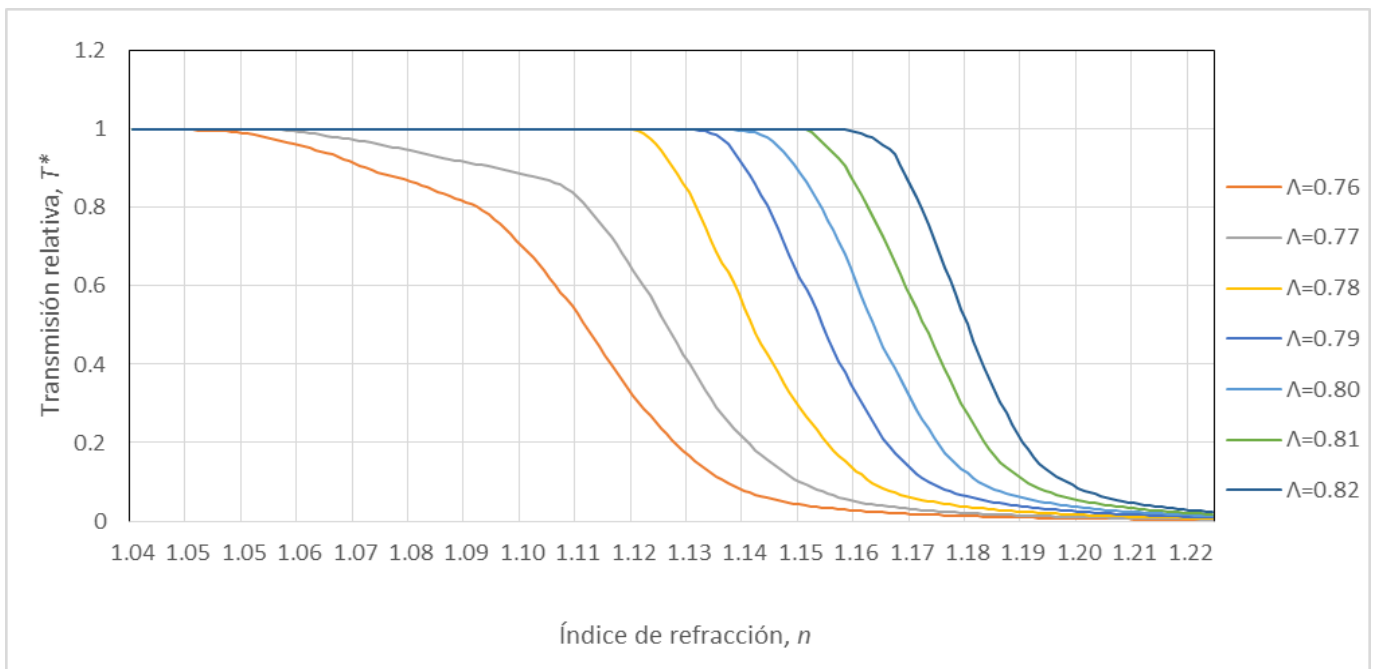


Figura 4.16. Transmisión absoluta\* vs. Índice de refracción,  $n$ ,  $AN_1=AN_2=0.5$ ,  $\varphi_1=\varphi_2=0.052$ ,  $\Lambda=0.76$  a  $\Lambda=0.82$



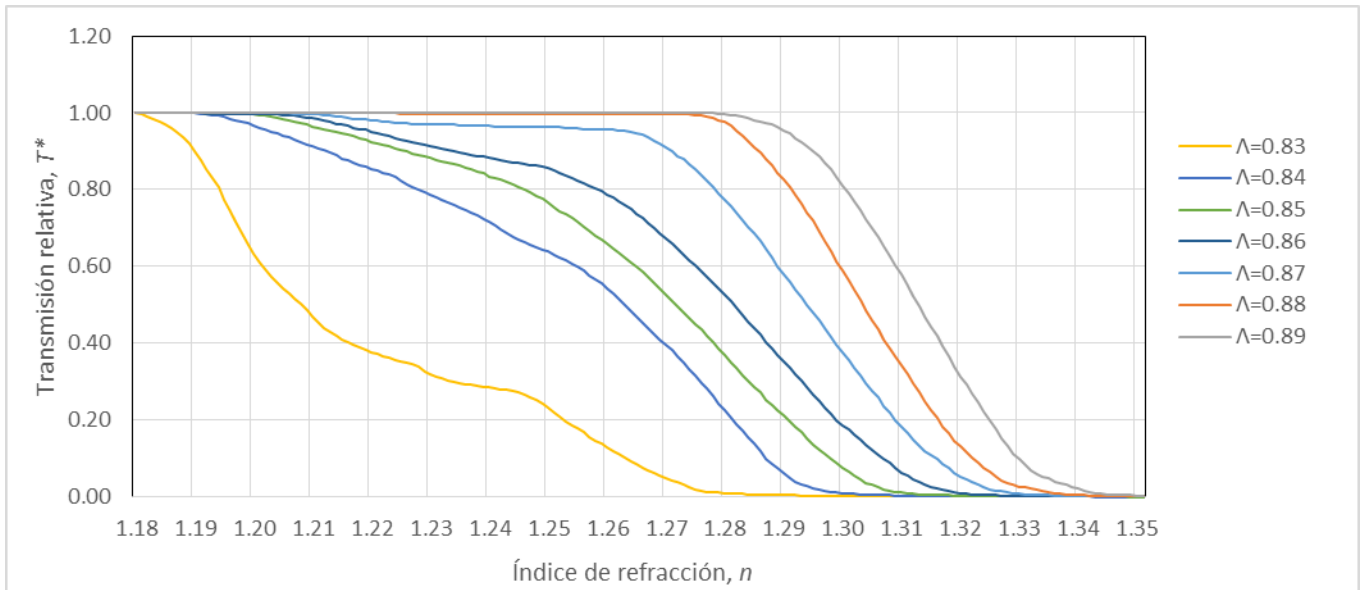


Figura 4.17. Transmisión absoluta\* vs. Índice de refracción,  $n$ ,  $AN_1=AN_2=0.5$ ,  $\varphi_1=\varphi_2=0.052$ ,  $\Lambda=0.83$  a  $\Lambda=0.89$

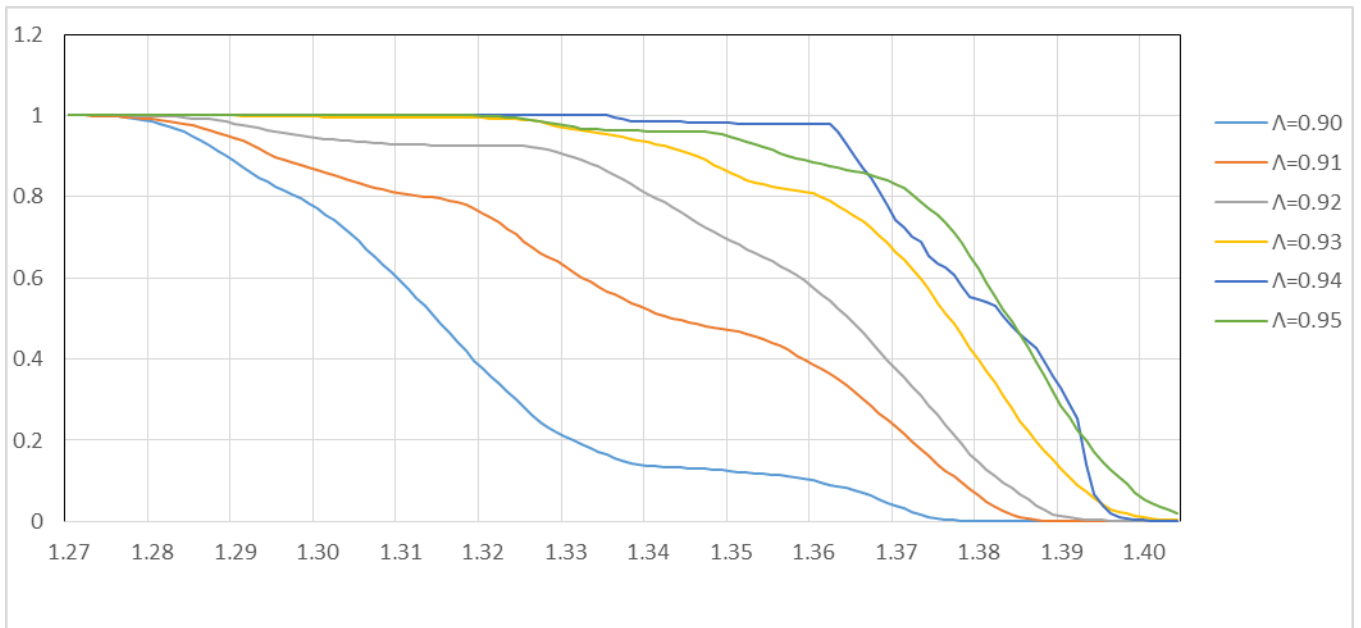


Figura 4.18. Transmisión absoluta\* vs. Índice de refracción,  $n$ ,  $AN_1=AN_2=0.5$ ,  $\varphi_1=\varphi_2=0.052$ ,  $\Lambda=0.90$  a  $\Lambda=0.95$

Se realizó el procesamiento de los resultados de simulaciones que están mostrados en forma de gráficas en las figuras 4.14-4.18 con la finalidad de encontrar las respectivas ecuaciones analíticas que aproximan las funciones y luego se obtuvo el rango de índices de refracción considerando el valor  $n_{\min}$  como el valor en el cual la intensidad es igual o mayor al 10% de su

intensidad máxima y  $n_{\max}$  como el valor en el cual la intensidad es igual o menor al 90% de su intensidad máxima y por último se obtuvo  $\Delta n$  como la diferencia entre  $n_{\max} - n_{\min}$ . Las tablas se encuentran en el anexo 1. Las ecuaciones que describen el comportamiento del sensor tienen una sensibilidad diferente para cada posición de las fibras ópticas, en todos los casos en el intervalo desde  $\Lambda=0.64$  y hasta  $\Lambda=0.95$  la respuesta del sensor pudo ser descrita con una ecuación lineal con coeficiente de determinación superior a  $R^2=0.8442$  para la posición de  $\Lambda=0.65$  llegando a alcanzar un coeficiente de determinación de  $R^2=0.9989$  para la posición de  $\Lambda=0.89$ .

Cada posición de las fibras detecta un rango de longitudes de onda diferentes, este rango tiene una tendencia de modificarse hacia índices de refracción altos conforme las fibras ópticas se van alejando del centro del elemento de detección.

#### 4.8. Conclusiones

1. El estudio de la transmisión relativa  $T^*$  de un elemento de detección semicilíndrico sólido en función de la posición simétrica de las fibras (parámetro  $\Lambda$ ) mostró la existencia de zonas de mayor acoplamiento separadas por zonas de ausencia o una notable disminución de acoplamiento. Las zonas de máximo acoplamiento (transmisión relativa  $T^*$ ) corresponden a las posiciones de  $\Lambda=0.7$ ,  $\Lambda=0.87$  y  $\Lambda=0.93$ . La ausencia de acoplamiento corresponde a las posiciones de  $\Lambda=0.82$ . La segunda y la tercera zona de acoplamiento (transmisión) convergen o se unen y por esto en una posición de  $\Lambda=0.9$  el acoplamiento no desaparece por completo, aunque aparece un pronunciado mínimo. Las zonas tienen un ancho finito y este depende de parámetros de las fibras ópticas como es radio y apertura numérica.
2. El parámetro  $\Lambda$  tiene efecto significativo sobre la respuesta del sensor al índice de refracción externo, La tendencia general es que a menor  $\Lambda$  hay un desplazamiento de la característica  $T^*(n)$  a una región de índices de refracción  $n$  menores y viceversa (a mayor  $\Lambda$  el escalón de la característica  $T^*(n)$  se desplaza a mayores regiones de  $n$ ). Mas específicamente, bajo  $\Lambda=0.7$ , el sensor es capaz de medir índices de refracción externos en el rango de  $n=1.02$  a  $n=1.07$ ; este rango de índices de refracción corresponde a líquidos criogénicos en particular helio líquido cuyo índice de refracción es  $n=1.026$ ;  $\Lambda=0.87$  permite medir índices en el rango de  $n=1.26$  a  $n=1.31$  como el Hexafluoroisopropanol (HFIP) de  $n=1.275$  y  $\Lambda=0.93$ , permite la caracterización de varias soluciones acuosas, medición de salinidad de agua, etc.
3. Bajo una selección adecuada de los parámetros ópticos y geométricos del sensor se pueden modificar estos rangos, así como cambiar el gradiente de la respuesta escalón.

4. Los elementos semicilíndricos huecos demuestran la misma estructura de zonas de acoplamiento, pero el comportamiento de la transmisión relativa  $T^*$  vs  $\Lambda$  es más complejo debido a las reflexiones internas de otra superficie, ya que las dos superficies de semicilindro hueco forman el canal de propagación de la luz.
5. El estudio de efecto de variación de algunos parámetros geométricos y ópticos del sensor demostró lo siguiente:
  - a) El aumento de la apertura numérica (AN1) de la fibra transmisora, cuando la apertura numérica de la fibra receptora se mantiene fijo, demostró que a medida que aumenta AN1 el acoplamiento disminuye, aunque la estructura de las zonas de transmisión respecto a  $\Lambda$  se mantiene y no sufre ningún cambio significativo.
  - b) El efecto de AN1 con respecto a las zonas de acoplamiento es significativo para la 3er zona de  $\Lambda=0.93$  ya que la pendiente cambia considerablemente mientras que para  $\Lambda=0.7$  y  $\Lambda=0.87$  la respuesta en transmisión vs  $\Lambda$  se mantiene la misma.
6. En un estudio de efecto de la posición no simétrica de las fibras para la 3er zona de acoplamiento  $\Lambda_1=0.93$ , se observó un mejor acoplamiento cuando  $\Lambda_2=0.95$ , cercano a la zona de transmisión, este es un efecto de alto orden que se puede deber al efecto de traslape de las aperturas numéricas de las fibras ópticas transmisora y receptora.
7. Las zonas de bajo acoplamiento presentan interesantes opciones de modificación de la respuesta del sensor al índice externo de refracción; estas opciones son útiles para la refractometría de líquidos de índice muy bajo; estas singularidades de trabajo en zonas de bajo acoplamiento fueron desconocidos anteriormente.

#### 4.9. Referencias del capítulo 4

- [1] K. Khotiaintsev, "Desarrollo de una aplicación de simulación numérica de sensores refractométricos en fibras ópticas," Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Puebla, México, 2005.
- [2] V. Svirid, S. Khotiaintsev, and P. L. Swart, "Mathematical Modeling of Optical-Fiber Refractometric Device," *Recent Advances in Simulation, Computational Methods and Soft Computing, Electrical and Computing Eng. Series*, pp. 134-139, 2002.
- [3] S. Khotiaintsev, S. Pérez-García, A. Beltrán-Hernández, and E. Llanito-Caudillo, "Plastic optical fiber multipoint liquid-level sensor with single semi-cylindrical detection element" 2nd Workshop on speciality optical fibers and their applications (WSOF-2), 2010.

## **Capítulo 5. Estudio teórico sobre los efectos de polarización de la luz en sensores refractométricos con elementos transductores ópticos de forma semicilíndrica (luz polarizada linealmente)**

### **5.1. Introducción**

El estado de polarización de la luz tiene efecto significativo sobre la reflexión (y transmisión de la luz), el comportamiento es bastante complejo y varios libros de texto dedican un análisis de reflexión de la luz en medios dieléctricos, para descripciones simples se pueden revisar las siguientes referencias [1-2]; sin embargo en configuraciones particulares como el sensor estudiado en la presente tesis, los efectos de polarización en sensores de tipo intensidad no fueron investigados anteriormente, el presente estudio nos interesa para modificar la respuesta del sensor.

### **5.2. Análisis teórico de la propagación de la luz y propiedades ópticas refractométricas con luz polarizada con elemento de detección semicilíndrico.**

El análisis teórico de la propagación de la luz polarizada lineal y propiedades ópticas refractométricas se desarrolló utilizando el software de trazado de rayos TracePro, el software es un programa comercial que utiliza óptica geométrica en modelos sólidos. El software permite que cada rayo sea analizado bajo los efectos de absorción, reflexión, refracción, difracción y esparcimiento cuando hay un cambio de medio de propagación.

El análisis del estado de polarización se realizó con 2 variantes caso A) estudio de polarización de la luz en elemento de detección semicilíndrico sin fibras ópticas B) estudio de polarización de la luz en elemento de detección semicilíndrico con fibras ópticas.

A) Estudio de polarización de la luz en elemento de detección semicilíndrico sin fibras ópticas.

La figura 5.1 muestra un diagrama del sensor para realizar el estudio del estado de polarización de la luz a la salida del elemento de detección óptico cuando se tienen diferentes estados de polarización. El estudio se realizó con una fuente de luz polarizada (1), un elemento de detección óptico semicilíndrico (2) y un analizador del estado de polarización, el estudio se realizó utilizando diferentes estados de polarización de la fuente óptica (lineal y circular) y el analizador del estado de polarización se observó en el otro extremo del elemento de detección semicilíndrico.

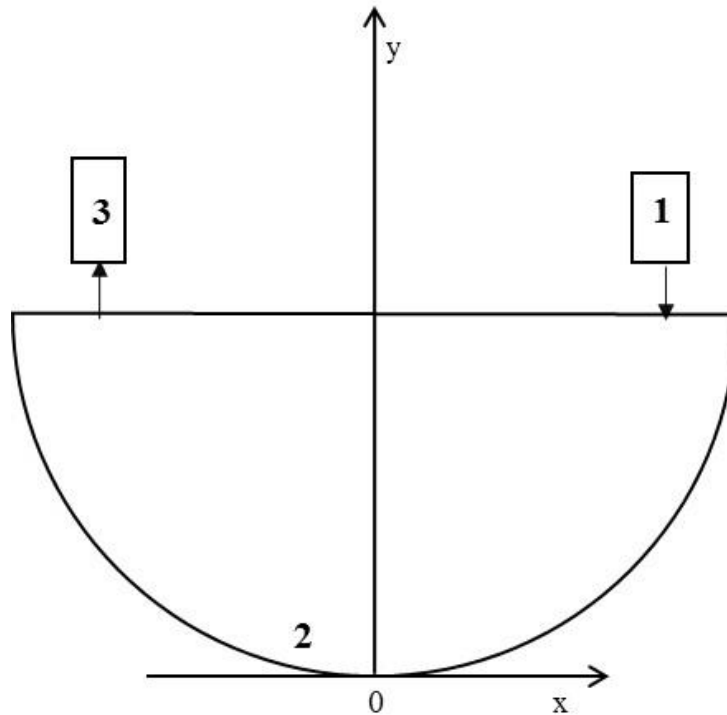


Figura 5.1. Elemento de detección óptico (vista axial) (plano x-y). 1 – Fuente óptica polarizada; 2 – elemento de detección óptico semicilíndrico, 3- Analizador del estado de polarización.

La figura 5.2. muestra los mapas de polarización de la señal óptica incidente en el elemento de detección (vista superior) plano x-z. Del lado derecho de la vista superior se observa la señal óptica incidente en el elemento de detección semicilíndrico, mientras que del lado izquierdo se muestra el estado de polarización a la salida del elemento de detección.

En la figura 5.2 (a) se observa que cuando la señal óptica incidente tiene polarización lineal horizontal con respecto al eje x, la salida en el otro extremo del elemento de detección conserva el mismo estado de polarización, al igual que cuando se incide una señal con polarización lineal vertical con respecto al eje x, el estado de polarización en el otro extremo del elemento de detección sigue siendo polarización lineal vertical, mientras que para los casos en que la señal óptica incidente es: (c) polarización lineal  $+45^\circ$  con respecto al eje x, (d) polarización lineal  $-45^\circ$  con respecto al eje x, (e) polarización circular derecha, el estado de polarización cambia a polarización elíptica.

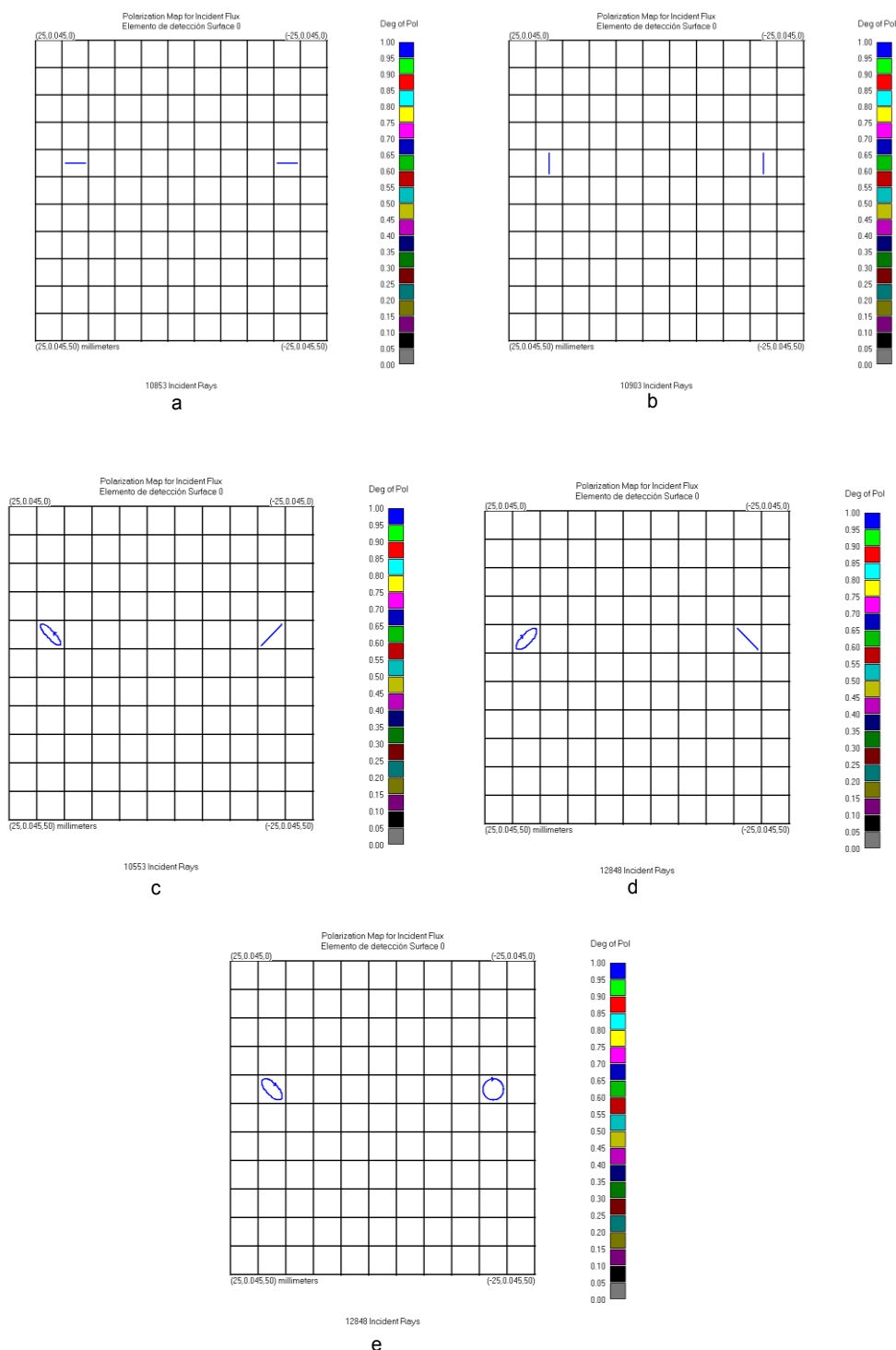


Figura 5.2. Mapas de polarización de la señal óptica incidente en el elemento de detección (vista superior) plano x-z. (a) Fuente con polarización lineal horizontal con respecto al eje x, (b) fuente con polarización lineal vertical con respecto al eje x, (c) fuente con polarización lineal +45° con respecto al eje x, (d) fuente con polarización lineal -45° con respecto al eje x, (e) fuente con polarización circular derecha.

B) Estudio de polarización de la luz en elemento de detección semicilíndrico con fibras ópticas.

El presente estudio simula la respuesta del sensor con luz polarizada linealmente, la figura 5.3 es un diagrama esquemático de la simulación, se utilizan para la simulación una fuente de luz polarizada no mostrada en la figura, un elemento de detección semicilíndrico sólido (1), dos fibras ópticas una transmisora y otra receptora (2 y 3) y un fotoreceptor óptico no mostrado en la figura.

Los parámetros de simulación para obtener la respuesta del sensor con respecto a la posición relativa de las fibras son los siguientes:

6. Elemento de detección sólido de PMMA
7. Índice de refracción del elemento:  $n_{\text{elemento}}=1.4952$
8. Radio adimensional de las fibras transmisora y receptora:  $\phi_1= \phi_2=0.052$
9. Apertura numérica de las fibras:  $NA_1=NA_2=0.5$
10. Posición relativa de la fibras ópticas  $\Lambda_1=\Lambda_2=0.93$
11. Luz polarizada linealmente

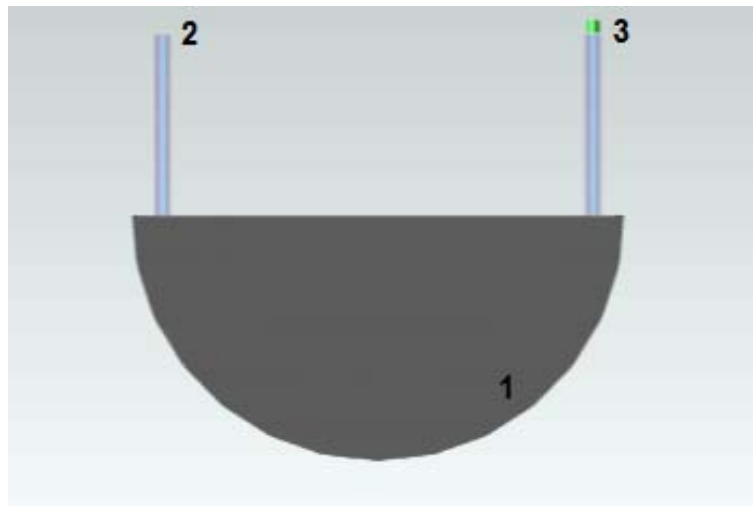


Figura 5.3. Sensor refractométrico (vista axial) (plano x-y). 1 - Elemento semicilíndrico de dieléctrico transparente; 2, 3 - fibra óptica de entrada y salida, respectivamente.

La respuesta del sensor al índice de refracción se muestra en la figura 5.4, los datos de la simulación se muestran en la tabla 5.1, la simulación se realizó con una fuente de luz no polarizada y con una fuente de luz polarizada, la fuente se configuró para que emitiera estados de polarización lineal con diferentes orientaciones, polarización lineal horizontal ( $0^\circ$

con respecto al eje x), polarización lineal vertical ( $90^\circ$  con respecto al eje x), polarización lineal  $45^\circ$  y polarización lineal  $-45^\circ$

Tabla 5.1. Respuesta del sensor teórica al índice de refracción con elemento de detección semicilíndrico

Índice de refracción	Luz no polarizada	Polarización lineal a $90^\circ$	Polarización lineal a $45^\circ$	Polarización lineal a $0^\circ$	Polarización lineal a $-45^\circ$
1	1	1	1	1	1
1.33166	0.89874188	0.96275799	0.89874188	0.83724131	0.89874188
1.335	0.88515909	0.94598739	0.88515909	0.82702161	0.88515909
1.34	0.88003956	0.9373023	0.88003956	0.82504377	0.88003956
1.345	0.87969503	0.93593252	0.87969503	0.82470286	0.87969503
1.35	0.88058665	0.93689905	0.88058665	0.82552296	0.88058665
1.355	0.85159151	0.90726383	0.85159151	0.79721306	0.85159151
1.36	0.75977828	0.81119011	0.75977828	0.70983364	0.75977828
1.365	0.6489393	0.69326367	0.6489393	0.60579968	0.6489393
1.37	0.54365412	0.58108952	0.54365412	0.50752918	0.54365412
1.375	0.43374936	0.46401791	0.43374936	0.40448374	0.43374936
1.38	0.3261403	0.34931984	0.3261403	0.30403174	0.3261403
1.385	0.2087161	0.22443209	0.2087161	0.1943763	0.2087161
1.39	0.12193592	0.1297549	0.12193592	0.11333786	0.12193592
1.395	0.11261568	0.11991347	0.11261568	0.10525358	0.11261568

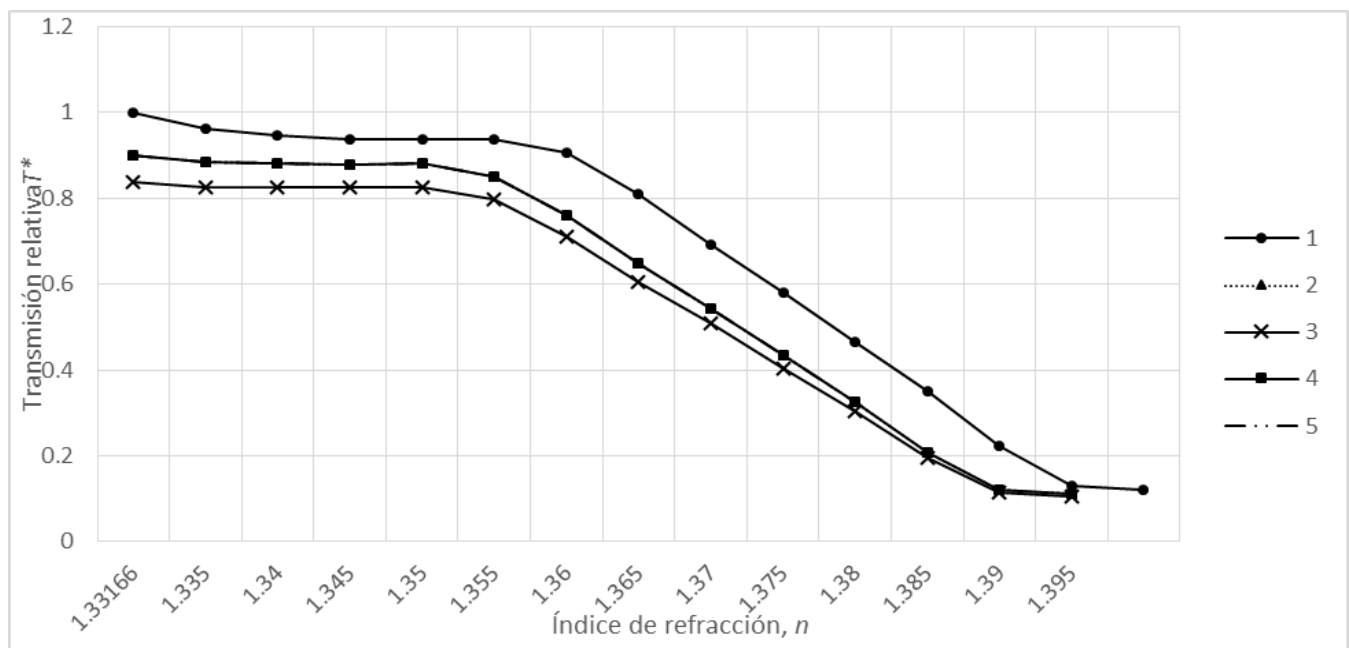


Figura 5.4. Transmisión relativa teórica  $T^*$  vs. Índice de refracción externo,  $n$  para diferentes estados de polarización de la fuente; (1) luz con polarización lineal vertical; (2) luz con polarización lineal a  $45^\circ$ ; (3) luz con polarización lineal horizontal; (4) luz con polarización lineal a  $-45^\circ$ ; (5) luz no polarizada.



La tabla 5.1 muestra que cuando la fuente emite luz no polarizada, polarizada a  $45^\circ$  y a  $-45^\circ$  la respuesta del sensor es la misma, mientras que cuando se tiene una fuente de luz con polarización lineal horizontal la intensidad es mayor mientras que con polarización vertical la intensidad disminuye.

### 5.3. Análisis teórico de la propagación de la luz y propiedades ópticas refractométricas con luz polarizada con elemento de detección semicilíndrico hueco.

El presente estudio simula la respuesta del sensor con luz polarizada linealmente, la figura 5.5 es un diagrama esquemático de la simulación, se utilizan para la simulación una fuente de luz polarizada no mostrada en la figura, un elemento de detección semicilíndrico hueco (1), dos fibras ópticas una transmisora y otra receptora (2 y 3) y un fotoreceptor óptico no mostrado en la figura.

Los parámetros de simulación para obtener la respuesta del sensor con respecto a la posición relativa de las fibras son los siguientes:

1. Elemento de detección sólido de PMMA
2. Índice de refracción del elemento:  $n_{\text{elemento}}=1.4952$
3. Radio adimensional de las fibras transmisora y receptora:  $\phi_1= \phi_2=0.052$
4. Apertura numérica de las fibras:  $NA_1=NA_2=0.5$
5. Posición relativa de la fibras ópticas  $\Lambda_1=\Lambda_2=0.93$
6. Luz polarizada linealmente

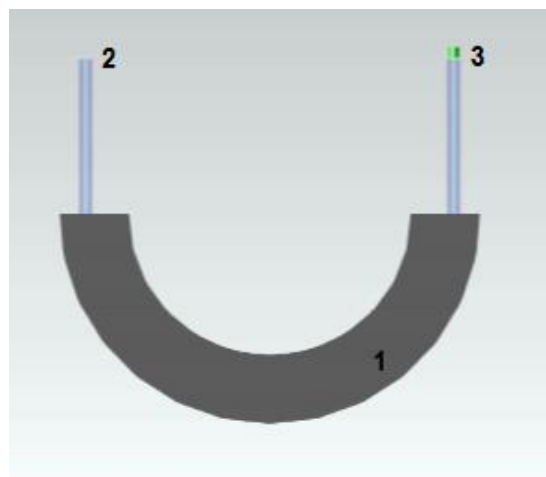


Figura 5.5. Sensor refractométrico (vista axial-lado izquierdo) (vista aérea-lado derecho). 1 - Elemento semicilíndrico hueco de dieléctrico transparente; 2, 3 - fibra óptica de entrada y salida, respectivamente.

Tabla 5.2. Respuesta del sensor teórica al índice de refracción con elemento de detección semicilíndrico hueco.

Índice de refracción	Luz no polarizada	Polarización lineal a 90°	Polarización lineal a 45°	Polarización lineal a 0°	Polarización lineal a -45°
1	1	1	1	1	1
1.33166	0.90017139	0.79692613	0.85268863	0.95794922	0.85268863
1.335	0.88913721	0.78922943	0.84226668	0.94429413	0.84226668
1.34	0.8813619	0.78333159	0.83490124	0.93404853	0.83490124
1.345	0.87291888	0.77576765	0.82690329	0.92510416	0.82690329
1.35	0.85952651	0.7639629	0.81424767	0.91093168	0.81424767
1.355	0.84309241	0.74911584	0.79868007	0.8937362	0.79868007
1.36	0.77270806	0.68498732	0.73197505	0.82089757	0.73197505
1.365	0.65757697	0.58200259	0.62294407	0.7004343	0.62294407
1.37	0.5326985	0.47119046	0.50461816	0.56787912	0.50461816
1.375	0.4061582	0.3590494	0.38474773	0.43363086	0.38474773
1.38	0.2691377	0.23769154	0.25498112	0.28827285	0.25498112
1.385	0.12449303	0.1090142	0.11793043	0.13500924	0.11793043
1.39	0.0904522	0.08021576	0.08568405	0.09593274	0.08568405

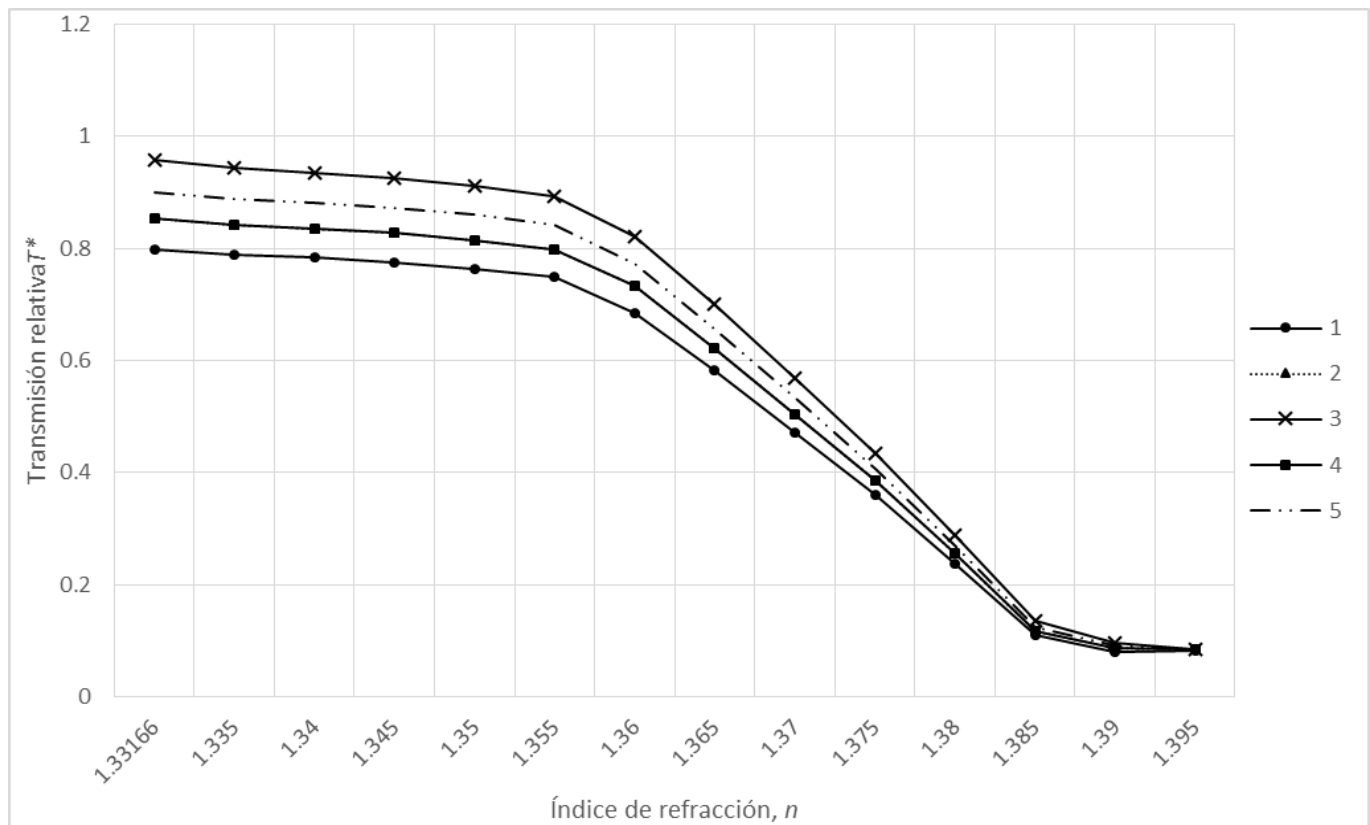


Figura 5.6. Transmisión relativa teórica  $T^*$  vs. Índice de refracción externo,  $n$  para diferentes estados de polarización de la fuente; (1) luz con polarización lineal vertical; (2) luz con polarización lineal a 45°; (3) luz con polarización lineal horizontal; (4) luz con polarización lineal a -45°; (5) luz no polarizada.

La tabla 5.2 muestra que cuando se hace incidir luz en el sensor con elemento de detección semicilíndrico hueco con polarización lineal horizontal está tiene la mayor intensidad, sin embargo cuando se hace incidir luz con polarización lineal vertical esta tendrá la menor intensidad, el comportamiento es el mismo cuando se hace incidir luz con polarización lineal a 45° y a -45°, mientras que la luz no polarizada tendrá una intensidad intermedia entre los estados de polarización lineal horizontal y a 45 ó -45°.

## 5.4. Discusión

Se puede observar que el estado de polarización es un factor que modifica la respuesta en intensidad del sensor, el rango de índices de refracción que puede detectar es el mismo para todos los estados de polarización, sin embargo para el procesamiento de la señal es necesario considerar la orientación del láser ya que esta posición cambia la intensidad a la salida del sensor.

## 5.5. Conclusiones

1. La respuesta del sensor varía notablemente en función de la orientación de la luz y la variación es de hasta 18% y por esto hay que tomar en cuenta estos efectos de polarización de la luz.
2. La variación del plano de polarización no tiene efecto significativo sobre la linealidad y ésta no se desplaza a la izquierda o a la derecha.
3. No tiene sentido controlar la polarización de la luz para modificar esta característica pero si es importante controlarla para evitar cambios aleatorios de la polarización y que tengan efectos en la respuesta del sensor.

En el presente capítulo se pudo comprobar que el estado de polarización es un factor que puede cambiar la respuesta del sensor, en el siguiente capítulo se realizará un estudio experimental para verificar estos efectos.

## 5.6. Referencias del capítulo 5.

- [1] R. M. A. Azzam and N.M. Bashara. *Ellipsometry and polarized light*. Michigan: North-Holland, 1987.
- [2] H. Tompkins and E.A. Irene. *Handbook of Ellipsometry*. William Andrew, 2005.

## Capítulo 6. Análisis experimental de propagación de la luz y características refractométricas del sensor con elemento de detección óptico semicilíndrico

### 6.1. Introducción

El análisis teórico en capítulos anteriores muestran el comportamiento del sensor bajo ciertos parámetros de diseño, esto considerando características ideales de los elementos ópticos, tales como geometría perfecta, polarización lineal de la fuente, etc, para lo cual es de suma importancia verificar las predicciones teóricas de forma experimental utilizando elementos reales ópticos.

### 6.2. Descripción de la instalación experimental

Experimentalmente se obtuvo la transmisión del sensor en función del índice de externo de refracción para diferentes orientaciones azimutales del plano de polarización de la luz de entrada, bajo diferentes parámetros del sensor.

El esquema de la instalación experimental se muestra en la figura 6.1. La instalación consta de los siguientes subsistemas: el óptico, el mecánico, electrónico y de adquisición de datos.

**El subsistema óptico** está conformado por una fuente óptica: un láser de Helio-Neón (1) de luz polarizada modelo 1507P y no polarizada modelo 1507 ambos de la marca JDSU (en función del experimento en particular), un modulador óptico (obturador, no mostrado en la figura), un analizador (polarizador lineal, no mostrado en la figura), dos fibras ópticas de plástico (transmisora y receptora) (2 y 4), montadas sobre unidades de desplazamiento (6), un elemento de detección semicilíndrico (3), un receptor óptico (5); los datos fueron grabados en una computadora y procesados estadísticamente.

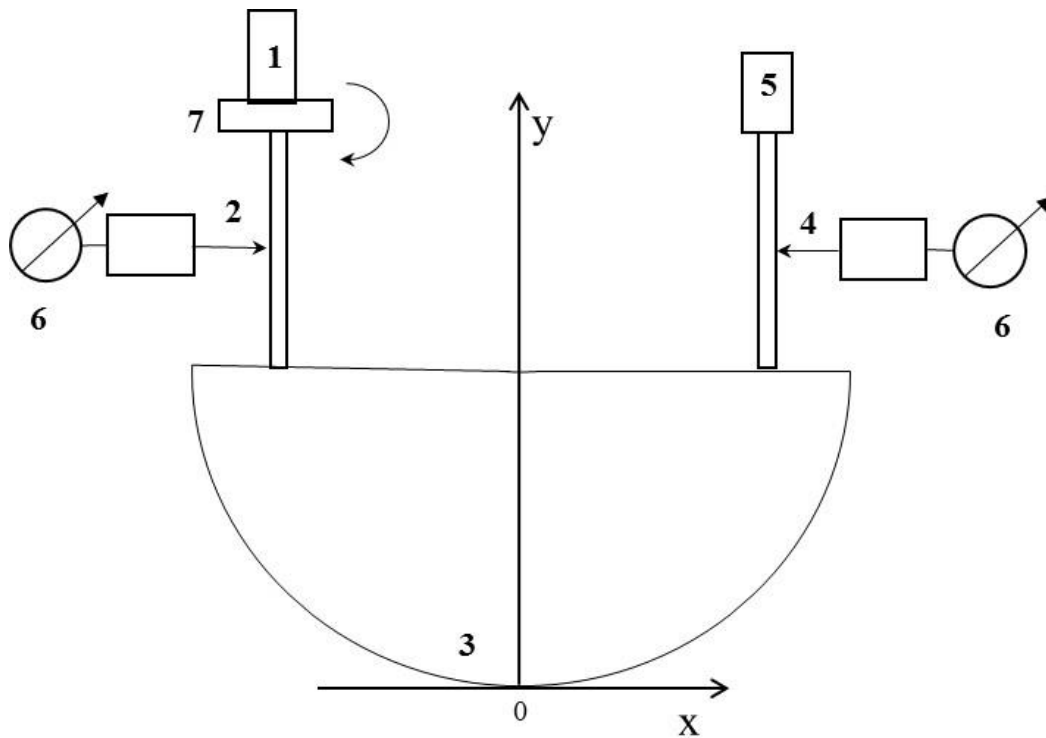


Figura 6.1. Diagrama esquemático del experimento.

## 1. Fuente óptica

Se utilizó como fuente de radiación óptica un láser rojo de He-Ne, de luz polarizada, marca JDSU, modelo 1507P y un láser de luz no polarizada modelo 1507, las características de las fuentes ópticas se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Características de las fuentes ópticas

	1507P	1507
Longitud de onda [nm]	632.8	632.8
Diámetro del haz [mm]	0.48	0.48
Relación de polarización	500:1	--
Clase CDRH/IEC	IIIa/3R	IIIa/3R
Potencia óptica [mW]	0.8	0.8

## 2. Receptor óptico

Se utilizó un fotoreceptor de Silicio con un amplificador de transimpedancia de la marca Thorlabs modelo PDA36A, el circuito de amplificación tiene una ganancia variable entre 0 dBm y hasta 70 dBm, las características del mismo se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Características del fotoreceptor.

Material	Silicio
Rango espectral	350 to 1100 nm
Longitud de onda pico ( $\lambda_p$ )	970 nm
Responsividad a $\lambda_p$	0.65 A/W

## 3. Fibras ópticas

Las dos fibras ópticas utilizadas son fibras de plástico de PMMA modelo CD-1000-1, marca Shenzhen Dasheng OptoElectronic Technology Co. Ltd, las características de las mismas se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Especificaciones de la fibra óptica plástica

Especificación	Valores
Atenuación (dB/m)	<0.2
Diámetro exterior (incluyendo capa protectora o recubrimiento) (mm)	2.2 $\pm$ 0.07
Apertura numérica	0.5
Diámetro del núcleo (mm)	0.98
Rango de temperaturas (°C)	-50...+70° C

### ***Manejo y preparación de las facetas de las fibras ópticas***

Se desnudó la fibra óptica con pinzas para desnudar fibra, posteriormente se cortó, se pulió y se abillanto cada una de las facetas de la fibra óptica, se comprobó que la fibra no tuviera una zona de espejo en el núcleo, la figura 6.2(a) muestra la vista superior de una de las facetas de la fibra óptica, posteriormente se colocó en un soporte para fibra óptica modelo FPH-DJ de la marca Newport Corporation figura 6.2 (b).



Figura 6.2. (a) Vista de la faceta de la fibra óptica, (b) Soporte de fibra utilizado en la instalación.

#### 4. Elemento transductor óptico semicilíndrico de plástico

Para la realización de estudios experimentales se fabricaron 4 muestras de elementos de detección: 2 semicilindros huecos y 2 semicilindros completos, los elementos fueron fabricados con un torno de control numérico. Para la fabricación del semicilindro se utilizó una barra redonda de acrílico de 38 mm de diámetro, se cortó en dos con el torno de control numérico, se pulió y se abriglanto hasta obtener una calidad óptica de la superficie, se realizó el mismo proceso para fabricación del semicilindro hueco, solo que para la fabricación del mismo se utilizó un tubo de acrílico de diámetro de 38 mm, con una pared de 6 mm, la figura 4.3 muestra a uno de los elementos semicilíndricos después del proceso de corte, pulido y abriglanto.

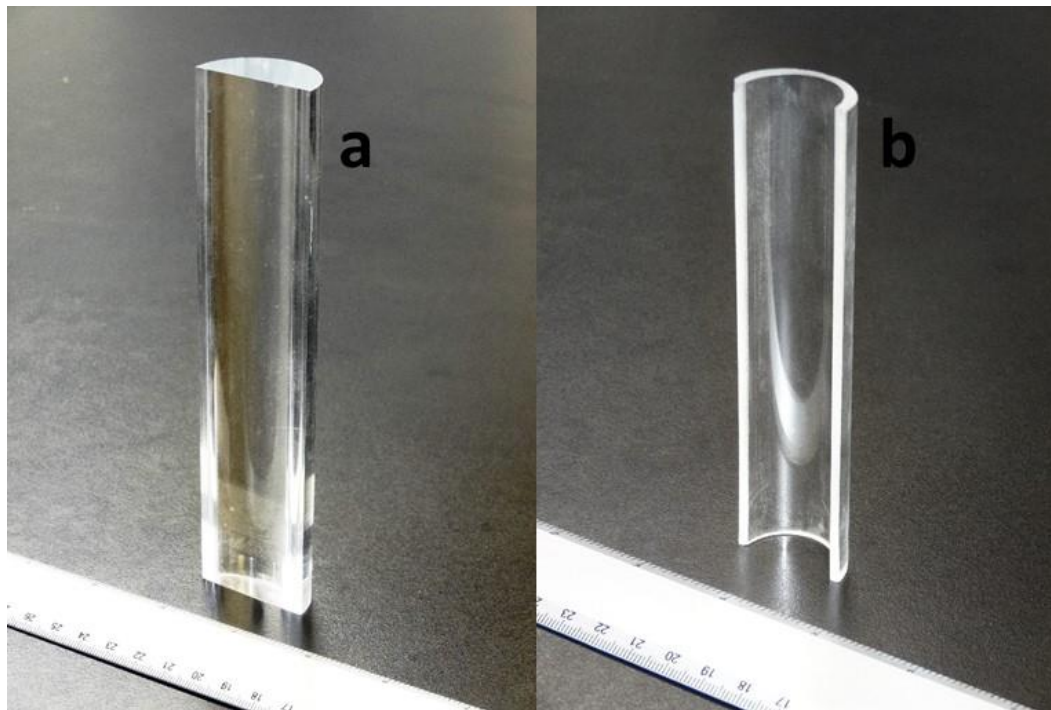


Figura 6.3. Elemento semicilíndrico fabricado para sensor refractométrico: (a) semicilindro completo, (b) semicilindro hueco.



El **subsistema mecánico** consta de varios elementos montados en una mesa óptica para evitar el movimiento de cualquier parte de la instalación y facilitar la reproducción de la operación las veces que se requiriera. La figura 6.4 muestra la instalación completa experimental.

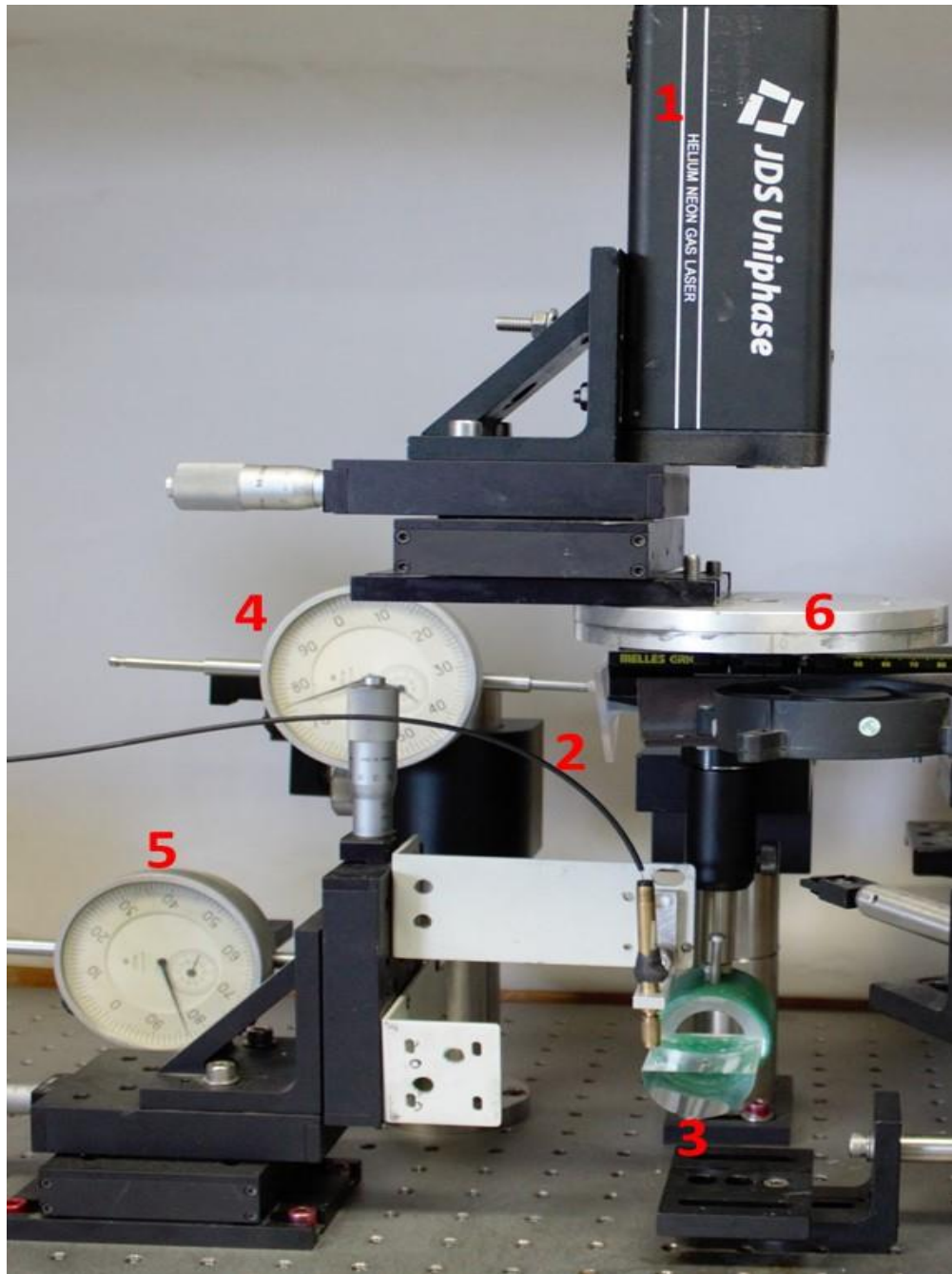


Figura 6.4. Instalación experimental (fotografía). (1) Fuente óptica, (2) fibra óptica de plástico, (3) elemento de detección de plástico, (4-5) unidades medidoras de desplazamiento, (6) base giratoria.

La fuente óptica fue montada sobre una base giratoria para cambiar el sentido de orientación de la fuente, las fibras ópticas se colocaron en soportes para fibra modelo FPH-DJ de la marca Newport Corporation, estos soportes fueron montados en dos unidades de desplazamiento (marca ThorLabs, modelo PT3) sobre los ejes X-Y-Z de alta precisión las cuales permitieron el movimiento de las fibras relativo al plano de simetría del sensor. Estas unidades de desplazamiento permiten el movimiento de las fibras ópticas con una resolución de 10  $\mu\text{m}$ . Una vez montadas las fibras ópticas en estas unidades fue posible controlar su posición con respecto a la superficie del elemento de detección semicilíndrico. El control de la posición en la dirección Z permite colocar las fibras a la misma altura, el control Y permite colocarlas en el plano ecuatorial del semicilindro y el control X hace posible modificar la posición relativa de las fibras  $\Lambda$ .

La fuente óptica, un láser de He-Ne fue montado sobre una base giratoria que permite controlar la dirección de propagación de la luz emitida por la fuente óptica, a su vez se colocó sobre la base giratoria una unidad de desplazamiento que permite que al girar el l

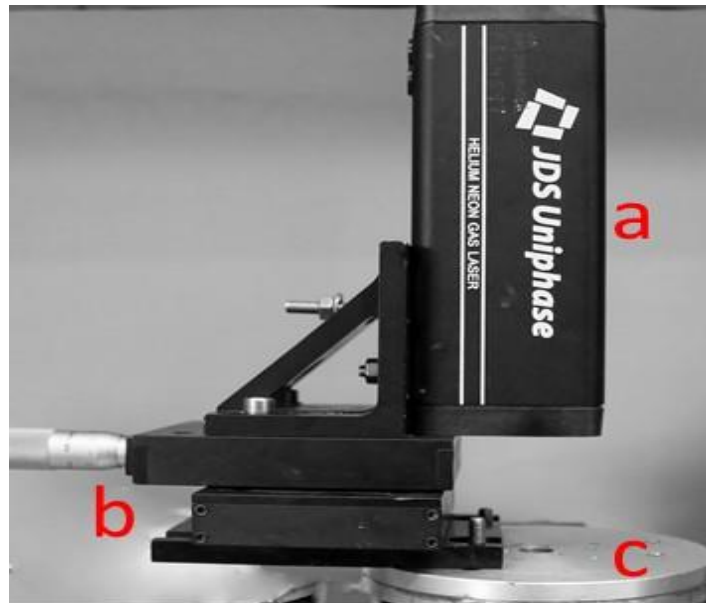


Figura 6.5. Fuente óptica (fotografía). (a) Láser de He-Ne, (b) Unidad de desplazamiento,(c) base giratoria.

El elemento transductor óptico semicilíndrico fue atornillado a un soporte circular manera que soportado en una base cinemática marca Thorlabs modelo KB3X3 fija a un pedestal marca Thorlabs modelo RS4P para que este alcance la altura del elemento transductor. La figura 6.6 muestra el elemento de detección en su soporte.

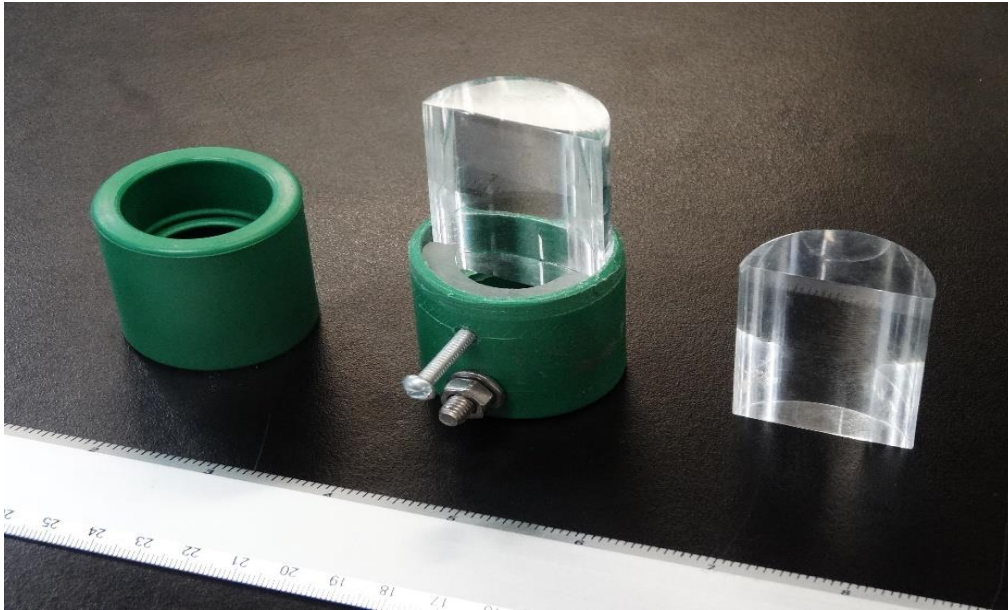


Figura 6.6. Elemento de detección sobre soporte.

### **6.3. Estudio experimental de la propagación de la luz y propiedades ópticas refractométricas principales de un elemento transductor óptico de forma cilíndrica, con la luz polarizada linealmente.**

En esta sección se describen diversos experimentos realizados para observar la respuesta del sensor al cambiar el estado de polarización de la luz, todos los experimentos fueron realizados con luz polarizada.

Debido a la complejidad de los estudios de polarización de la luz, los estudios de estos efectos fueron realizados en diferentes etapas, se realizó un estudio sobre A) estado de polarización del láser, B) depolarización de la luz al pasar por el elemento de detección semicilíndrico C) efectos de polarización de la luz en elemento en forma de semicilindro (cuando elemento no tiene fibra óptica transmisora) y D) efectos de polarización de la luz en elemento en forma de semicilindro hueco (cuando elemento no tiene fibra óptica transmisora) y por último E) efectos de polarización de la luz en elemento en forma de semicilindro hueco (con ambas fibras ópticas, transmisora y receptora).

#### **A) Estado de polarización del láser**

Para caracterizar la fuente óptica realizada en todos los experimentos se montó una instalación experimental mostrada en la figura 6.7, se realizaron 7 mediciones para verificar

que el estado de polarización se mantuviera constante, en el experimento se utilizó un láser de Helio-Neón marca JDSU Uniphase modelo 1507P-1, polarímetro marca Thorlabs modelo PAX CARD 5710 TXP y un sensor marca Thorlabs modelo PAN5710VIS.

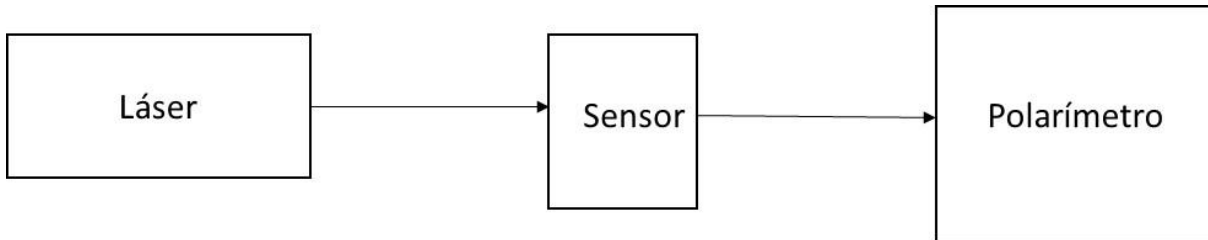


Fig. 6.7. Diagrama esquemático de montaje experimental para medición del estado de polarización del láser

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.8:

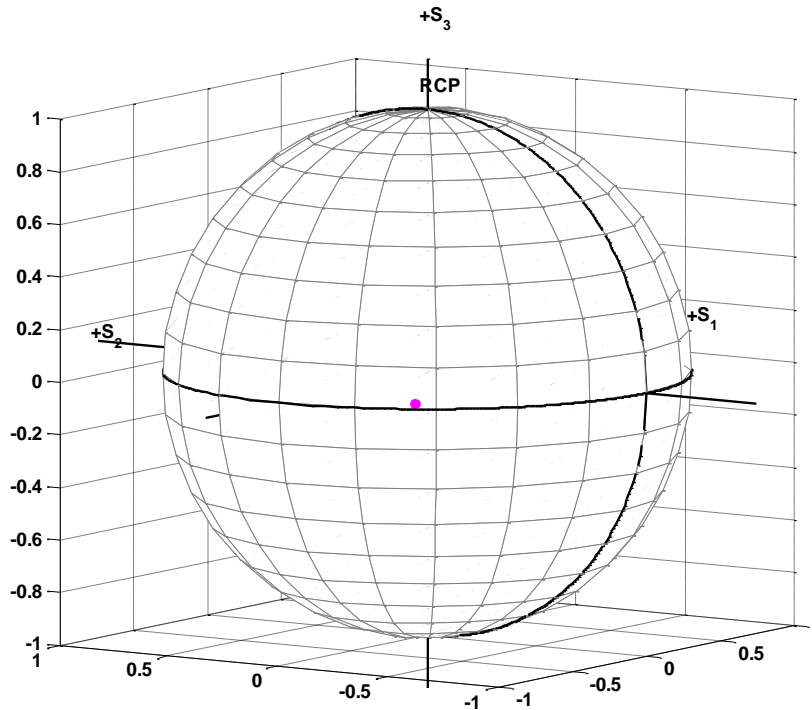


Figura 6.8. Esfera de Poincaré donde se muestra el estado de polarización del láser.

Los parámetros de Stokes obtenidos por medio del polarímetro son:

$$S_1 = -0.8539$$

$$S_2 = -0.5201$$

$$S_3 = 0.019$$

De acuerdo a lo anterior se concluye que el láser tiene polarización elíptica y se observa en la esfera de Poincaré que es cercana a la polarización lineal vertical.

Las características de la elipse de polarización son las siguientes:

$$\text{Elipticidad: } e = \frac{S_3}{S_0 + \sqrt{S_1^2 + S_2^2}} = 0.0095$$

$$\text{Orientación del eje mayor, azimut: } \psi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) = 15.67$$

$$\text{Excentricidad de la elipse: } \varepsilon = \sqrt{1 - e^2} = 0.999$$

Para comprobar los resultados obtenidos con el polarímetro se realizó un estudio con un analizador (polarizador lineal) marca Thorlabs, modelo LPVISB100-MP2 sobre una unidad de rotación marca Thorlabs, modelo RSP1C que permitió rotar el analizador 360° y un fotodetector óptico con ganancia variable, marca Thorlabs, modelo PDA36A. La instalación montada se muestra en la figura 6.9



Figura 6.9. Instalación montada para analizar el estado de polarización de la luz a la salida del láser. (1) Láser, (2) Base giratoria con polarizador lineal, (3) Fotoreceptor.

Los resultados del experimento son mostrados en la figura 6.10, la gráfica que muestra intensidad relativa vs ángulo del polarizador lineal, nos indican que el láser tiene polarización

elíptica, cuando el polarizador lineal se encuentra en una posición de entre  $45^\circ$  y hasta  $130^\circ$  o de  $215^\circ$  a  $310^\circ$  la intensidad de la luz en el receptor se encuentra por encima del 70% de su intensidad, mientras que para el resto de los ángulos la intensidad disminuye considerablemente, de acuerdo a los resultados mostrados, el eje mayor de la elipse esta en sentido vertical cuando el láser no tiene ninguna inclinación.

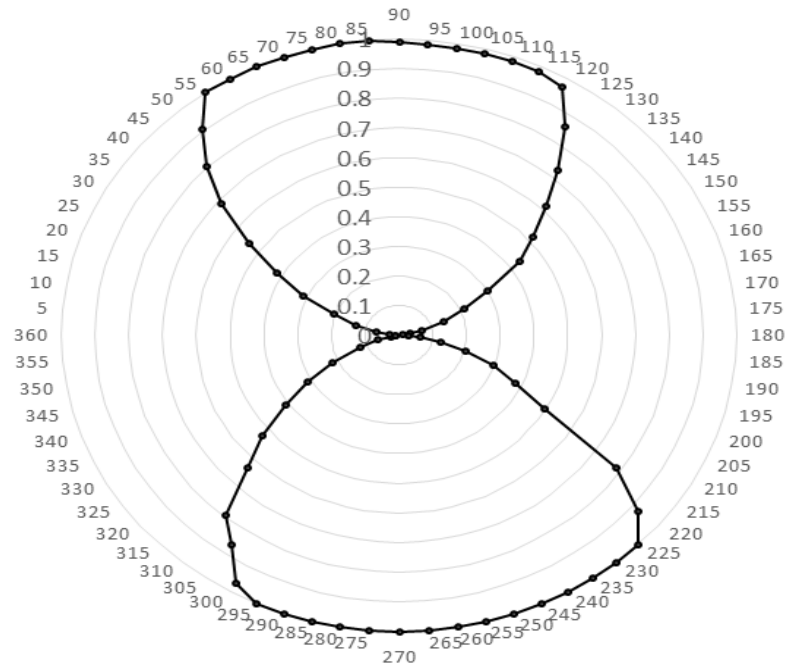


Figura 6.10. Resultados experimentales del estudio de la orientación de polarización del láser, en el eje radial se gráfica la posición del polarizador lineal.

### B) Depolarización de la luz al pasar por el elemento de detección semicilíndrico

El objetivo de este estudio es observar si el elemento de detección depolariza la luz incidente, para posteriormente determinar si este efecto pudiera ser considerable en la respuesta del sensor. El arreglo experimental es mostrado en la figura 6.11.



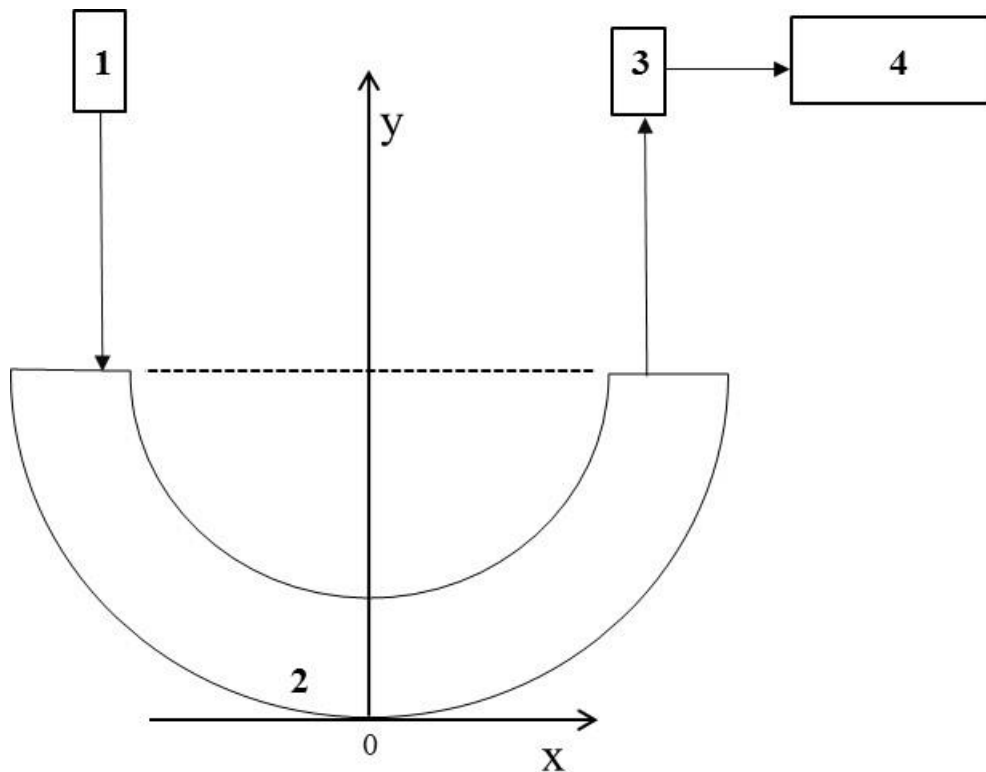


Figura 6.11. Diagrama esquemático de montaje experimental para medición del estado de polarización a la salida del elemento de detección.

Los parámetros de Stokes obtenidos por medio del polarímetro son:

$$S_1 = -0.8226$$

$$S_2 = -0.2814$$

$$S_3 = -0.4924$$

Las características de la elipse de polarización son las siguientes:

$$\text{Elipticidad: } e = \frac{S_3}{S_0 + \sqrt{S_1^2 + S_2^2}} = 0.26$$

$$\text{Orientación del eje mayor, azimut: } \psi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) = 14.87$$

$$\text{Excentricidad de la elipse: } \varepsilon = \sqrt{1 - e^2} = 0.9656$$

Para comprobar los resultados anteriores se utilizó un analizador para estudiar los cambios en el estado de polarización de la luz en la salida del elemento de detección como una función

del medio externo que rodea al elemento de detección. El arreglo experimental se muestra en la figura 6.12.

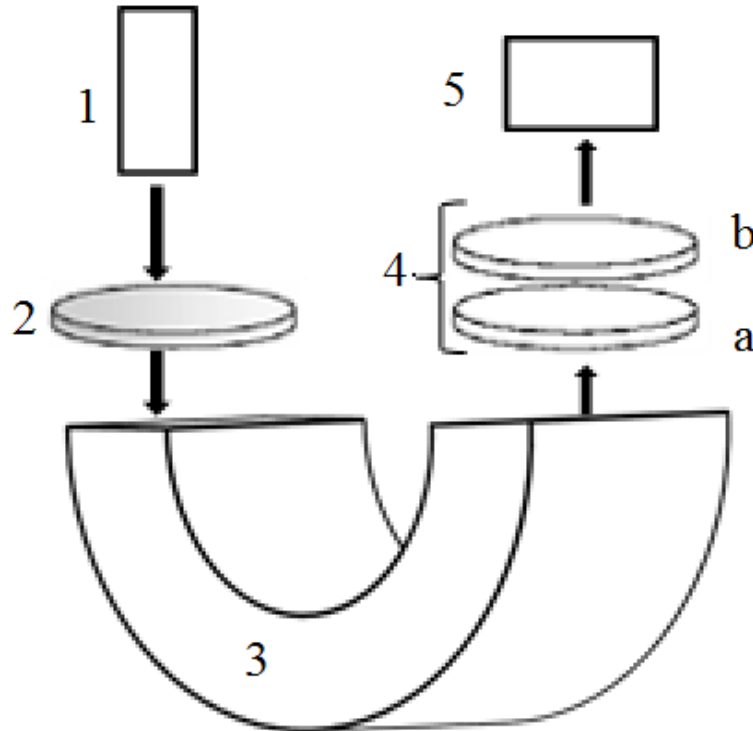


Figura 6.12 Diagrama esquemático para medición de los parámetros de Stokes; 1. Láser de luz polarizada He-Ne, 2. Polarizador lineal, 3 Elemento de detección de plástico, 4. Analizador formado por a. Retardador, b. Polarizador lineal, 5. Fotodetector.

Para medir el estado de polarización se realizaron 5 mediciones que nos permitieron calcular los parámetros de Stokes:  $P_H$  (Polarización lineal cuando  $\theta=0^\circ$ ),  $P_V$  (Polarización lineal cuando  $\theta=90^\circ$ ),  $P_{45}$  (Polarización lineal cuando  $\theta=45^\circ$ )  $P_{135}$  (Polarización lineal cuando  $\theta=135^\circ$ ),  $P_R$  (Polarización circular derecha) y  $P_L$  (Polarización circular izquierda).

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_H + P_V \\ P_H - P_V \\ P_{45} - P_{135} \\ P_R - P_L \end{bmatrix}$$

Los parámetros de Stokes de la luz normalizados en la salida del elemento de detección cuando el elemento estaba en aire fueron  $S_1 = 0.529$ ,  $S_2 = -0.736$ ,  $S_3 = -0.407$  y cuando el



elemento de detección estaba sumergido en agua fueron:  $S_1 = -0.412$ ,  $S_2 = -0.187$ ,  $S_3 = 0.892$ . Los dos estados de polarización están graficados en la figura 6.13.

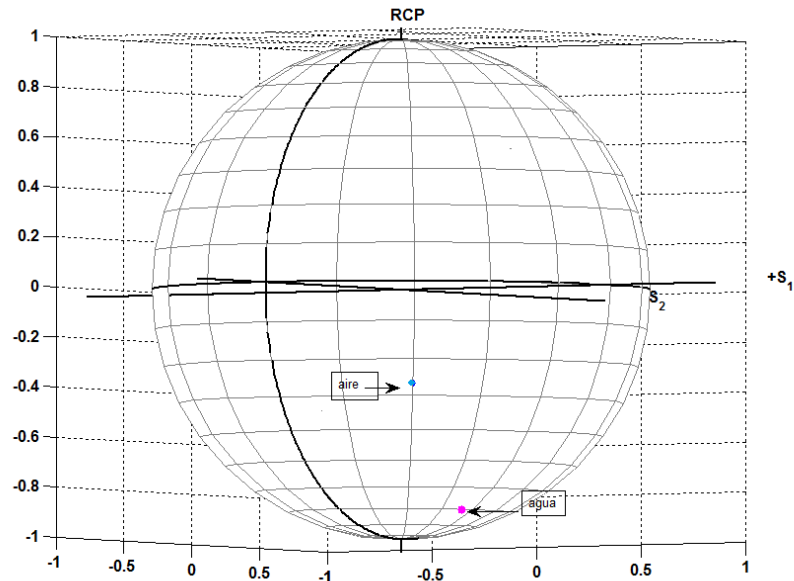


Figura 6.13. Polarización de la luz en la salida del elemento de detección graficada en la esfera de Poincare para diferentes medios externos (a) aire, (b) agua.

### C) Efectos de polarización de la luz en elemento en forma de semicilindro

Se instrumentó la instalación experimental mostrada en la figura 6.14, se realizaron mediciones para diferentes posiciones del láser (polarización elíptica con tendencia a vertical perpendicular al eje x ( $0^\circ$ ), polarización lineal horizontal paralela al eje x ( $90^\circ$ ), polarización lineal a  $45^\circ$  formando  $45^\circ$  con respecto al eje x ( $45^\circ$ ) y polarización lineal a  $-45^\circ$  formando un ángulo de  $-45^\circ$  con respecto al eje x ( $-45^\circ$ ).

Se tomaron muestras 7 muestras cada segundo para diferentes posiciones del láser y de la fibra óptica receptora haciendo un traslado simétrico con respecto al eje x, se colocó entre el láser y el elemento de detección un filtro atenuador debido a que la señal estaba saturada.

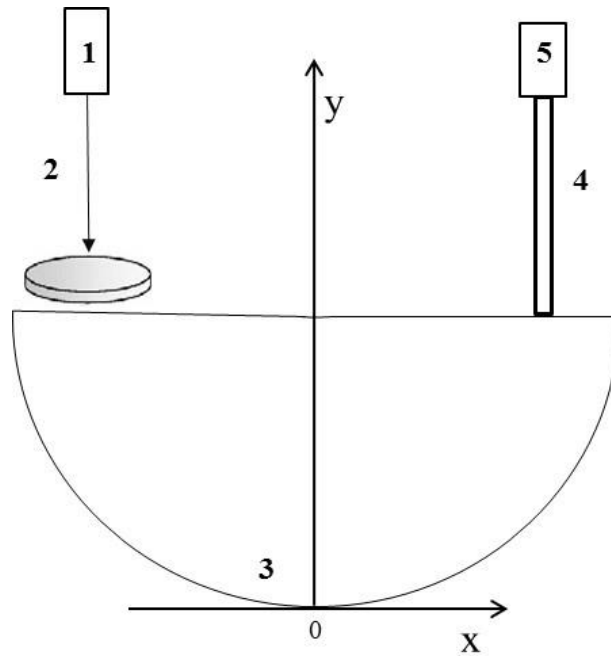


Figura 6.14. Sensor refractométrico con fibra óptica receptora: (1) láser de luz polarizada, (2) atenuador, (3) elemento de detección semicilíndrico, (4) fibra óptica receptora, (5) detector.

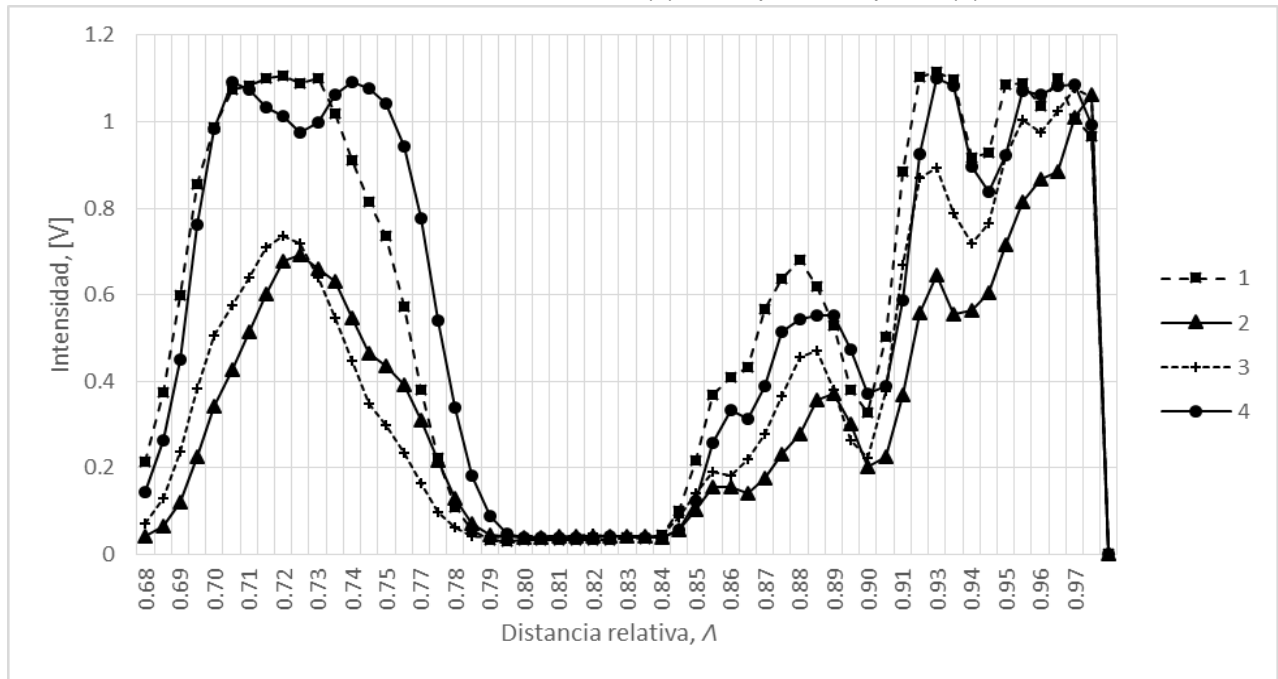


Figura 6.15. Distancia relativa vs Transmisión absoluta para diferentes posiciones del láser, elemento de detección semicilíndrico. ; (1) luz con polarización lineal vertical  $90^\circ$  respecto a eje x; (2) luz con polarización lineal horizontal  $0^\circ$  con respecto al eje x; (3) luz con polarización lineal a  $-45^\circ$  con respecto a eje x; (4) luz con polarización lineal a  $45^\circ$  con respecto a eje x.

La figura 6.15 muestra que hay un mejor acoplamiento entre las fibras ópticas transmisora y receptora cuando la luz tiene polarización lineal vertical con respecto al eje x, mientras que el peor acoplamiento se presentó cuando la polarización era lineal horizontal.

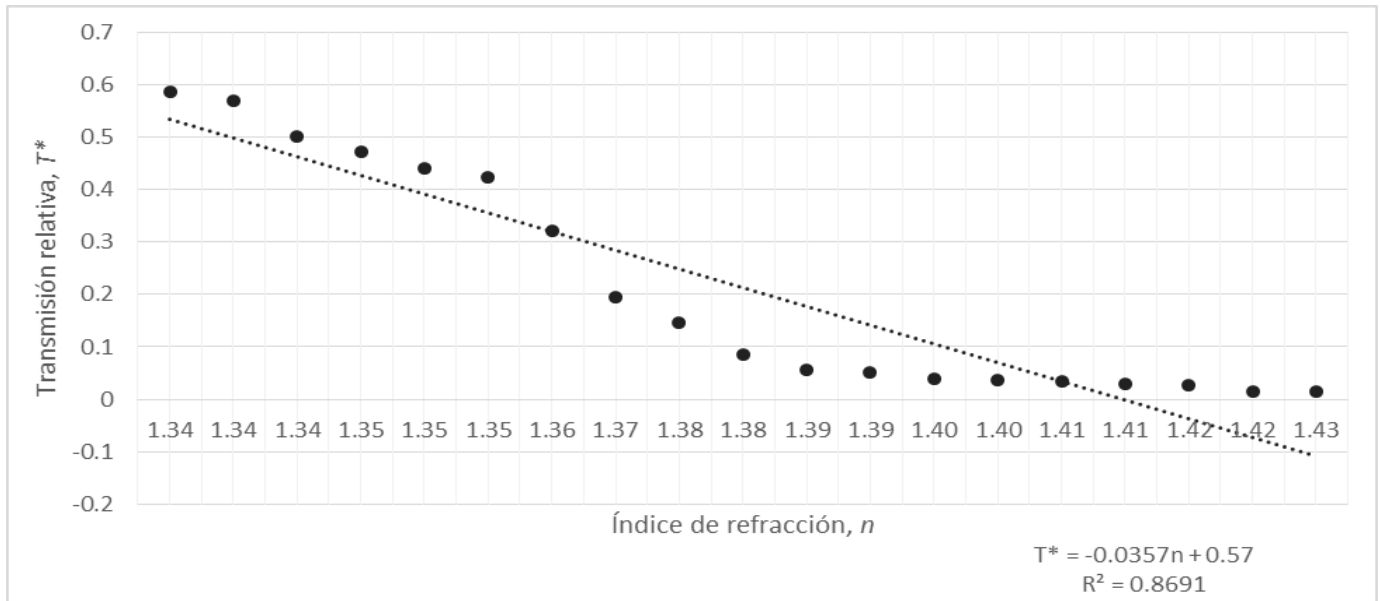


Figura 6.16. Índice de refracción,  $n$  vs Transmisión relativa,  $T^*$ , láser orientado a  $0^\circ$  con respecto al eje x.

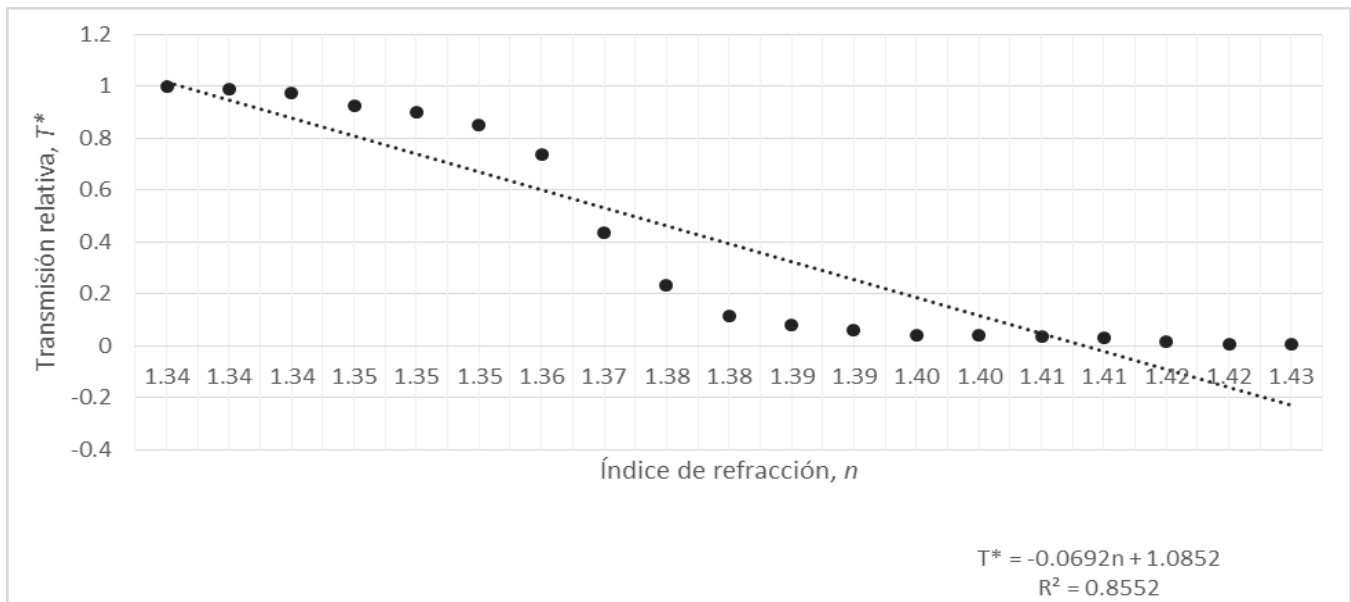


Figura 6.17. Índice de refracción,  $n$  vs Transmisión relativa,  $T^*$ , láser orientado a  $90^\circ$  con respecto al eje x.

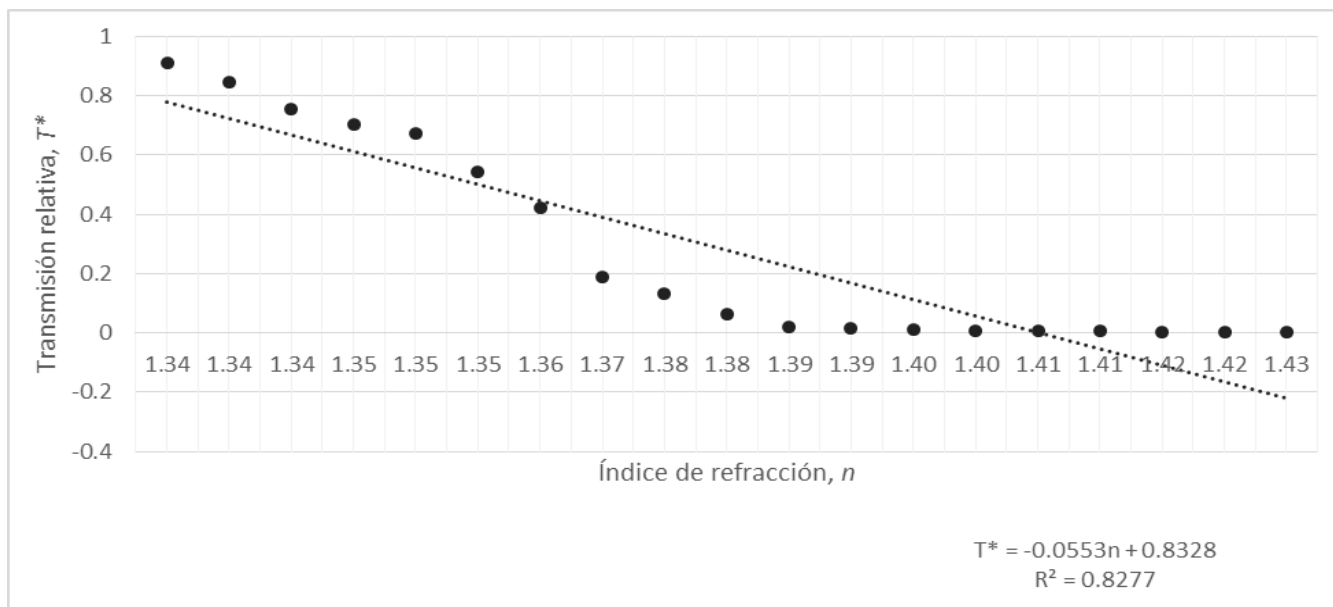


Figura 6.18. Índice de refracción,  $n$  vs Transmisión relativa,  $T^*$ , láser orientado a  $45^\circ$  con respecto al eje  $x$ .

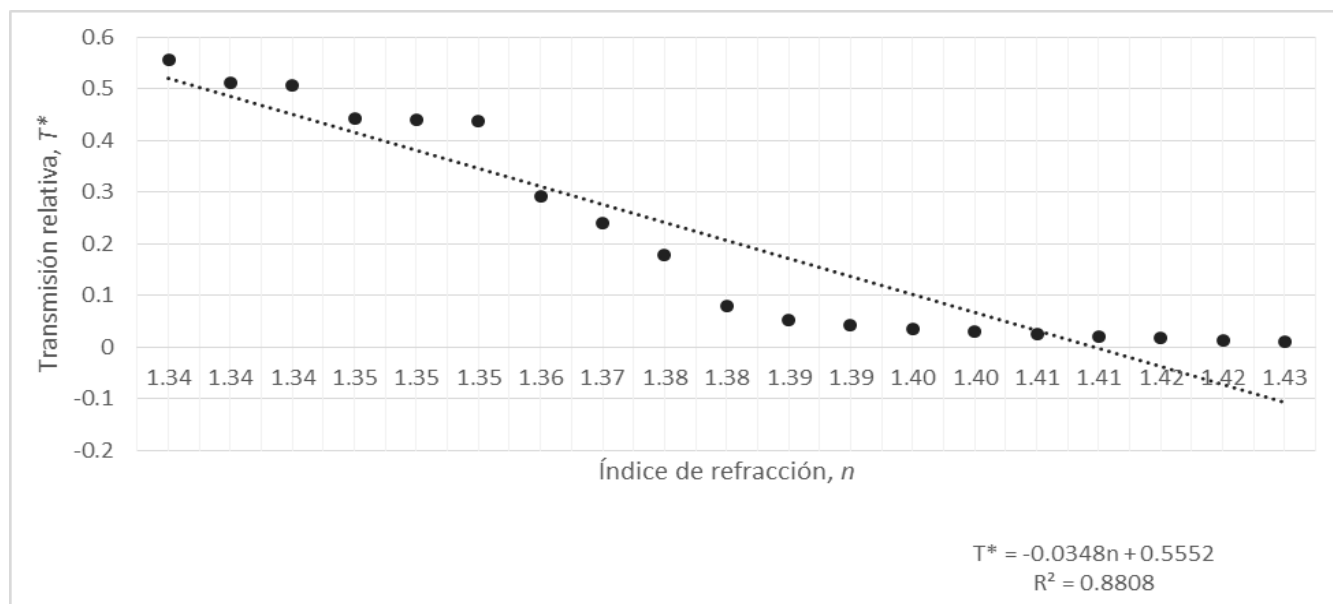


Figura 6.19. Índice de refracción,  $n$  vs Transmisión relativa,  $T^*$ , láser orientado a  $-45^\circ$  con respecto al eje  $x$ .

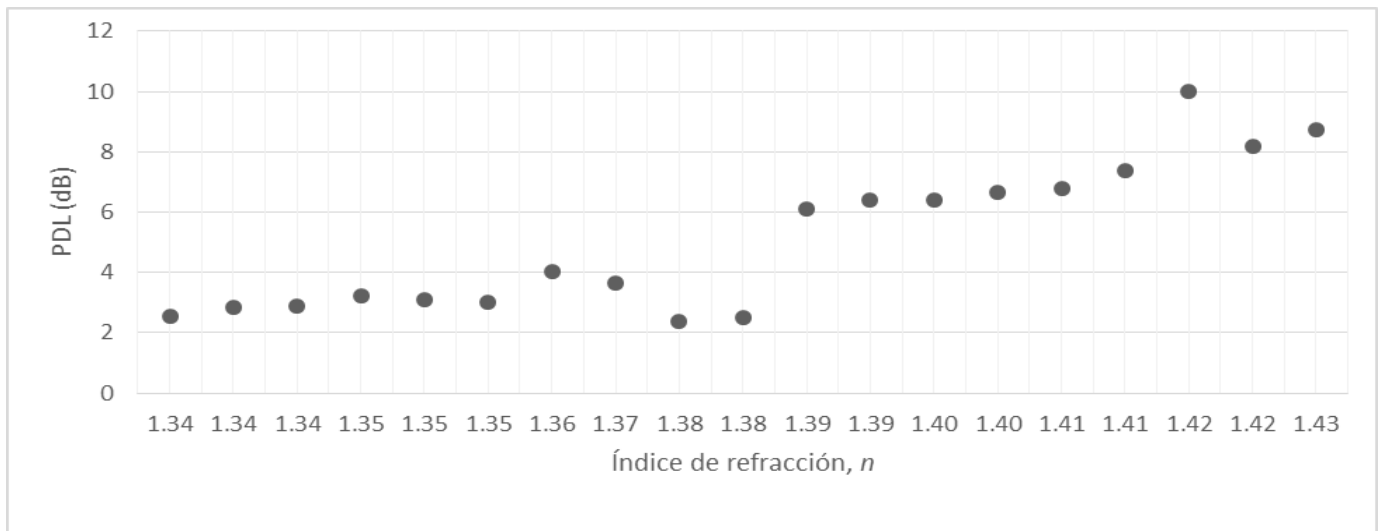


Figura 6.20. Pérdidas dependientes de la polarización con elemento de detección semicilíndrico.

Tabla 6.4. Ecuación lineal que describe el comportamiento del elemento de detección cilíndrico con luz polarizada.

Orientación del láser con respecto al eje x	Ecuación lineal	$R^2$
$0^\circ$	$T^* = -0.0357n + 0.57$	$R^2 = 0.8691$
$90^\circ$	$T^* = -0.0692n + 1.0852$	$R^2 = 0.8552$
$45^\circ$	$T^* = -0.0553n + 0.8328$	$R^2 = 0.8277$
$-45^\circ$	$T^* = -0.0348n + 0.5552$	$R^2 = 0.8808$

De las figuras 6.16 a 6.19 se puede observar que al cambiar el estado de polarización lineal en la entrada del elemento de detección cambia la sensibilidad del mismo, el rango de índices de refracción se mantiene casi constante, pero si se aproxima con una línea recta la respuesta del sensor la pendiente cambia hasta en un 50%.

Las pérdidas debidas a la polarización se calcularon como el cociente entre la intensidad máxima y la mínima para diferentes posiciones del polarizador, el resultado se muestra en la figura 6.20.

Las pérdidas debidas a la polarización no son constantes para todos los índices de refracción (en el rango de índices medidos), se presentaron pérdidas mínimas de 2.1 dB y pérdidas máximas de 10 dB para el índice de refracción de 1.42.

### D) Efectos de polarización de la luz en elemento en forma de semicilindro hueco

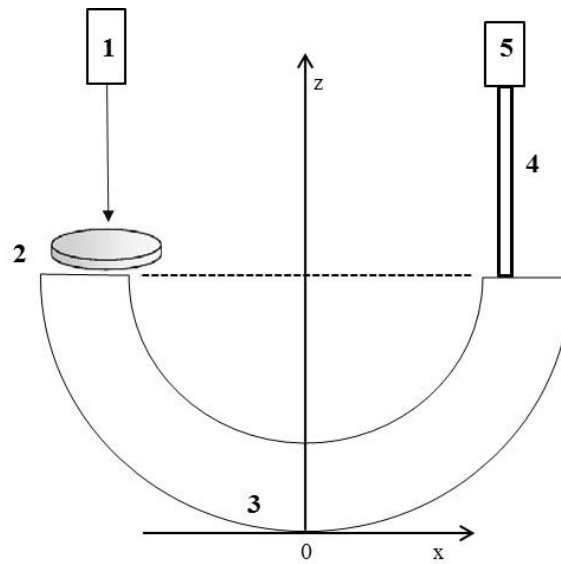


Figura 6.21. Sensor refractométrico con fibra óptica receptora: (1) láser de luz polarizada, (2) atenuador, (3) elemento de detección semicilíndrico hueco, (4) fibra óptica receptora, (5) detector.

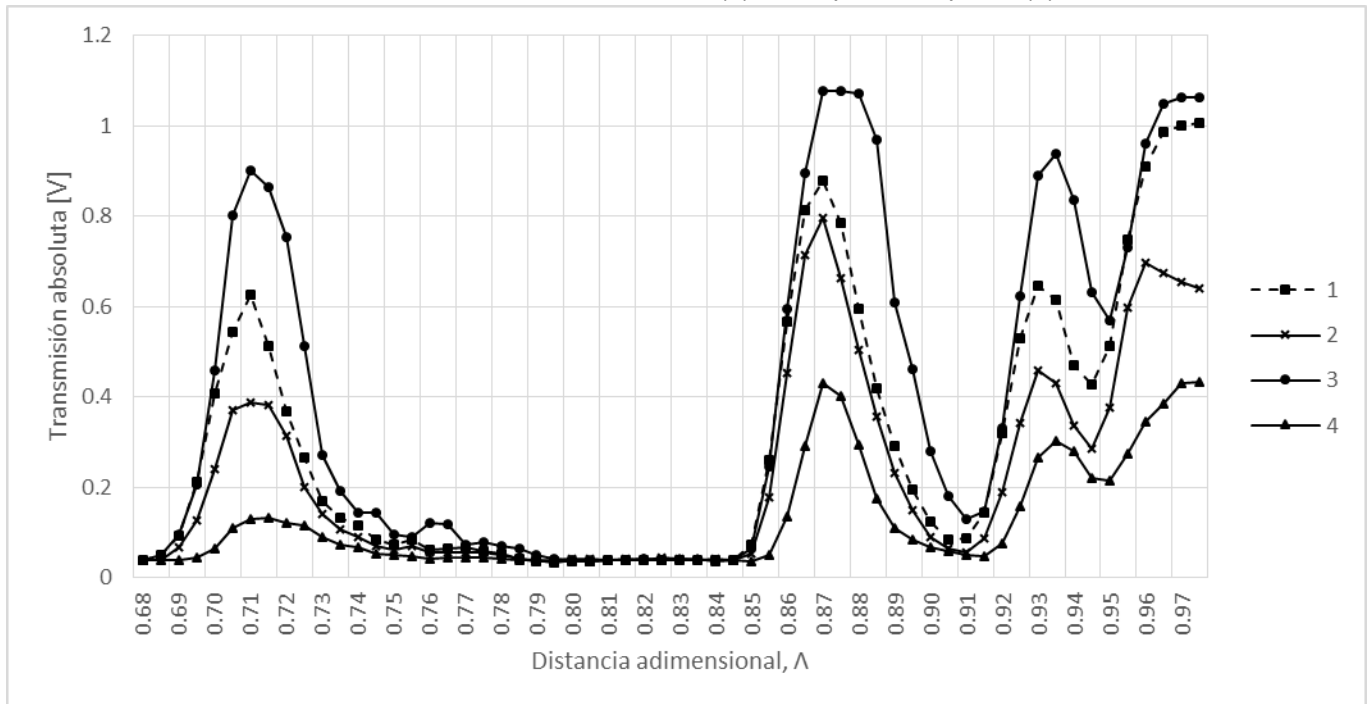


Figura 6.22. Distancia relativa vs Transmisión absoluta para diferentes posiciones del láser, elemento de detección semicilíndrico hueco. (1) luz con polarización lineal vertical  $90^\circ$  respecto a eje x; (2) luz con polarización lineal a  $45^\circ$  con respecto al eje x; (3) luz con polarización lineal a  $45^\circ$  con respecto a eje x; (4) luz con polarización lineal horizontal  $0^\circ$  con respecto a eje x.

La figura 6.22 muestra que hay un mejor acoplamiento entre las fibras ópticas transmisora y receptora cuando la luz tiene polarización lineal a 45° con respecto al eje x, mientras que el peor acoplamiento se presentó cuando la polarización era lineal horizontal.

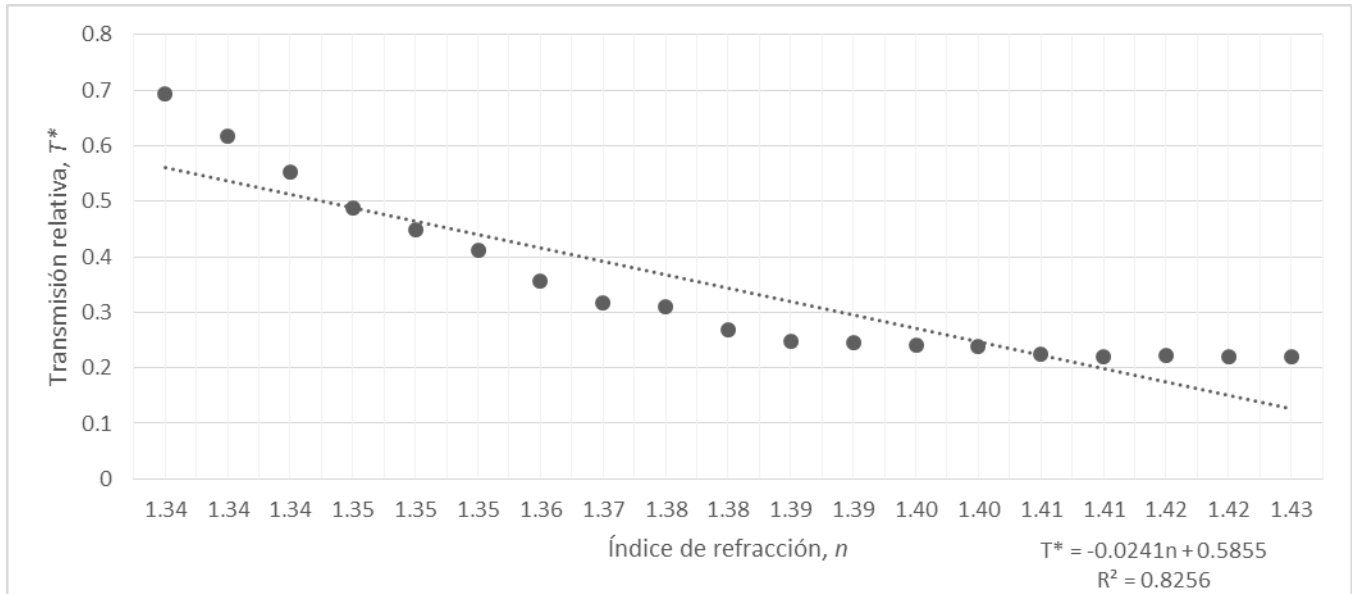


Figura 6.23. Índice de refracción,  $n$  vs Transmisión relativa,  $T^*$ , láser orientado a 0° con respecto al eje x, elemento de detección semicilíndrico hueco.

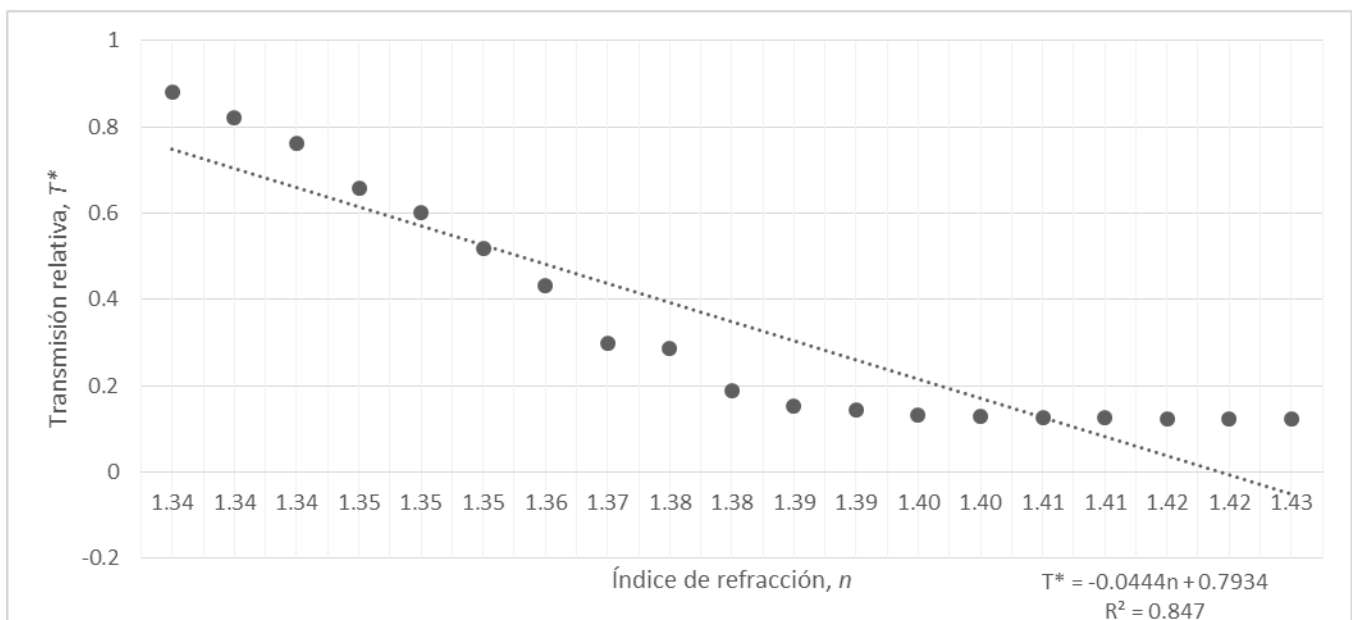


Figura 6.24. Índice de refracción,  $n$  vs Transmisión relativa,  $T^*$ , láser orientado a 90° con respecto al eje x, elemento de detección semicilíndrico hueco.

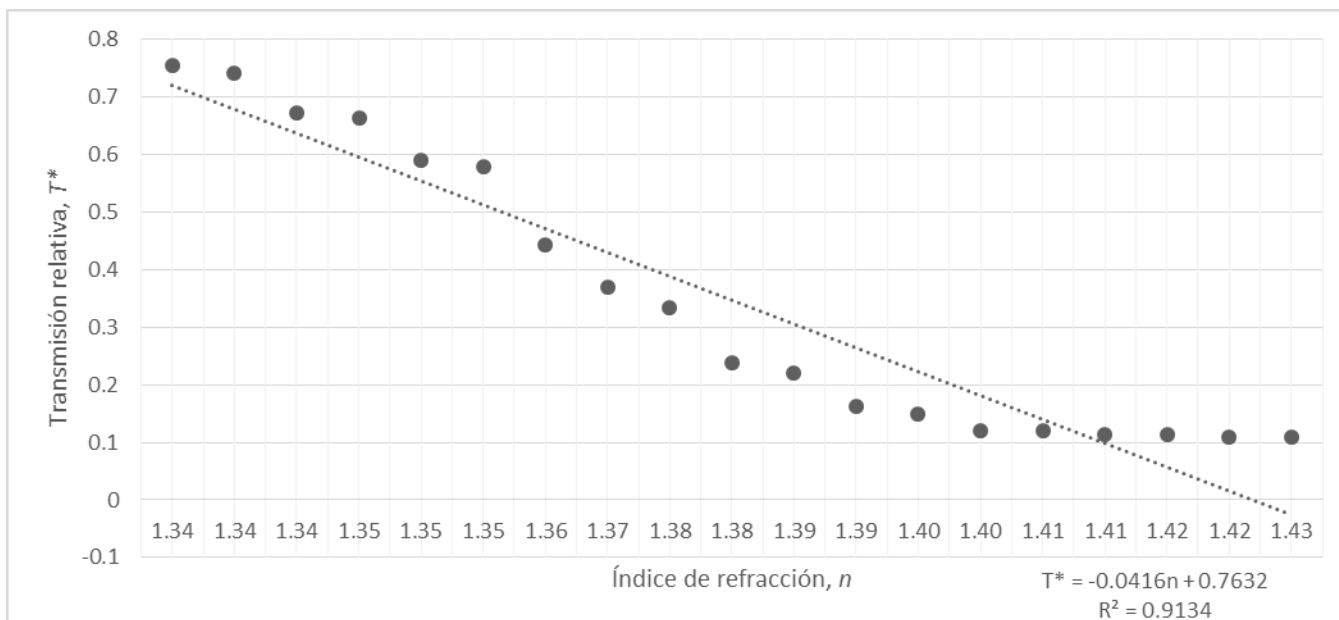


Figura 6.25. Índice de refracción,  $n$  vs Transmisión relativa,  $T^*$ , láser orientado a  $45^\circ$  con respecto al eje  $x$ , elemento de detección semicilíndrico hueco.

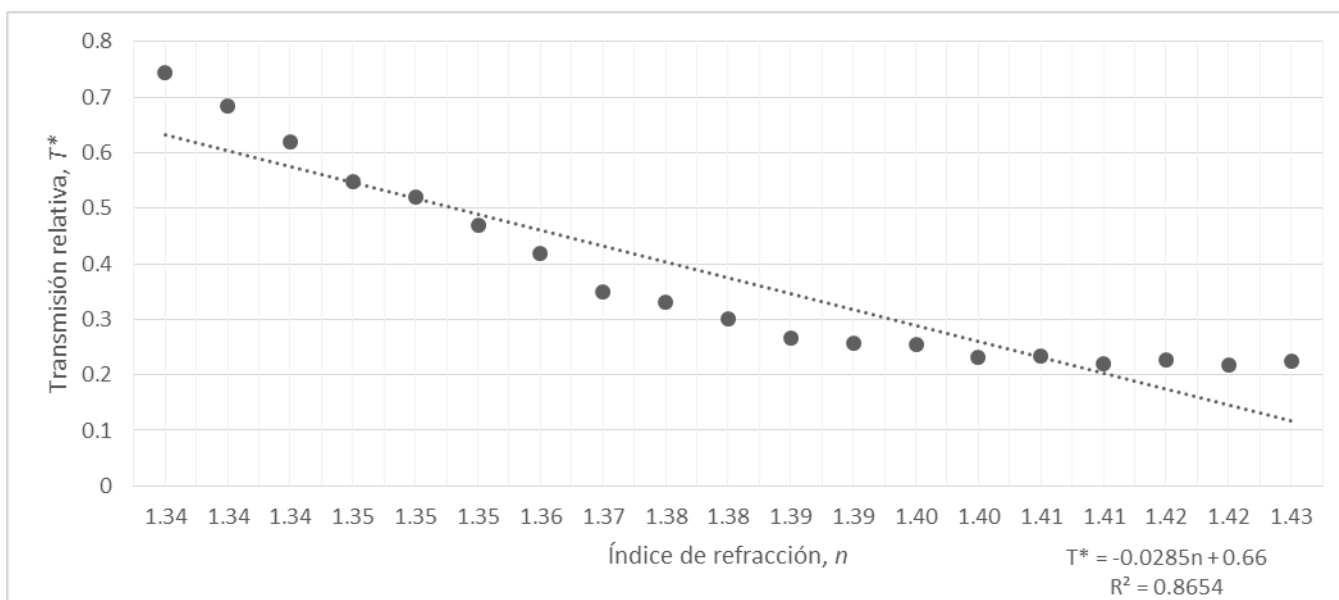


Figura 6.26. Índice de refracción,  $n$  vs Transmisión relativa,  $T^*$ , láser orientado a  $-45^\circ$  con respecto al eje  $x$ , elemento de detección semicilíndrico hueco.



Tabla 6.5. Ecuación lineal que describe el comportamiento del elemento de detección cilíndrico con luz polarizada.

Orientación del láser con respecto del elemento de detección	Ecuación lineal	R <sup>2</sup>
0°	$T^* = -0.0241n + 0.5855$	R <sup>2</sup> = 0.8256
90°	$T^* = -0.0444n + 0.7934$	R <sup>2</sup> = 0.847
45°	$T^* = -0.0416n + 0.7632$	R <sup>2</sup> = 0.9134
-45°	$T^* = -0.0285n + 0.66$	R <sup>2</sup> = 0.8654

De las figuras 6.23 a 6.26 se puede observar que al cambiar el estado de polarización lineal en la entrada del elemento de detección cambia la sensibilidad del mismo, en el elemento de detección hueco, al igual que en el elemento sólido, el rango de índices de refracción se mantiene casi constante, pero si se aproxima con una línea recta la respuesta del sensor la pendiente cambia hasta en un 46%.

Las pérdidas debidas a la polarización se calcularon como el cociente entre la intensidad máxima y la mínima para diferentes posiciones del polarizador, el resultado se muestra en la figura 6.27.

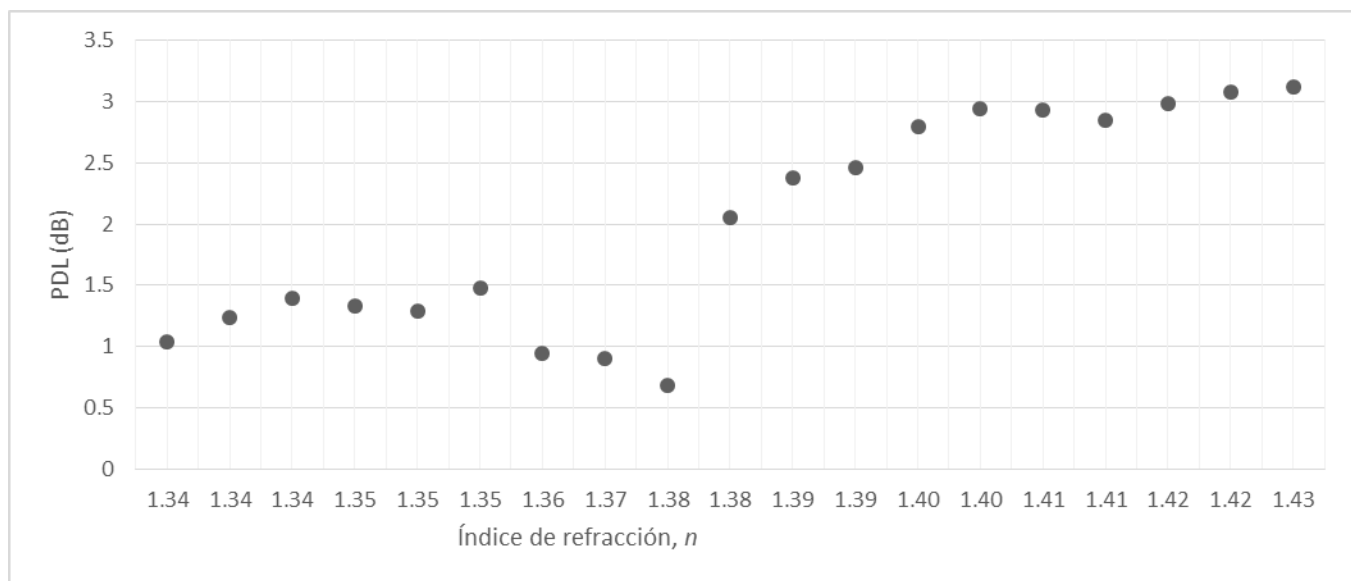


Figura 6.27. Pérdidas dependientes de la polarización con elemento de detección semicilíndrico.

Las pérdidas debidas a la polarización no son constantes para todos los índices de refracción (en el rango de índices medidos), se presentaron pérdidas mínimas de 0.6 dB y pérdidas máximas de 3.1 dB para el índice de refracción de 1.43.

### **E) Efectos de polarización de la luz en elemento en forma de semicilindro hueco (con ambas fibras ópticas, transmisora y receptora).**

Posteriormente se estudió la respuesta en el modo de transmisión del sensor con respecto a la distancia adimensional  $\Lambda=L/R$ . El sensor está formado por dos fibras ópticas de plástico una transmisora y una receptora figura 6.28 (2) y (5) de la marca Jiangxi Daisheng modelo CD-1000-1 con una apertura numérica de 0.5, índice de refracción del núcleo de 1.492, que están acopladas por medio de un elemento de detección de plástico semicilíndrico (4). La fibra óptica transmisora es conectada a una fuente láser (1) de Helio-Neón que emite una longitud de onda de 632.8 nm de luz polarizada marca JDSU Uniphase modelo 1507P-1 y la fibra óptica receptora es acoplada a un detector (6) con amplificación variable de la marca Thorlabs modelo PDA36A. Entre la fibra óptica transmisora y el elemento de detección se posicionó un polarizador lineal (3) marca Thorlabs modelo LPVISB05 para mantener el estado de polarización de la luz a la entrada del elemento de detección.

Las dos fibras ópticas se trasladaron en la dirección del eje x con desplazamientos de 10  $\mu\text{m}$ , simultáneamente y simétricamente con respecto al eje y. Se midió la intensidad en el fotodetector en 7 ocasiones y se procesó la información, el experimento fue repetido para diferentes posiciones del polarizador.

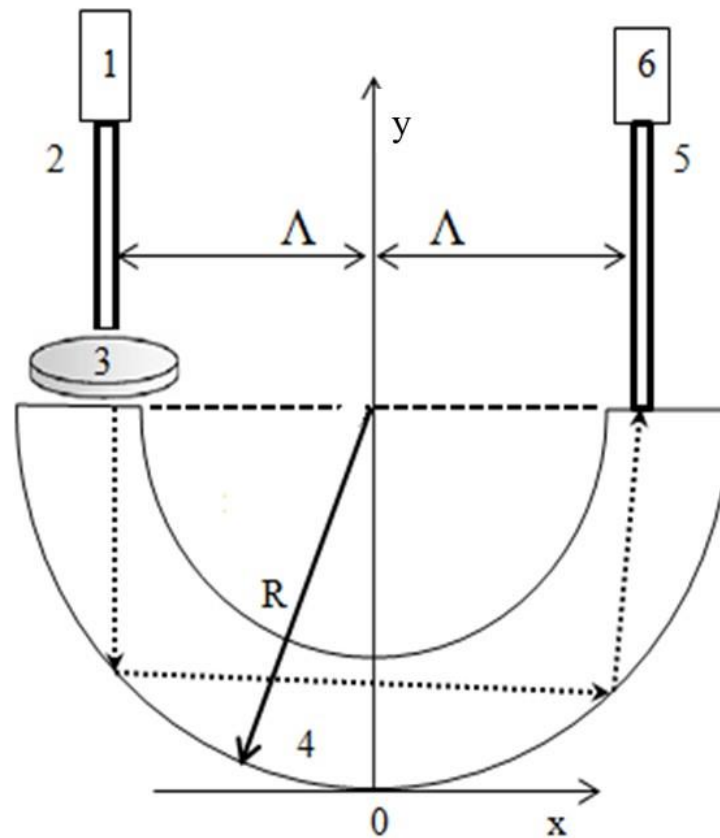


Figura 6.28. Sensor refractométrico con polarizador entre la fibra óptica transmisora y el elemento de detección.

Los resultados del estudio de la transmisión relativa del sensor  $T^* = I_{out}/I_{aire}$  a diferentes medios externos (líquidos con índices de refracción diferentes),  $I_{aire}$  es la intensidad de la luz en la fibra óptica receptora cuando el elemento de detección tiene como medio externo al aire. El polarizador lineal que se muestra en la figura 6.28 se colocó con diferentes ángulos con respecto del eje x.

Los resultados experimentales de la respuesta del sensor con respecto a la distancia relativa  $\Lambda$  se muestran en la figura 6.29.

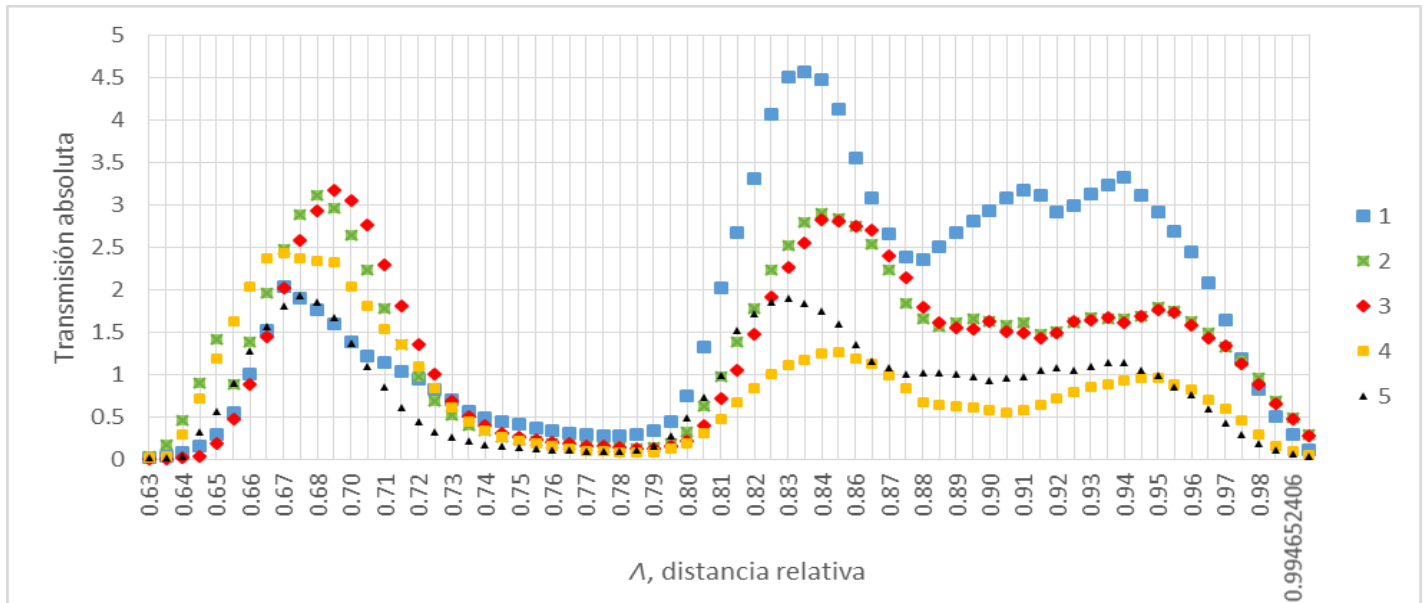


Figura 6.29. Distancia relativa vs Transmisión absoluta para diferentes posiciones del polarizador. (1) sin polarizador; (2) luz con polarización lineal vertical a  $90^\circ$  con respecto al eje x; (3) luz con polarización lineal horizontal a  $0^\circ$  con respecto al eje x; (4) luz con polarización lineal a  $45^\circ$  con respecto a eje x; (5) luz con polarización lineal a  $-45^\circ$  con respecto a eje x

Los resultados experimentales de la respuesta del sensor con respecto al índice de refracción externo se muestran en la figura 6.30, en la cual podemos observar que la posición de las ventanas de transmisión, en las cuales se presenta el máximo acoplamiento se mantiene, sin embargo la intensidad cambia al introducir el polarizador.

La figura 6.30 muestra la respuesta del sensor a soluciones con diferentes concentraciones de Cloruro de Calcio, los índices de refracción de las soluciones fueron medidas con un refractómetro marca Krüss modelo AR4D con una resolución de 0.0002 RIU. Se midió la intensidad en aire, posteriormente el sensor se sumergió en la solución con cloruro de calcio, se tomaron 7 mediciones a la misma temperatura y se promedió la intensidad de las 7 mediciones. Entre cada medición el sensor fue sumergido 3 veces en agua destilada para quitar cualquier residuo que pudiera haber quedado de la medición anterior.

Los índices de refracción de las soluciones medidos por el refractómetro Krüss fueron: 1, 1.3335, 1.3365, 1.34, 1.3435, 1.347, 1.351, 1.3545, 1.3665, 1.372, 1.376, 1.3815, 1.387, 1.396, 1.3985, 1.403 y 1.4095.

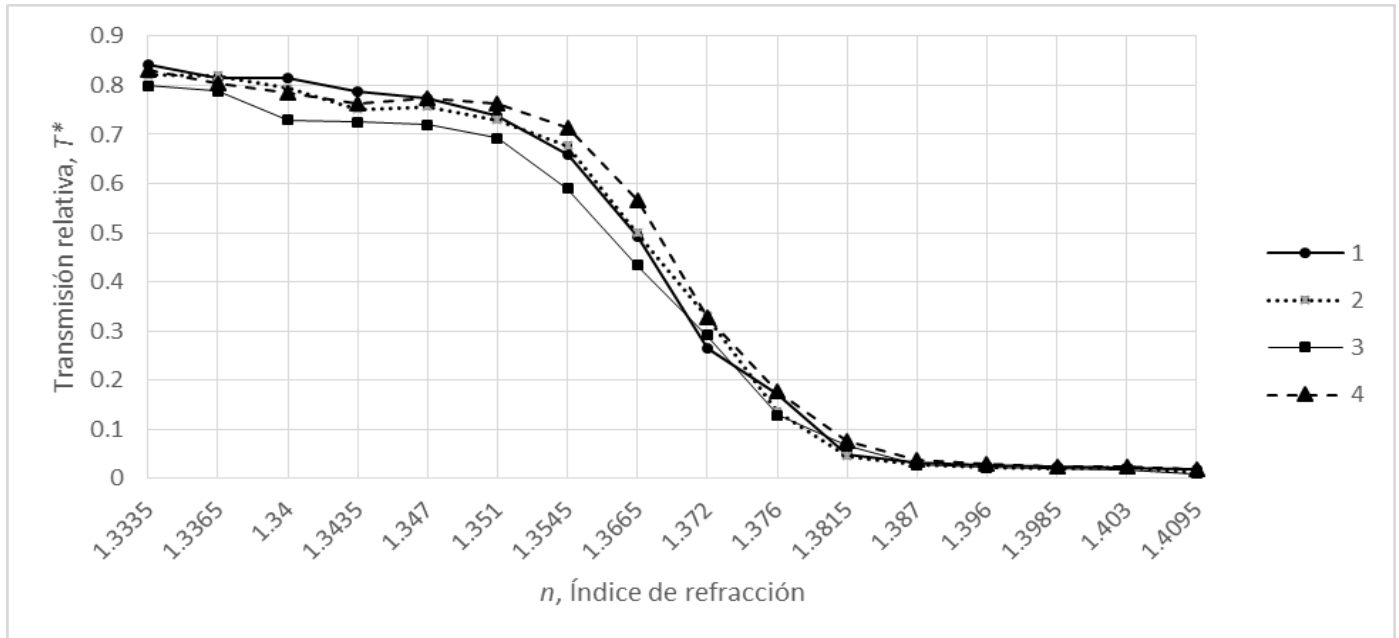


Figura 6.30. Índice de refracción,  $n$  vs Transmisión relativa,  $T^*$  para diferentes posiciones del polarizador; (1) luz con polarización lineal vertical a  $90^\circ$  con respecto al eje  $x$ ; (2) luz con polarización lineal horizontal a  $0^\circ$  con respecto al eje  $x$ ; (3) luz con polarización lineal a  $45^\circ$  con respecto a eje  $x$ ; (4) luz con polarización lineal a  $-45^\circ$  con respecto a eje  $x$

## Análisis de Resultados

Los datos de la figura 6.29 demuestran que el estado de polarización de la luz a la entrada sufre un cambio significativo al ser transmitido por el sensor en cada zona de transmisión. Esta propiedad puede ser explotada para modificar las características del sensor para diferentes posiciones de la distancia relativa  $\Lambda$ .

La figura 6.30 demuestra que la polarización de la luz a la entrada tiene un efecto sobre la intensidad a la salida del sensor.

## 6.4. Conclusiones

1. Los resultados del experimento descrito en este Capítulo en general confirman las predicciones teóricas del capítulo 5 de esta tesis al demostrar que la respuesta del sensor varía notablemente en función de la orientación del plano de polarización de la luz linealmente polarizada de la entrada; esto fue verificado para dos configuraciones: sin fibra óptica de entrada y con una fibra óptica en la entrada al sensor (fibra óptica transmisora). Experimentalmente, se observó una variación de la intensidad de la luz en la salida del sensor de 28% en promedio, un valor en buena concordancia con las predicciones teóricas (21%).
2. También, se confirmó experimentalmente que la variación del plano de polarización de la luz de entrada no tiene efecto significativo sobre la linealidad de la respuesta  $T^*(n)$  y la posición de escalón principal de esta característica sobre el eje de índice externo de refracción  $n$ .
3. El experimento demostró que la variación del plano de polarización de luz linealmente polarizada de entrada al elemento de detección semicilíndrico tanto sólido como hueco tiene efecto moderado (hasta 5 %) sobre la transmisión relativa y sensibilidad del sensor al índice externo de refracción; sin embargo el efecto no es suficientemente grande para justificar el control de la polarización de la luz con la finalidad de aumentar dicha transmisión y/o sensibilidad.
4. Sin embargo, la variación no controlada de estado de polarización de la luz de entrada causada por factores ambientales puede causar un ruido en la salida del sensor y alterar el resultado de medición del índice externo de refracción. Para minimizar dicho ruido es importante tomar en cuenta los efectos en cuestión en el proceso de diseño del sensor.
5. Una de las soluciones a este problema consiste en el uso de las fuentes de luz no polarizadas y evitación de una polarización parcial de la luz en fibra óptica transmisora, tal como causada por el doblado de la fibra óptica.
6. En resumen, se demostró experimentalmente la necesidad de considerar y controlar la polarización (o depolarización) de la luz de entrada al elemento de detección de cualquiera forma geométrica ya que el estado de polarización de la luz tiene efecto significativo sobre la respuesta del sensor al índice externo de refracción.
7. El experimento se realizó con elementos de detección y fibras ópticas multimodales de plástico, por lo cual los sensores desarrollados son totalmente compatibles a nivel de capa física con las redes locales de telecomunicaciones que emplean las fibras ópticas multimodales de materiales plásticos.

## Conclusiones Generales

1. Las fibras ópticas de materiales plásticos presentan un recurso tecnológico importante para redes locales de datos y sensado de diversas cantidades físicas al bordo de vehículos, en las plantas, fábricas y otras localidades relativamente pequeñas. Por esto, el desarrollo de nuevos sensores compatibles con dichas fibras ópticas – es decir, basados en fibras ópticas de plástico del mismo tipo y características que las fibras plásticas para redes de telecomunicación - es un problema importante y actual.
2. Los sensores de plasmón superficial implementados en fibras ópticas de plástico parecen atractivos por su bajo costo, pero varias técnicas de fabricación que fueron probadas por diferentes autores tienen varias deficiencias; la principal es que la vida en un líquido de las muestras fabricadas es muy corta (de orden de un minuto), por lo cual todavía falta encontrar las técnicas para el aumento de este tiempo de vida; por lo menos por un factor de cinco, para que estos sensores sean competitivos.
3. Dentro de los sensores basados en reflexión controlada por el medio externo en un elemento externo óptico de detección, los sensores basados en elementos semicilíndricos sólidos y huecos suficientemente largos permiten la implementación de arreglos grandes de sensores individuales refractométricos para mediciones del nivel de diversos líquidos en tanques y recipientes.
4. Los elementos de detección semicilíndricos e huecos tienen ciertas zonas de transmisión en función de la posición relativa de las fibras ópticas con respecto al elemento de detección; este parámetro igual que la apertura lineal y angular de las fibras ópticas tiene un efecto significativo sobre la respuesta del sensor al índice externo de refracción: el rango de medición del índice externo de refracción, sensibilidad (el gradiente de la respuesta) y la linealidad de la misma.
5. El presente trabajo proporciona datos amplios cuantitativos teóricos y experimentales sobre las propiedades de los sensores bajo diferentes combinaciones de sus parámetros geométricos y ópticos.
6. Un resultado particular de este trabajo es el descubrimiento de nuevas propiedades de las zonas de bajo acoplamiento que son útiles en la refractometría de líquidos de índice muy bajo; estas singularidades de zonas de bajo acoplamiento no fueron conocidos anteriormente.
7. Los resultados de este trabajo por primera vez revelan también los efectos de polarización de luz sobre la respuesta del sensor al índice externo de refracción, dicha respuesta varía notablemente en función de la orientación del plano de polarización de la luz linealmente polarizada de la entrada; la variación es de hasta

- 18%, por lo cual es indispensable tomar en cuenta los efectos de polarización de la luz en el diseño e implementación del sensor.
8. La variación del plano de polarización de la luz de entrada no tiene efecto significativo ni sobre la linealidad de la respuesta del sensor al índice externo de refracción ni sobre el rango de medición de dicho índice; sin embargo, cambia el acoplamiento óptico, la sensibilidad del sensor y la intensidad de la señal de salida.
  9. Dichos cambios en elementos de detección semicilíndricos tanto sólidos como huecos son moderados (28% en promedio) y no brindan ninguna ventaja significativa que pueda justificar un control de la polarización de la luz con la finalidad de aumentar, por ejemplo, la sensibilidad del sensor.
  10. Por otro lado, la variación no controlada aleatoria de estado de polarización de la luz de entrada (tal como causada por factores ambientales) presenta una fuente de ruido que puede alterar el resultado de medición del índice externo de refracción. Por esto, es importante considerar los efectos de polarización de la luz en el diseño del sensor.
  11. Una de las medidas para combatir dicho ruido es el uso de las fuentes de luz no polarizada y precauciones pertinentes para evitar una polarización parcial de la luz en fibra óptica transmisora, tal como causada por el doblado de la fibra óptica.
  12. En resumen, los resultados de este trabajo proporcionan una base sólida teórica, experimental y tecnológica para el desarrollo, fabricación e introducción en la práctica de los sensores refractométricos con elementos externos de detección de forma semicilíndrica y arreglos de dichos sensores ubicados sobre elemento de detección suficientemente largo único de plástico para aplicaciones tales como la medición óptica de niveles de líquidos en tanques, contenedores y recipientes en industria y en diversos medios de transporte; estos sensores son totalmente compatibles a nivel de capa física con las redes locales de telecomunicaciones que emplean las fibras ópticas multimodales de materiales plásticos.



### Anexo 1. Respuesta del sensor teórica al índice de refracción con elemento de detección semicilíndrico, para diferentes posiciones de las fibras ópticas

La tabla presentada en este anexo muestra la ecuación lineal que describe la respuesta del sensor para cada una de las posiciones simétricas relativas de las fibras ópticas ( $\Delta$ ), se utilizó un modelo de regresión lineal para realizar el ajuste de los datos de las simulaciones, se calculó el coeficiente de determinación para evaluar si la ecuación lineal describe los resultados de la simulación o si había que buscar otro método de ajuste

Posición de las fibras, $\Delta$	Ecuación	R <sup>2</sup>	Intervalo de detección		$\Delta n$
			$n_{\min}$	$n_{\max}$	
0.64	$T^* = -0.0069 \cdot n + 0.6816$	R <sup>2</sup> = 0.8928	1.004	1.102	0.098
0.65	$T^* = -0.009 \cdot n + 0.6533$	R <sup>2</sup> = 0.8442	1.00100	1.07300	0.072
0.66	$T^* = -0.0165 \cdot n + 0.6666$	R <sup>2</sup> = 0.8495	1.00300	1.04400	0.041
0.67	$T^* = -0.0209 \cdot n + 0.8334$	R <sup>2</sup> = 0.967	1.00400	1.04300	0.039
0.68	$T^* = -0.0178 \cdot n + 0.8855$	R <sup>2</sup> = 0.992	1.00500	1.05000	0.045
0.69	$T^* = -0.0155 \cdot n + 0.8967$	R <sup>2</sup> = 0.9964	1.01000	1.06200	0.052
0.7	$T^* = -0.0153 \cdot n + 0.9023$	R <sup>2</sup> = 0.9953	1.02100	1.07400	0.053
0.71	$T^* = -0.0154 \cdot n + 0.8984$	R <sup>2</sup> = 0.9955	1.034	1.088	0.054
0.72	$T^* = -0.0155 \cdot n + 0.9181$	R <sup>2</sup> = 0.9961	1.044	1.098	0.054
0.73	$T^* = -0.0155 \cdot n + 0.9457$	R <sup>2</sup> = 0.9963	1.053	1.109	0.056
0.74	$T^* = -0.0147 \cdot n + 0.9794$	R <sup>2</sup> = 0.9876	1.06	1.119	0.059
0.75	$T^* = -0.015 \cdot n + 0.9851$	R <sup>2</sup> = 0.9874	1.071	1.13	0.059
0.76	$T^* = -0.0141 \cdot n + 1.0279$	R <sup>2</sup> = 0.9629	1.078	1.141	0.063
0.77	$T^* = -0.0178 \cdot n + 1.0244$	R <sup>2</sup> = 0.9773	1.102	1.155	0.053
0.78	$T^* = -0.024 \cdot n + 0.8727$	R <sup>2</sup> = 0.9833	1.133	1.167	0.034
0.79	$T^* = -0.0265 \cdot n + 0.8878$	R <sup>2</sup> = 0.9889	1.146	1.177	0.031
0.8	$T^* = -0.0271 \cdot n + 0.9085$	R <sup>2</sup> = 0.989	1.155	1.187	0.032
0.81	$T^* = -0.0269 \cdot n + 0.8964$	R <sup>2</sup> = 0.9906	1.164	1.195	0.031

0.82	$T^* = -0.0298 \cdot n + 0.8807$	$R^2 = 0.9804$	1.174	1.202	0.028
Posición de las fibras, $\lambda$	Ecuación	$R^2$	Intervalo de detección		$\Delta n$
			$n_{\min}$	$n_{\max}$	
0.83	$T^* = -0.0088 \cdot n + 0.7225$	$R^2 = 0.898$	1.187	1.26	0.073
0.84	$T^* = -0.0103 \cdot n + 0.9767$	$R^2 = 0.9597$	1.21	1.284	0.074
0.85	$T^* = -0.0116 \cdot n + 1.0118$	$R^2 = 0.966$	1.223	1.294	0.071
0.86	$T^* = -0.0117 \cdot n + 1.0384$	$R^2 = 0.9465$	1.231	1.303	0.072
0.87	$T^* = -0.0191 \cdot n + 0.9548$	$R^2 = 0.9978$	1.268	1.312	0.044
0.88	$T^* = -0.0234 \cdot n + 0.9374$	$R^2 = 0.9981$	1.283	1.319	0.036
0.89	$T^* = -0.0244 \cdot n + 0.9341$	$R^2 = 0.9989$	1.293	1.326	0.033
0.9	$T^* = -0.0127 \cdot n + 0.8584$	$R^2 = 0.922$	1.294	1.365	0.071
0.91	$T^* = -0.0091 \cdot n + 0.9549$	$R^2 = 0.9791$	1.3	1.382	0.082
0.92	$T^* = -0.0152 \cdot n + 0.9767$	$R^2 = 0.9709$	1.336	1.387	0.051
0.93	$T^* = -0.0179 \cdot n + 1.0265$	$R^2 = 0.9264$	1.351	1.396	0.045
0.94	$T^* = -0.0222 \cdot n + 0.8759$	$R^2 = 0.9734$	1.371	1.398	0.027
0.95	$T^* = -0.022 \cdot n + 1.0568$	$R^2 = 0.9324$	1.363	1.402	0.039

## Polarization effects in a fiber-optical refractometric sensor with semi-cylindrical plastic detection element

S. Perez-Garcia, S. Khotiaintsev

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Coyoacán, México, D.F., 52-55-5622-3074

### ABSTRACT

We investigated experimentally the response of the fiber-optical refractometric sensor with semi-cylindrical plastic detection element under different polarization states of the input light. Our results demonstrate that the state of polarization of light in such sensor has a significant effect on sensor response to the external refractive index. This property can be exploited, in particular, for adjusting the form and linearity of sensor response in situations when such adjustment cannot be achieved by modification of sensor geometrical parameters and material constants.

**Keywords:** fiber-optic sensor, optical refractometry, refractive index measurement, polarization of light.

### INTRODUCTION

The fiber-optical sensors represent a valuable resource in a vast variety of applications in the science and industry. Fiber optic sensors offer many advantages over traditional mechanic, electric and other sensors. These advantages include small size, low-weight and flexibility, immunity to electromagnetic interference and noise, high resistance to chemical corrosion and absence of a spark hazard<sup>1-3</sup>.

In our previous papers we described an intensity-type fiber-optical refractometric sensor with semi-cylindrical plastic detection element<sup>4-6</sup>. In this paper, we investigate the effect of polarization of light in the performance of this sensor.

### SENSOR DESCRIPTION

The sensor consists of a pair of plastic optical fibers (2) and (5) that are connected to a semi-cylindrical optical detection element (4) of transparent plastic material as shown in Figure 1a. One optical fiber is connected to a remote optical source (1) and the other one to a photo detector (6). The two optical fibers (2) and (5) are coupled via internal reflections of light at the semi-cylindrical working surface of the optical detection element. The output light intensity is a function of the refractive index of sensor material, optical fiber parameters, position of the optical fibers with regard to the optical detection element, and the external refractive index  $n$  (the variable to be measured).

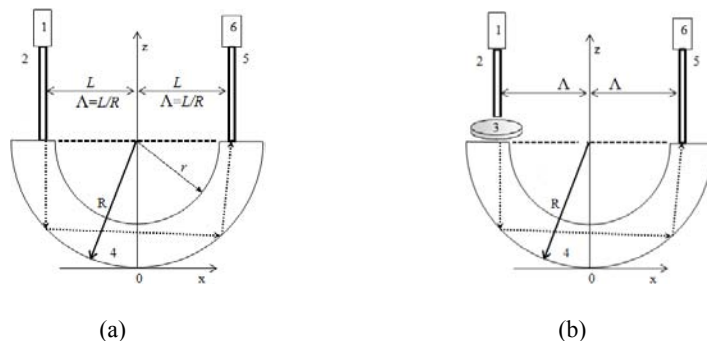


Figure 1. (a) Generic sensor schematic; (b) configuration with the control of state of polarization of the input light. 1 – light source, 2 – transmitting optical fiber, 3 – linear polarizer, 4 – optical detection element, 5 – receiving optical fiber, 6 – photo detector. Optical reflection at a surface is a function of the incident light polarization. Therefore, it is of interest to investigate its effect with regard to the present sensor, as it might be exploited for adjusting the response function of the sensor to the requirements of particular users.

## METHODOLOGY

First, we experimentally studied changes in the state of polarization of light at the detection element exit as a function of the state of polarization of the input light. The respective experimental arrangement is shown in Figure 2. The external medium was the air and distilled water at 20 C°. The light source was a He-Ne non-polarized laser (JHS Uniphase model 1507-1) with a peak emission at a wavelength of  $\lambda = 632.8$  nm. The light passed through a linear polarizer (Thorlabs LPVISB05) that allowed us to set the plane of polarization of the input light,  $\theta$ . A quarter wave plate (Thorlabs WPQ05M-546) and a polarization analyzer (Thorlabs LPVISB05) was placed at the detection element exit. The output light intensity was measured by means of a photo detector (Thorlabs PDA36A).

To access the state of polarization, we performed six measurements that allowed us to calculate the Stokes parameters:  $P_H$  (linear polarizer at  $\theta = 0^\circ$ ),  $P_V$  (linear polarizer at  $\theta = 90^\circ$ ),  $P_{45}$  (linear polarizer at  $\theta = 45^\circ$ ),  $P_{135}$  (linear polarizer at  $\theta = 135^\circ$ ),  $P_R$  (right circular polarizer),  $P_L$  (left circular polarizer)<sup>7</sup>.

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_H + P_V \\ P_H - P_V \\ P_{45} - P_{135} \\ P_R - P_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

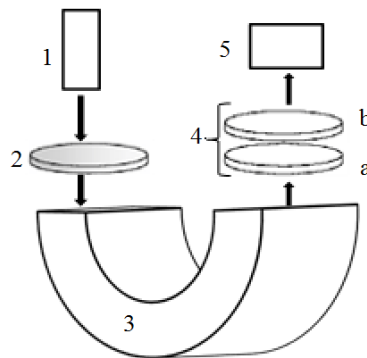


Figure 2. Schematic of the experimental arrangement for accessing the Stokes parameters: 1 - He-Ne laser, non-polarized, 2 - linear polarizer, 3 - optical detection element, 4 - analyzer (a - rotating retarder, b - fixed linear polarizer), 5 - photo detector.

Second, we accessed sensor transmission in the air against the dimensionless distance  $\Lambda = L/R$  (see Figure 1). We employed two plastic optical fibers (2) and (5) of dimensionless core diameter  $d = 0.033$  and  $NA = 0.2$ . A linear polarizer (3) was placed at the detection element entrance with its plane of polarization at an angle  $\theta$  with regard to the element's  $y$ -axis. The two fibers (2) and (5) were translated in the  $x$ -direction, simultaneously and symmetrically with regard to the element's plane of symmetry  $x$ - $z$ . The intensity of the output light,  $I_{out}$ , was measured with the photo detector (6) and respective data stored in a computer. This was repeated for different angular positions of the polarizer (3).

Third, sensor relative transmission  $T^* = I_{out}/I_{air}$ ,  $I_{air}$  is the output light intensity when the detection element is in the air, was accessed as a function of the external refractive index with the state of polarization of input light as parameter.

**RESULTS**

The measured Stokes parameters of light at the detection element exit were  $S_1 = 0.529$ ,  $S_2 = -0.736$ ,  $S_3 = -0.407$  with the detection element in the air and  $S_1 = -0.412$ ,  $S_2 = -0.187$ ,  $S_3 = 0.892$  with the detection element in the water. The two polarization states are displayed graphically on the Poincare sphere in Figure 3. The longitudinal lines in Figure 3 represent the elasticity angle and the latitudinal lines represent the orientation angle. All together, the data in Figure 3 demonstrate that the output state of polarization in the present sensor is a function of the external refractive index. Moreover, the state of polarization of the input light has quite a significant effect on the transmission of the sensor. Thus, this property can be exploited for different purposes in the sensor.

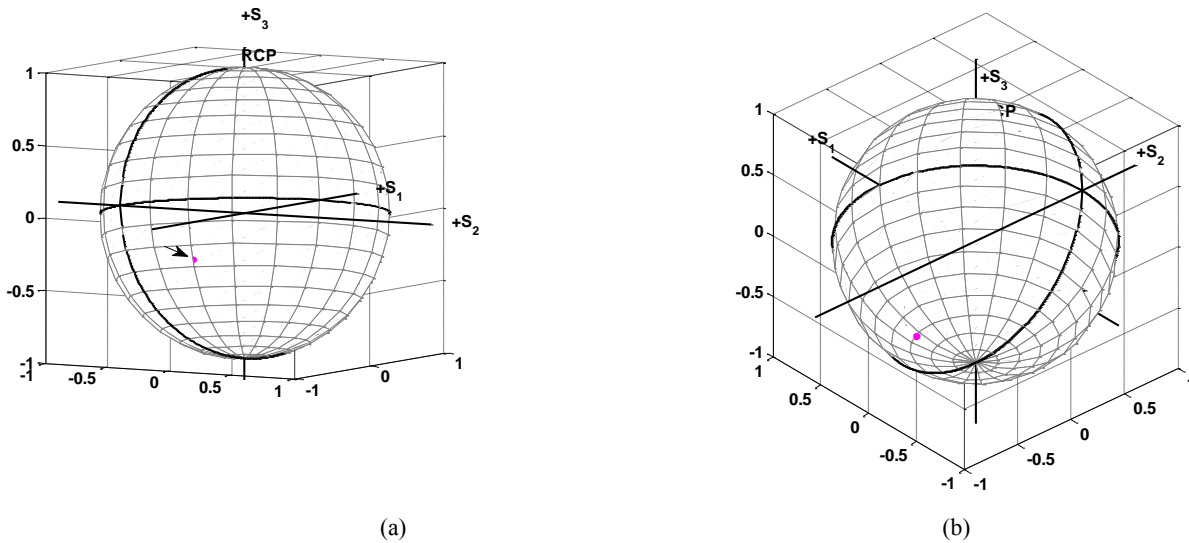


Figure 3. The Poincare sphere and the state of polarization of light at the detection element exit for different external medium: the air (a) and water (b).

Experimental graphs of the dimensionless output light intensity  $I = I_{out}/I_{out\ max}$  as a function of the dimensional distance  $\Lambda$  with the state of polarization of the input light as parameter are plotted in Figure 4a. Each peak in Figure 4a corresponds to a dimensional distance  $\Lambda$ , at which strong coupling of the two optical fibers (a “transmission zone”) exists due to serial internal reflections of light at the element’s working surface <sup>8</sup>.

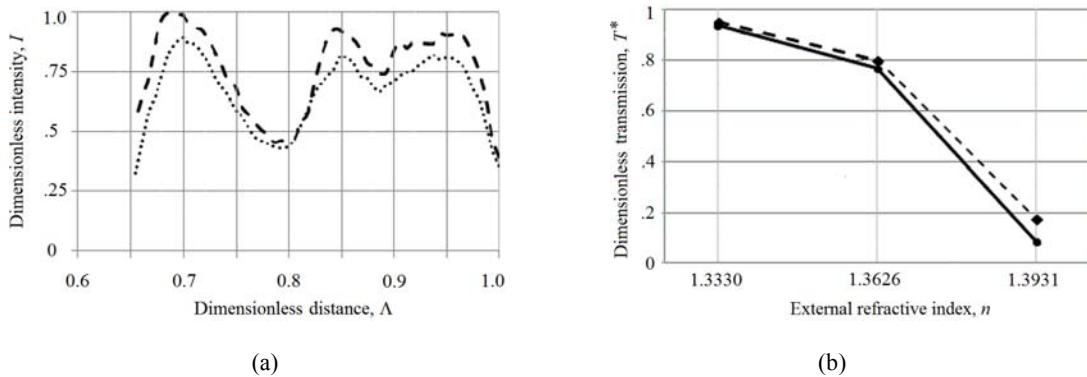


Figure 4. (a) Dimensionless intensity of the transmitted light  $I$  vs. dimensional distance  $L$  for polarizer at  $0^\circ$  (---) and  $90^\circ$  (· · ·). (b) Relative transmission  $T^*$  vs. the external refractive index for non-polarized light (—) and linearly polarized light at  $\theta = \dots$  (---).

The data in Figure 4a demonstrate that the state of polarization of the input light has a significant effect on the optical transmission in the sensor in each transmission zone. Therefore, the observed property is general in nature and can be exploited for modifying the sensor characteristic  $T(n)$  for any parameter  $\Lambda$ .

Figure 4b shows sensor relative transmission  $T^*$  against the external refractive index for water, ethylene glycol of 30% by weight ( $\cdot \cdot \cdot$ ) and 60% by weight ( $---$ ). The observed difference in relative transmission for different states of polarization allows for modifying the form and range of sensor response function by controlling the state of polarization of the input light.

## CONCLUSIONS

We investigated experimentally the response of the fiber-optical refractometric sensor with semi-cylindrical plastic detection element under different polarization states of the input light. Our results demonstrate that the state of light polarization in such sensor has a significant effect on sensor response to the external refractive index. This property can be exploited, in particular, for adjusting the form and linearity of sensor response *in* situations when such adjustment cannot be achieved by modification of sensor geometrical parameters and material constants.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the support of the General Directorate of the Academic Personnel (DGAPA) and the Faculty of Engineering of the National Autonomous University of Mexico [research grants PAPIIT IN117512 and PAPIME PE104811]. S. P. G. acknowledges the scholarship provided by the Coordination of Graduate Studies (CEP) of the UNAM.

## REFERENCES

1. *Handbook on Optical Fiber Sensor Technology*/López-Higuera, J.M., Ed. John Wiley and Sons, 2002.
2. Meggitt, B.T. and Grattan, K. T. V., *Optical Fiber Sensor Technology*. Vol. 1, Ed. Chapman&Hall, (1995).
3. Yu, F. T. S. and Yin, S., *Fiber Optic Sensors*, 1<sup>st</sup> ed., Marcel Dekker, New York, 2002.
4. Khotiaintsev, S., Llanito-Caudillo, E., Perez-García S. and Morales-Farah J., "Optical-fiber refractometric sensor with semi-cylindrical optical detection element for measuring the level of gasoline," Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA 2009), 468-473 (2009).
5. Khotiaintsev, S., Llanito-Caudillo, E., Perez-García S., and Morales-Farah J., "Discrete POF liquid-level sensor for measuring the level of gasoline and detecting water in automobile tanks," The 18<sup>th</sup> International Conference on Plastic Optical Fibers (2009).
6. Khotiaintsev, S., Perez-García S., Beltran-Hernández, A., Llanito-Caudillo, E., "Plastic optical fiber multipoint liquid-level sensor with single semi-cylindrical detection element," Proc. SPIE 7839, 78391P (2010).
7. *Handbook of Optics*. Vol. 2 Polarization / Bennett, J.M., Ed. McGraw-Hill, New York, 13.1-13.58, 2010.
8. Svirid, V., Khotiaintsev S.N. and Swart, P.L., "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element," Optical Engineering 41(04), 779-787 (2002).
9. Svirid, V., Khotiaintsev S.N. and Swart, P.L., "Linear and steplike characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element," Optical Engineering 42(05), 1383-1389 (2003).

# Optical Intensity-Type Refractometer for Remote Measurements Via Fiber-Optic Cables

Sergei Khotiaintsev, *Senior Member, IEEE*, Carlos E. Garcia-Guerra, Jordi E. Morales-Farah, Selene Perez-Garcia, and Luis E. Yam-Ontiveros

(Invited Paper)

## I. INTRODUCTION

**Abstract**—We present a fiber-optic refractometer with intensity-type transducer which can operate remotely via long fiber-optic cables. This version of the refractometer is intended for accessing the concentration of aqueous solutions of sodium chloride in the range from zero to about 145 % ( $1.327 < n < 1.353$  at  $\lambda = 940$  nm and 25 C°), which is of significant practical interest for industrial users. We address the relationship between the span and linearity of the intensity-type optical transducer with spherical working surface which we employ in the refractometer. We optimized the transducer for the specified measurement range and achieved good sensitivity and non-linearity as small as 0.05. We significantly reduced the negative effect of the unstable optical loss of the fiber-optic cables, variation of the optical source power and photo-detector response on the readings of the refractometer by using an optical bridge configuration followed by an analogue optoelectronic signal processing unit. The refractometer has a parasitic variation of its output as low as 1.5 % under a total variation of the optical source power and a fiber-optic cable loss of 20 dB. Potential applications of this refractometer include the *in-situ* characterization of various liquids such as the sodium chloride salt-brine solutions in food industry.

**Index Terms**—refractive index measurement, optical refractometry, refractometer, fiber-optic transducer, optical fiber sensor, balanced optical bridge.

Manuscript received June 30, 2011. This work was supported by the Faculty of Engineering and Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) – Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) under Grant IN114109 and PE104811, and by the National Science and Technology Council of Mexico (CONACYT) under Grant 026106. Selene Perez-Garcia was supported by the scholarship provided by the Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP) of UNAM.

S. Khotiaintsev was with the National Technical University of Ukraine, 03056, Kiev, Ukraine. He is now with the Faculty of Engineering, UNAM, 04360, Mexico, D. F. (e-mail: sergeikh@hotmail.com).

C. E. Garcia-Guerra was a student of the Faculty of Engineering, UNAM, 04360, Mexico, D. F. He is now with the Huawei Technologies de Mexico (e-mail: carlosenrique.gg@gmail.com).

S. Perez-Garcia is with the Faculty of Engineering, UNAM, 04360, Mexico, D. F. (52-55-5622-3055; fax: 52-55-5616-1855; e-mail: mirek925@gmail.com).

J. E. Morales-Farah was a student of the Faculty of Engineering, UNAM, 04360, Mexico, D. F. He is now with the Master Optics in Science and Technology program, Institut d'Optique Graduate School, 91127, Palaiseau, France (e-mail: jordi.e.morales@gmail.com).

L. E. Yam-Ontiveros was a student of the Faculty of Engineering, UNAM, 04360, Mexico, D. F. He is now with Department of Signal Theory and Communications, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034, Barcelona, Spain (e-mail: eduardoyam@gmail.com).

Optical sensing techniques offer attractive solutions to the *in situ*, remote and distributed measurement of different physical quantities. In such applications, the main advantage of fiber-optic over the electrical sensors consists in the optical nature of signals, which makes the measurement system immune to the electromagnetic noise and interference. Also, the fiber-optic sensors usually require less space for their deployment and feature increased operational safety [1]-[4]. Due to their distinctive characteristics, the fiber-optic sensor systems are good candidates for measuring various physical quantities in industrial and natural environments as well as for the development of local area sensor networks.

Optical refractometry is widely used for accessing concentration of diverse substances in water and other liquids. Also, it allows one to access other physical quantities, since the refractive index of a medium is a function of its physical characteristics. The highest sensitivity to the external refractive index is achieved in the surface plasmon resonance (SPR) sensors [5]-[7], fiber Bragg gratings (FBG) [8], [9], combination of SPR and tilted FBG [10], long period fiber gratings (LPFG) [11]-[14], mixed FBG and LPG [15], and tapered holey fibers with resonance transmission [16], [17]. Another proposed sensor suggests exploiting the whispering gallery modes at capillaries [18]. However, these sensors employ spectral interrogation which is both, complex and expensive (Some SPR sensors employ intensity interrogation [19], [20]). In contrast, the intensity-modulated refractometric sensors are simple, reliable, and competitive in real-world applications [21]-[25].

Adjusting response characteristic of a sensor to a required range of the external refractive index as well as achieving a sufficient linearity and good sensitivity are some of the principal problems in the development of intensity-modulated refractometric sensors. Although modern digital linearization techniques allow the compensation of the non-linearity, linear sensors are more competitive in the real world.

Another significant drawback of intensity-modulated sensors is the need to overcome the random intensity variation produced by changes in the attenuation of the fiber-optic cables, intensity variation of the optical source



and instability of the receiver. There are several methods used to overcome these effects. One group of methods is based on balancing all losses in a system except for those from the transducer by means of the optical bridging [26], [27]. Another group of methods employs referencing, with the reference signal bypassing the transducer [28] and different interferometric referencing techniques [29]-[31].

In our previous theoretical works [32], [33] we described an intensity-modulated optical refractometric transducer consisting of a glass detection element with the spherical working surface integrated with two multimode optical fibers.

It is an evanescent-field transducer which employs an internal reflection of light at the working surface for sensing the external refractive index. This transducer is simple and robust, but in general case its response to the external refractive index is nonlinear. For this reason, this transducer was previously used only in the binary detection mode [34]-[36]. Here, we consider a non-binary detection mode. In contrast to the previous scheme, we use non-symmetric parameters of the transducer in order to achieve linearity and good sensitivity in accessing the concentration of aqueous solutions of sodium chloride. Sodium chloride is widely used in food industry in a form of salt-brine solutions of various concentrations. In addition, the refractive index of some lubricating oils and cooling liquids fits into the same range of the refractive index. Therefore, many fiber-optic sensors target the water salinity [6], [19], [37-39].

Intensity-modulated sensors in the binary detection mode are almost immune to system instability provided the detection threshold is correctly designed. In contrast, the non-binary detection mode requires that all system instabilities (except those produced by the transducer) are excluded from the sensor readings. Therefore, here we address this issue with regard to our refractometer.

We also provide the description of the refractometric transducer which we redesigned and optimized for the present application. Moreover, we describe the design procedure that allowed us to optimize the response function of the transducer in the desired range of the external refractive index. This is complimented by the experimental data on the transducer performance. Finally, we describe the implementation of the refractometer in a configuration of the balanced optical bridge circuit, which provides the refractometer with sufficient immunity to fluctuations of source intensity and system loss.

## II. TRANSDUCER DESCRIPTION

The transducer is shown in Fig. 1. It consists of three principal elements: lead-in (1) and lead-out (2) multimode

optical fibers, and a solid glass detection element (3). The three elements (1), (2), and (3) are monolithically integrated in a single unit. The transducer is connected to a remote light source and a photo-detector (not shown in Fig. 1). The two optical fibers (1) and (2) are coupled via several serial partial or total internal reflections of the optical beam at the spherical surface  $S$ . The reflection coefficient depends on the external refractive index  $n$ , therefore, the optical transmission of the transducer is a function of this quantity, and it also depends on the optical and geometrical parameters of the transducer. The spherical working surface has the focusing properties which contribute to efficient optical coupling and small intrinsic non-liquid-dependent optical loss of the transducer under proper relative position of the three above-mentioned elements.

In principle, this transducer can be employed in a reflective configuration with only one optical fiber. But, such a design requires the use of a directional coupler at the transmitter-receiver end. It could increase the complexity and cost, and reduce reliability of the complete system.

## III. DESIGN AND OPTIMIZATION OF THE TRANSDUCER

The intended application of this refractometer is to access the concentration of aqueous solutions of sodium chloride by measuring its refractive index (The relationship between the concentration of a solute in a solution and its refractive index represents a separate problem and is beyond the scope of this article). More specifically, we target the lower part of the full physically possible range of sodium chloride concentration in water: from zero to 145 ‰, in a view of its importance for many industrial users, such as in food industries. The respective range of the refractive index for a NaCl solution is  $1.327 < n < 1.353$  at  $\lambda = 940$  nm and  $25$  C° [40], [41] (The works [6], [19] and [37] target the same range).

The elaboration of the transducer was performed by means of an iterative procedure comprising design, analysis, and optimization. The light propagation analysis in the transducer was carried through the numerical ray-tracing using a specially developed three-dimensional mathematical model [42]. The light beam was modeled by 200,000 geometrical rays. The angular and Cartesian coordinates of each ray at the end face of the lead-in optical fiber were assigned in a statistically random manner by means of the Monte-Carlo algorithm. The respective software was implemented in the Visual Basic



programming language in an efficient and user-friendly manner [43].

We assumed a semi-spherical glass detection element (3) of refractive index  $n_e$  and radius  $R$ , two multimode optical fibers (1) and (2) of dimensionless core diameter  $\Phi_1=d_1/R$  and  $\Phi_2=d_2/R$ , each having numerical aperture in the air  $NA_1$  and  $NA_2$ , and dimensionless distance between the fiber axis and the longitudinal axis of the transducer  $\Lambda_1=L_1/R$  and  $\Lambda_2=L_2/R$ , respectively. The ray tracing was performed within the semi-sphere. The relative transmission  $T^*$  was calculated as  $T^*(n)=I(n)/I_a$ , where  $I(n)$  is the light intensity at the transducer output (which is a function of the external refractive index  $n$ ) and  $I_a$  is the light intensity at the transducer output when the transducer is in the air.

We intended to find a combination of parameters that yielded linearity and good sensitivity of the sensor in the specified range of the external refractive index. In this search, we could sacrifice good optical coupling and low intrinsic optical loss for the sake of linearity and sensitivity. This was possible because of a relatively large power budget and small link loss of the fiber-optic local area sensor systems.

At first, we intended to achieve the desired transducer response to the variation of the external refractive index under equal parameters of the two optical fibers. We varied the diameter  $\Phi_1=\Phi_2$  in a range of 0.01- 0.1, the numerical aperture  $NA_1=NA_2$  in the range of 0.1-0.7 and the dimensionless distance  $\Lambda_1=\Lambda_2$  in the range 0.7-0.95. We found that the transducer response fitted into the required range of the external refractive index  $n$  for  $\Lambda_1=\Lambda_2=0.913$ . But, it was impossible to achieve a linear response of the transducer in the specified range of  $n$ . These theoretical predictions were experimentally confirmed. Due to this difficulty, we tried varying additional parameters. Finally, we found that a quasi-linear response to the external refractive index in the targeted range of this quantity could be achieved using lead-in and lead-out optical fibers with equal diameter  $\Phi$  but different numerical aperture  $NA$ . Therefore, we repeated the iterative design procedure until a quasi-linear response to the external refractive index was obtained in the targeted range. The obtained parameters are: dimensional diameter  $\Phi_1=\Phi_2=0.05$ , numerical aperture of the lead-in optical fiber in the air of  $NA_{1(-3dB)}=0.1$ , numerical aperture of the lead-out optical fiber in the air of  $NA_{2(-3dB)}=0.5$ . The light propagation pattern in the transducer for these parameters is shown in Fig. 2. One can see that some optical rays do not enter the lead-out fiber. The numerical ray-tracing shows that the intrinsic optical loss is 4.33 dB. It is possible to improve the optical coupling and to reduce the loss by displacing the lead-out fiber to the right. However, numerical analysis

shows that it results in a decrease of sensor linearity. The graphs in Fig. 3a illustrate the effect of dimensionless diameter of the lead-out optical fiber  $\Phi_2$  on the relative transmission function  $T^*(n)$ . While the graphs in Fig. 3b illustrate the effect of the numerical aperture of the lead-out optical fiber  $NA_2$  on the relative transmission  $T^*(n)$ . Particularly, Curves 2 and 3 in Fig. 3-b fit in the targeted range of the external refractive index ( $1.327 < n < 1.353$ ) and are quasi-linear. We used the respective combinations of parameters as a base for experimental investigation and further optimization of the transducer.

#### IV. EXPERIMENTAL RESULTS

We fabricated the optical detection element in the form of a micro-hemisphere of a diameter  $2R=8$  mm of Pyrex glass ( $n_e=1.467$  at  $\lambda=940$  nm and  $25$  C°). We employed two multimode optical fibers of multicomponent borosilicate glass of core diameter  $d_1=d_2=200$   $\mu$ m and numerical aperture  $NA_1=0.1$  and  $NA_2=0.5$  (lead-in and lead-out optical fiber, respectively). These parameters corresponded to the dimensionless quantities found theoretically in the previous Section. We glued the two optical fibers to the flat side of the optical detection element with the UV-cured transparent adhesive (NOA65, Norland Products Inc. [44]) and investigated experimentally the refractometric characteristics of the transducer. The central wavelength of the optical source (GaAlAs light emitting diode) was of  $\lambda=940$  nm and the optical beam full width was of  $2\theta_{-3dB}=40^\circ$ . The source provided enough irradiance, such that no focusing optical elements were necessary. The photo receiver employed a wavelength matched photo detector with a large (in comparison to the optical fiber core) active area.

Now we describe the characterization of the transducer response with regard to the dimensionless distance  $\Lambda$ . The parameter  $\Lambda$  is the only parameter which can be changed easily and in a continuous manner before final assembly of the transducer. Therefore it is of practical interest to know the transducer transmission as a function of the dimensionless distance  $\Lambda$ . The observed optical transmission of the transducer in the air  $T$  vs. the dimensionless distance  $\Lambda$  is plotted in Fig. 4. The optical transmission  $T$  exhibits a zone behavior against the dimensionless distance  $\Lambda$ . It is possible to distinguish several transmission zones at  $\Lambda=0.71$  (peak A),  $\Lambda=0.87$  (peak B),  $\Lambda=0.92$  (peak C),  $\Lambda=0.95$  (peak D) etc. Peak A is due to the coupling of the two optical fibers via two sequential internal reflections of light at the transducer working surface S. Peak B is due to the coupling via three

sequential internal reflections at the surface S, and so on. There are ranges of distance  $\Lambda$  between the mentioned transmission zones where there is no optical coupling at all. Each transmission zone has a finite width due to the finite diameter, angular aperture, and divergence of the employed optical beams. Because of these factors, the high-order transmission zones have a tendency to merge.

In a view of the complex zonal behavior of the transmission function, it was necessary to find experimentally the optimum parameter  $\Lambda$  which yielded the linear response and good sensitivity to the external refractive index  $n$  in the range which we considered in this work. With this aim, we used aqueous solutions of sodium chloride of various concentrations. The refractive index of these solutions was measured with the laboratory-grade Abbe refractometer and calculated for the operational wavelength  $\lambda=940$  nm [40], [41]. The experiment was carried out at 25 C°. We measured the optical transmission against  $\Lambda$ , with concentration as a parameter.

The experimentally observed optical transmission of the transducer in the air, distilled water (0‰,  $n=1.327$ ), and saturated solution of sodium chloride (260‰,  $n=1.373$ ) is plotted in Fig. 5. The optical transmission of the transducer almost vanishes under  $\Lambda<0.904$  when the transducer is immersed in the distilled water. This can be explained by an increase in the angle of incidence of light rays at the surface S from 0° to 90° with the increase of the dimensionless distance  $\Lambda$  from 0 to 1. The total internal reflection of light at the surface S and the coupling of the two optical fibers do not occur until a sufficiently large angle of incidence is reached at this surface (this condition takes place at a dimensionless distance of  $\Lambda\geq 0.904$  when the transducer is immersed in the distilled water). In the case of the saturated solution of NaCl (260‰) the total internal reflection and the coupling of the two optical fibers occur under a dimensionless distance  $\Lambda\geq 0.927$ .

In Fig. 5 the graphs for the optical transmission for the air (A) and distilled water (B) merge under  $\Lambda\geq 0.933$ . This indicates the loss of sensitivity of the transducer to the refractive index of surrounding media  $n$  in the range of  $1<n<1.327$ . Also, the transmission characteristic becomes essentially nonlinear. One can draw a conclusion that in order to access the external refractive index in the range of  $1.327<n<1.373$ , the dimensionless distance  $\Lambda$  should be larger than 0.93. However, the linearity of the transducer response to the refractive index of the surrounding media  $n$  in the range of dimensionless distance  $\Lambda$  required further investigation.

With this aim, we measured the relative optical transmission of the transducer  $T^*$  vs. the NaCl concentration in water. The dimensionless distance  $\Lambda$  was

a parameter ranging from  $\Lambda=0.907$  to  $\Lambda=0.933$ . The observed relative transmission  $T^*$  vs. the external refractive index  $n$  is plotted in Fig. 6. The shape of the relative transmission function  $T^*$  depends significantly on the parameter  $\Lambda$ . More specifically, both the span and linearity of relative transmission characteristic  $T^*$  depend on the parameter  $\Lambda$ . Therefore, when choosing this parameter it is necessary to consider the specific possible application. In particular, the relative transmission characteristic  $T^*$  is essentially linear in the targeted range of the refractive index  $1.327<n<1.353$  under  $\Lambda=0.913$ ,  $\Phi_1=\Phi_2=0.05$ ,  $NA_1=0.1$  and  $NA_2=0.5$  (graph D). The experimentally observed non-liquid dependent optical loss of the transducer is of 4.9 dB. Moreover, we evaluated the experimentally observed nonlinearity of the transducer response. We expressed the nonlinearity  $N$  as the dimensionless difference between actual and ideal straight-line behavior of transmission characteristic [45]:  $N(n) = (T^*(n) - (Kn + a) / \Delta T^*) \times 100\%$ ,  $Kn + a$  is the expression for the ideal straight-line characteristic that connects the minimum point to maximum point,  $K$  is the ideal straight-line slope  $K = \Delta T^* / \Delta n$  and  $a$  is the ideal straight-line intercept (zero bias of the relative transmission characteristic).

The nonlinearity of the optimized transducer is shown in Fig. 7 for the parameters that correspond to curve D in Fig. 6. The nonlinearity magnitude is  $|\Delta N_{max}| < 0.05$ . In the lower part of this range the nonlinearity is much smaller. In the range of aqueous solution of NaCl of 0 to 30‰ ( $1.327 < n < 1.333$ ) the nonlinearity magnitude  $|\Delta N_{max}| = 0.028$ . Further improvement in transducer linearity can be achieved either by further careful tailoring of its parameters or through the use of digital linearization techniques.

## V. IMPLEMENTATION OF THE REFRACTOMETER

Schematic of the refractometer is shown in Fig. 8. The refractometer consists of three main modules: the optical probe (I), the fiber optic cable (II) and the electronic unit (III). The optical probe (I) comprises the refractometric transducer (a) and four directional couplers ( $b_1$ - $b_4$ ) which together constitute the balanced optical bridge circuit [26]. All elements of the optical bridge are placed close to the transducer (a). The four-fiber optical cable (II) connects the optical bridge circuit of the probe (I) with the electronic unit (III). Two optical transmitters ( $d_1$ ,  $d_2$ ) interrogate the probe (I) in a pulsed mode. Two optical receivers ( $e_1$ ,  $e_2$ ) convert the output signals of the optical bridge in the electrical form. The electronic unit performs the operation  $(I_{AD} \cdot I_{BC}) / (I_{BD} \cdot I_{AC})$ , where  $I_{mn}$  is the

transmission function of one of the four analogue channels of the refractometer, with  $m$  and  $n$  corresponding to channel input and output, respectively. Under this operating principle, the refractometer output is largely insensitive to variations in such factors as the optical source power, loss in the fiber-optic link, detector response etc., except for the optical transmission of the refractometric transducer (a). We implemented the refractometer as shown in Fig. 8. Experimentally, we found that under the variation of optical loss of up to 20 dB, the observed variation in the refractometer output was less than 1.5 %. This quantity was determined mainly by the quality of the employed analogue dividers (5).

## VI. CONCLUSIONS

In this contribution, the design and implementation of a simple fiber-optic refractometer which can operate remotely via long fiber-optic cables was demonstrated. The novel device employs an intensity-modulated optical transducer composed of a semi-spherical glass detection element that is integrated with the lead-in and lead-out multimode optical fibers. The refractometer is intended for accessing the concentration of aqueous solutions of sodium chloride by measuring the refractive index of this substance. The refractometric transducer was optimized for a range of NaCl concentration from zero to 145 ‰, which is of a significant practical importance for many industrial users. Our experimental study showed that the observed transducer nonlinearity is less than 0.05 and its optical loss is of 4.9 dB. In the lower part of the specified range (0...30‰ or  $1.327 < n < 1.333$  at  $\lambda = 940$  nm and 25 °C), the maximum nonlinearity is  $\Delta N_{max} = 0.028$ . Such characteristics are sufficient for many industrial users. Further improvement in transducer linearity can be achieved either by proper tailoring of the geometrical and optical parameters of the transducer or through the use of digital linearization techniques. The physical size of the transducer can be scaled provided the dimensionless geometrical parameters are the same. In particular, assuming the minimum core diameter of commercially available multimode optical fibers of 50  $\mu\text{m}$ , the minimum transducer diameter is of 2 mm.

The refractometer is implemented in an optical bridge configuration followed by an analogue optoelectronic signal processing unit. Such a configuration allows us to significantly reduce the negative effect of an unstable attenuation of the fiber-optic cables, variation of the optical source power and photo-detector response on the readings of the refractometer. The refractometer has a parasitic variation of its output as low as 1.5 % under a

total variation of the optical source power and a fiber-optic cable loss of 20 dB. To develop a practical salinity meter, it would be necessary to supplement the refractometer with an independent measurement of the temperature and pressure to obtain corrected values for the salinity when converting the refractometer readings to concentration by means of the respective conversion tables, algorithms or formulae.

Potential applications of this refractometer include the *in-situ* characterization and monitoring of various liquids such as those used in the food industry, for example, sodium chloride salt-brine solutions, as well as, *in-situ* characterization of some lubricating oils and cooling liquids. The present configuration of the refractometer can be used with fiber-optic links in local sensor networks.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors are immensely grateful to Dr. Ramon Gutierrez Castrejon, Institute of Engineering, UNAM, Dr. Juan A. Hernandez Cordero, Institute of Materials, UNAM, and Dr. Yuri Khotyaintsev, Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, Sweden, for their comments on the earlier version of the manuscript.

## REFERENCES

- [1] B. T. Meggitt and K. T. V. Grattan, *Optical Fiber Sensor Technology*. Vol 1, Ed. Chapman&Hall, 1995.
- [2] J. Dakin and B. Culshaw, *Optical Fiber Sensors*. Vol. 1, Ed. Boston: Artech, 1996.
- [3] J. M. López-Higuera, *Handbook on Optical Fiber Sensor Technology*, Ed. John Wiley and Sons, 2002.
- [4] F. T. S. Yu and S. Yin, *Fiber Optic Sensors*, 1st ed. Marcel Dekker, New York, 2002.
- [5] C. Ronot-Trioli, A. Trouillet, C. Veillas, and H. Gagnaire, "Monochromatic excitation of a surface plasmon resonance in an optical fiber refractive index sensor," *Sensors and Actuators A*, vol. 54, pp. 589-593, 1996.
- [6] L. A. Obando, D. J. Gentleman, J. R. Holloway, and K. S. Booksh, "Manufacture of robust surface plasmon resonance fiber optic based dip-probes," *Sensors and Actuators B*, vol. 100, pp. 439-449, 2004.
- [7] O. Esteban, N. Diaz-Herrera, M. Cruz-Navarrete, and A. Gonzalez-Cano, "Surface plasmon resonance sensors based on uniform-waist tapered fibers in a reflective configuration," *Applied Optics*, vol. 45, no 28, pp. 7294-7298, 2006.
- [8] A. Iadicicco, A. Cusano, A. Cutolo, R. Bernini, and M Giordano, "Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor," *Photon. Tech. Lett.*, vol. 16, pp. 1149-1151, 2004.
- [9] K. Zhou, Y. Lai, X. Chen, K. Sugden, L. Zhang, and I. Bennion, "A refractometer based on a micro-slot in a fiber Bragg grating formed by chemically assisted femtosecond laser processing," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 15848-15853, 2007.

- [10] C. Caucheteur, Y. Shevchenko, L.-Y. Shao, M. Wuilpart, and J. Albert, "High resolution interrogation of tilted fiber grating SPR sensors from polarization properties measurement," *Opt. Express*, vol. 19, pp. 1656-1664, 2011.
- [11] S. W. James, and R. P. Tatam, "Optical fiber long-period grating sensors: Characteristics and application," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. R49-R61, 2003.
- [12] R. Falate, O. Frazão, G. Rego, J. L. Fabris, and J. L. Santos, "Refractometric sensor based on a phase-shifted long-period fiber grating," *Appl. Opt.*, vol. 45, pp. 5066-5072, 2006.
- [13] I. Flores-Llamas, O. Kolokoltsev, and V. Svyryd, "Refractometric sensors based on long period optical fiber gratings," *Rev. Mex. Fis.*, vol. 52, pp. 75-78, 2006.
- [14] C. J. Erasmus, P. L. Swart, and D. Meyer "Aqueous chemical and biochemical sensing with a long-period grating Michelson interferometer," *Int. Optical Fiber Sensors Conf. Technical Digest*, pp. ThE75, 2006.
- [15] M. Han, F. Guo, and Y. Lu, "Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating," *Opt. Lett.*, vol. 35, pp. 399-401, 2010.
- [16] V. Minkovich, J. Villatoro, D. Monzón-Hernández, S. Calixto, A. Sotsky, and L. Sotskaya, "Holey fiber tapers with resonance transmission for high-resolution refractive index sensing," *Opt. Express*, vol. 13, pp. 7609-7614, 2005.
- [17] R. Jha, J. Villatoro, G. Badenes, and V. Pruneri, "Refractometry based on a photonic crystal fiber interferometer", *Opt. Lett.*, vol. 34, pp. 617-619, 2009.
- [18] V. Zamora, A. Díez, M. V. Andrés, and B. Gimeno, "Refractometric sensor based on whispering-gallery modes of thin capillarie," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 12011-12016, 2007.
- [19] O. Esteban, M. Cruz-Navarrete, A. Gonzalez-Cano, and E. Bernabeu, "Measurement of the degree of salinity of water with a fiber-optic sensor," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 5267-5271, 1999.
- [20] B. Sun, X. Wang, and Z. Huang, "Study on intensity-modulated surface plasmon resonance array sensor based on polarization control," *Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), 3rd International Conference on*, vol. 4, pp. 1599-1602, 2010.
- [21] J. Villatoro, D. Monzon-Hernandez, and E. Mejia, "Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors," *Appl. Opt.*, vol. 42, pp. 2278-2283, 2003.
- [22] J. Villatoro, D. Monzon-Hernandez, and D. Talavera, "High resolution refractive index sensing with cladded multimode tapered optical fiber," *Electron. Lett.*, vol. 40, pp. 106-107, 2004.
- [23] Y. Lai, K. Zhou, L. Zhang, and I. Bennion, "Microchannels in conventional single-mode fibers," *Opt. Lett.*, vol. 31, pp. 2559-2561, 2006.
- [24] J. Villatoro, and D. Monzon-Hernandez, "Low-cost optical fiber refractive-index sensor based on core diameter mismatch," *J. Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 1409-1413, 2006.
- [25] J. Arrue, F. Jiménez, G. Aldabaldetrekú, G. Durana, J. Zubia, M. Lomer, and J. Mateo, "Analysis of the use of tapered graded-index polymer optical fibers for refractive-index sensors," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 16616-16631, 2008.
- [26] I. P. Giles, S. McNeill, and B. Culshaw, "A stable remote intensity based optical fiber sensor," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 18, pp. 502-504, 1985.
- [27] D. Guidotti, J. G. Wilman, and A. J. Ricci, "An optical bridge reflectometer for sensitive measurement of ion implantation dose," *Applied Physics A*, vol. 54, no 6, pp. 570-573, 1992.
- [28] C. Sánchez-Pérez, J. Villatoro, G. E. Sandoval-Romero, A. García-Valenzuela, and J. Hernández-Cordero, "Technique for referencing of fiber-optic intensity-modulated sensors by use of counterpropagating signals," *Opt. Lett.*, vol. 29, pp. 1467, 2004.
- [29] P. M. Cavaleiro, A. B. Lobo Ribeiro, and J. L. Santos, "Referencing technique for intensity-based sensors using fibre optic Bragg gratings," *Electron. Lett.*, vol. 31, pp. 392, 1995.
- [30] A. Wang, H. Xiao, J. Wang, Z. Wang, W. Zhao, and R. G. May, "Self-calibrated interferometric/intensity-based optical fiber sensors," *J. Lightwave Technology*, vol. 19, no. 10, pp. 1495-1501, 2001.
- [31] R. I. MacDonald and R. Nychka, "Differential measurement technique for optical fibre sensors," *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 2194-2196, 1991.
- [32] V. Svirid, S. Khotiaintsev, and P. Swart, "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element," *Optical Eng.*, vol.41, pp. 779-786, 2002.
- [33] V. Svirid, S. Khotiaintsev, and P. Swart, "Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element," *Optical Eng.*, vol. 42, pp. 1383-1389, 2003.
- [34] K. Romo-Medrano, S. Khotiaintsev, and V. García-Garduño, "An optical-fiber sensor system for monitoring the performance of gas-propellant centrifuge separator of a spacecraft," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 1568-1575, 2004.
- [35] K. Romo-Medrano, and S. Khotiaintsev, "An optical-fiber discrete liquid-level sensor for liquid nitrogen," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 998-1004, 2006.
- [36] S. Khotiaintsev, V. Svyryd, and H. Mejia del Puerto, "Fiber-optic liquid-interface sensor for liquid hydrogen," *Sensors and Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 13-23, 2009.
- [37] T. L. Bergman, F. P. Incropera, and W. H. Stevenson, "Miniature fiber-optic refractometer for measurement of salinity in double-diffusive thermohaline systems," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 56, pp. 291-296, 1985.
- [38] Y. Zhao, Y. Liao, B. Zhang, and S. Lai, "Monitoring technology of salinity in water with optical fiber sensor," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, 1334-1338, 2003
- [39] N. Díaz-Herrera, O. Esteban, M. C. Navarrete, M. Le Haitre, and A. González-Cano, "In situ salinity measurements in seawater with a fiber-optic probe," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 2227-2232, 2006.
- [40] G. M. Hale and M. R. Query, "Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu$ m wavelength region," *Appl. Opt.*, vol. 12, pp. 555-563, 1973.
- [41] D. Linde, *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (CRC Press: Boca Raton FL), 2005.
- [42] V. Svirid, and S. Khotiaintsev, "Mathematical modelling of optical-fiber refractometric device," *Recent Advances in Simulation, Computational Methods and Soft Computing, Electrical and Computing Eng. Series*, pp. 134-139, 2002.
- [43] K. Khotiaintsev, "Programming an application for numerical simulation of optical-fiber refractometric sensors," BSc dissertation, Faculty of Computer Sci., Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Mexico, 2005.
- [44] *Norland Optical Adhesive 65*, Norland Products Inc. [Online]. Available: <http://www.norlandprod.com/adhesives/noa%2065.html>
- [45] J. P. Bentley, *Principles of Measurement Systems*, Longman: Singapore, 1988.

**Sergei Khotiaintsev** (M'94-SM'95) received his M. Sc. degree in radio engineering in 1968 and Ph.D. degree in electronics in 1973 from the Faculty of Radio Engineering of the Kiev Polytechnic Institute (presently, National Technical University of Ukraine). He was with the same Faculty as an Assistant Professor and then Reader. Presently, he is a Full Professor of the Engineering Faculty, UNAM, Mexico.

His current interests include optical fiber sensors and optical and microwave devices and systems. He has authored or co-authored over 120 papers, several books and holds 19 patents.

Dr. Khotiaintsev is a member of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, and Communications Society, member of OSA and SPIE.

**Carlos E. García-Guerra** graduated from the Faculty of Engineering, UNAM, México, in 2006 and completed the joint MSc program in research on information technologies at Catholic University of Louvain in Belgium and Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, in 2009. Presently, he works as an Engineer at Huawei Technologies de Mexico.

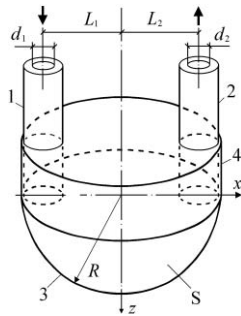
**Selene Pérez-García** graduated from the Faculty of Engineering, UNAM, México, in 2004. She received her MSc degree in electrical engineering from the same University in 2010. Presently, she is a professor and PhD student, UNAM, Mexico.



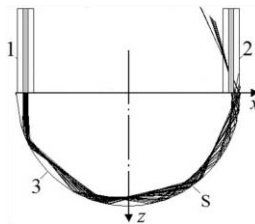
Her interests include optical fiber sensors and optical devices. She has authored 8 journal papers and conference presentations.

**Jordi E. Morales-Farah** graduated from the Faculty of Engineering, UNAM, Mexico, in 2006. He is now with the Master optics in science and technology program, Institut d'Optique Graduate School, Palaiseau, France.

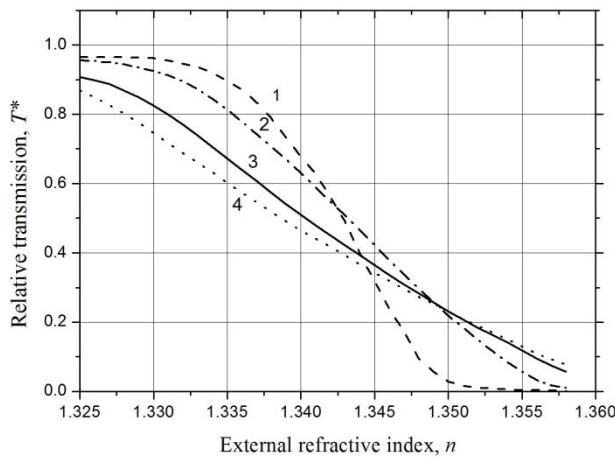
**Luis E. Yam-Ontiveros** graduated from the Faculty of Engineering, UNAM, Mexico, in 2006. He received his joint MSc degree in research on information and communication technologies from the Université Catholique de Louvain (Belgium) and Universitat Politècnica de Catalunya (Spain) in 2010. Presently, he is a PhD student at the Department of Signal Theory and Communications, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.



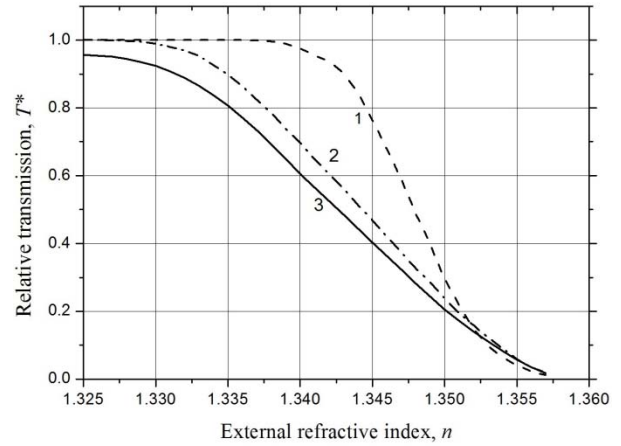
**Figure 1.** Fiber-optic refractometric transducer: 1, 2 – multimode optical fibers, 3 – transparent glass detection element with the spherical working surface S, 4 – epoxy cover.



**Figure 2.** Light propagation in the transducer under  $\Lambda=0.913$ ,  $\Phi_1=\Phi_2=0.05$ ,  $NA_1=0.1$ ,  $NA_2=0.5$ . 1, 2 – multimode optical fibers, 3 – detection element.

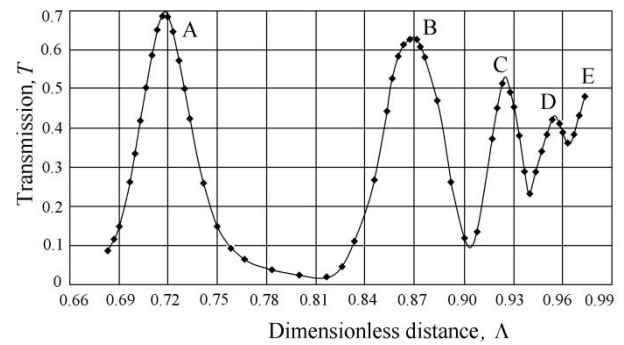


(a)

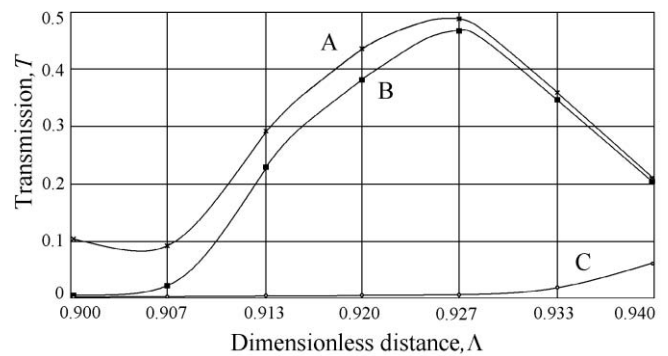


(b)

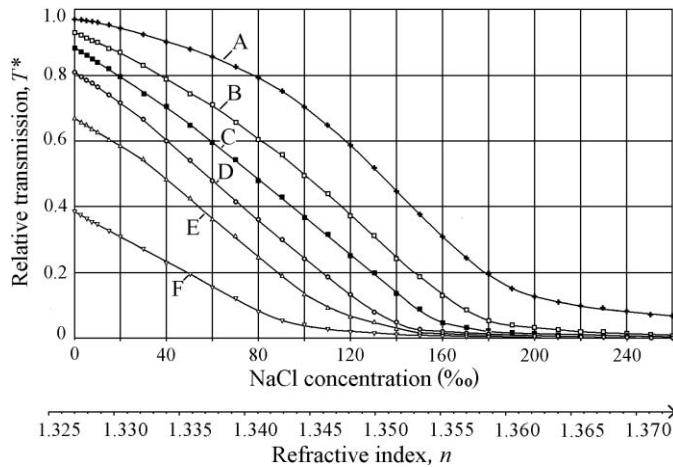
**Figure 3.** Theoretical relative transmission  $T^*$  at  $\Lambda=0.913$ ,  $NA_1=0.1$  and  $\Phi_1=0.05$  vs. the external refractive index  $n$ : (a)  $NA_2=0.5$  and curves from 1 to 4 correspond to  $\Phi_2=0.025, 0.05, 0.075$  and  $0.1$ , respectively; (b)  $\Phi_2=0.05$  and curves from 1 to 3 correspond to  $NA_2=0.1, 0.3$  and  $0.5$ .



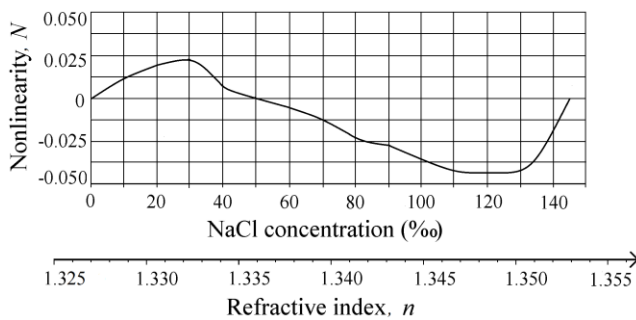
**Figure 4.** Experimentally observed optical transmission of the transducer in the air  $T$  as a function of the dimensionless distance  $\Lambda$ .



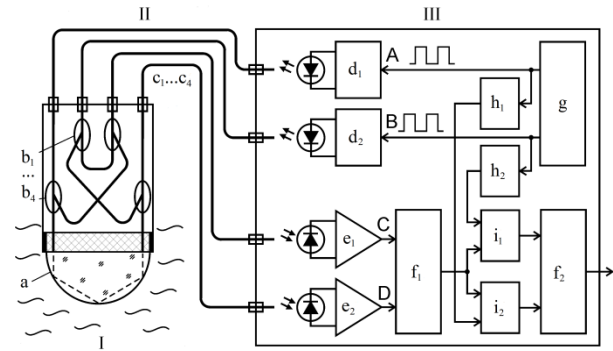
**Figure 5.** Experimentally observed optical transmission  $T$  vs. the dimensionless distance  $\Lambda$  for different external media: A – the air ( $n=1$ ), B – the distilled water ( $n=1.327$  at  $\lambda=940$  nm  $25$  C $^\circ$ ) and C – the aqueous solution of NaCl of 260‰ ( $n=1.373$  at  $\lambda=940$  nm and  $25$  C $^\circ$ ).



**Figure 6.** Experimentally observed relative transmission  $T^*$  vs. the concentration of sodium chloride in water and refractive index of the solution for different dimensionless distance  $\Lambda$  under  $NA_1=0.1$ ,  $NA_2=0.5$ ,  $d/R=0.05$ . Curve A -  $\Lambda=0.933$ , B -  $\Lambda=0.927$ , C -  $\Lambda=0.920$ , D -  $\Lambda=0.913$ , E -  $\Lambda=0.910$ , F -  $\Lambda=0.907$ .



**Figure 7.** Experimentally observed nonlinearity of the transducer.



**Figure 8.** Schematic of the refractometer: I - optical probe, II - fiber-optic cable, III - optoelectronic processing unit. a - refractometric transducer,  $b_1$ - $b_4$  - directional couplers,  $c_1$ - $c_4$  - multimode optical fibers,  $d_1$ ,  $d_2$  - optical transmitter (electrical current driver and GaAs light-emitting diode),  $e_1$ ,  $e_2$  - optical receiver ( $p$ - $i$ - $n$  photo diode and electronic amplifier),  $f_1$ ,  $f_2$  - analogue divider,  $g$  - push-pull square-wave oscillator,  $h_1$ ,  $h_2$  - short pulse shaper,  $i_1$ ,  $i_2$  - track-and-hold electronic amplifier.

# Design and optimization of an optical refractometer for remote measurements via fiber-optic cables

S. Khotiaintsev, C. E. Garcia-Guerra, J. E. Morales-Farah, S. Perez-Garcia, L. E. Yam-Ontiveros  
Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering,  
National Autonomous University of Mexico, Mexico, sergeikh@hotmail.com

## ABSTRACT

This paper presents a fiber-optic refractometer which can operate via long fiber-optic cables. We address the relationship between the span and the linearity of the small micro-optical evanescent-field transducer with spherical working surface used in the sensor, under different parameter combinations. We designed the transducer for the range of  $1.333 < n < 1.358$ , which is of main practical interest in measurements of water salinity. Another version of virtually the same transducer was designed for the range of  $1.333 < n < 1.380$ , which corresponds to concentrations of sodium chloride in water from zero to saturation. We also addressed the effect of the unstable optical source and loss in the connecting fiber-optic cables, on the readings of the refractometer. We significantly reduced these negative effects by implementing the refractometer in an optical bridge configuration followed by an analogue optoelectronic signal processing unit. This made the refractometer almost insensitive to the parasitic variation of optical source and loss in the fiber-optic cables which connects the optical probe with the optoelectronic unit. Due to these measures, this refractometer can successfully operate via long fiber-optic cables. It can have applications such as in the food industry, where salt-brine solutions of various concentrations are widely used.

**Keywords:** refractive index measurement, optical refractometry, refractometer, optical transducer, optical fiber sensor, balanced optical bridge.

## 1. INTRODUCTION

Optical sensing techniques offer certain attractive solutions to the *in situ* problem of remote and distributed measurement of different physical quantities. In these applications, the main advantage of optical sensors over the electrical consists of the possibility of optical sensors integration with the fiber-optic guides and the implementation of remote optical sensors interrogation. This eliminates the problems of electrical and electromagnetic noise and interference. Such sensor networks can serve for measuring and monitoring one or several physical quantities simultaneously over a certain area in industrial and natural environments. Optical refractometry is one of the prospective methods for accessing various physical quantities, since the refractive index of a medium depends on a number of its physical characteristics. Among several existing designs of the fiber-optic refractometric probes [1–5], the evanescent-field transducers with a spherical working surface feature a small intrinsic optical loss, simple design and low cost [6]. The existing spherical refractometric transducers have a step-like response to the external refractive index, allowing their use for discrimination between gas and liquid [7]. Such a binary response to the external refractive index is particularly needed in the discrete multipoint liquid-level sensors [8]. In contrast, the refractometry requires a high linear response to the external refractive index within certain predetermined span of the refractive index. This is a difficult task because, in general, the spherical transducer features a nonlinear or even multi-step response function [9]. Another difficulty relates to the parasitic variation of optical loss in the connecting fiber optics or cables. This variation contributes to the output quantity of this intensity-type optical sensor, thus deteriorating its performance.

In this work, we optimized the response function of the transducer in the range of external refractive index of  $1.333 < n < 1.358$ , because this particular range is of main practical interest in water salinity measurements [10]. Moreover, we designed another version of the transducer for the range of the external refractive index of  $1.333 < n < 1.380$ . This range corresponds to different concentrations of sodium chloride in water. Some liquids used in the food industry, such as sodium chloride salt-brine solutions, have the refractive index that fit into this range of refractive index  $n$ . In addition, this refractometer can perform measurements at long distances via optical cables. This was achieved by implementing the optical bridge configuration of the refractometer.

## 2. SENSOR DESCRIPTION

The schematic diagram of the refractometer is shown in Fig. 1. The refractometer consists of three main modules: the optical probe (I), the fiber optic cable (II) and the optoelectronic processing unit (III). The optical probe incorporates the refractometric transducer (at the bottom of the optical probe I) which consists of transmitting and receiving the multimode optical fibers (2) and (3), and a solid transparent dielectric optical detection element (3). The working surface of the detection element,  $S$ , is part of a sphere. In general, the parameters of the two fiber optics (1) and (2) are not equal and their distance from the longitudinal axis of the transducer is not equal, too. Both fiber optics (1) and (2) are in the principal longitudinal plane of the spherical detection element. The two fiber optics (1) and (2), and the detection element (3) are monolithically integrated in a single unit. The two fiber optics (1) and (2) are coupled via several sequential internal reflections at the surface  $S$ . These reflections are partial or total under different incidence angles of light at the surface  $S$ . The amount of coupling depends on the geometrical parameters and the material constants of the transducer and on the refractive index of the external medium  $n$ . A spherical surface has focusing properties that contribute to high energetic efficiency of this transducer. The refractometric transducer is used in a configuration of the balanced optical bridge circuit [11]. This circuit is connected to the optoelectronic unit (III) by an optical cable consisting of four optical fibers (II). This configuration allows using the transducer with very long connecting optical fibers (II). (See Section 4 for details).

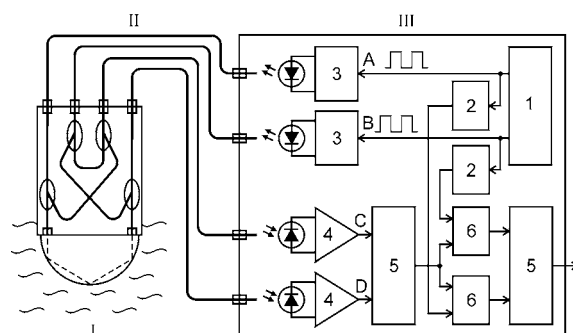


Fig. 1. Schematic diagram of the refractometer: I – optical probe, II – fiber-optic cable, III – optoelectronic processing unit, 1 – push-pull square-wave oscillator, 2 – short pulse shaper, 3 – electrical current driver, 4 – electronic amplifier, 5 – analogue divider, 6 – track-and-hold electronic amplifier.

## 3. DESIGN AND OPTIMIZATION OF THE MICRO-SPHERICAL TRANSDUCER RESPONSE TO THE EXTERNAL REFRACTIVE INDEX

The elaboration of the transducer was performed by means of an iterative procedure comprising design, analysis, and optimization. The analysis of light propagation in the transducer was carried out by numerical ray-tracing using a specially developed three-dimensional mathematical model of the transducer and the corresponding computer program. We assumed a transparent hemispherical element of radius  $R$  with refractive index  $n_e$  and two multimode fibers with the refractive index of the core  $n_c = n_e$ . The two optical fibers (1) and (2) had dimensionless core diameter  $\Phi_1 = d_1/R$  and  $\Phi_2 = d_2/R$ , numerical aperture in the air  $NA_1$  and  $NA_2$ , and dimensionless distance between the fiber axis and the longitudinal axis of the transducer  $\Lambda_1 = L_1/R$  and  $\Lambda_2 = L_2/R$ , respectively. The fibers were perpendicular to the flat surface of the detection element. The light beam was modeled by 200,000 of geometrical rays. The angular and Cartesian coordinates of each ray at the end face of the lead-in optical fiber were assigned in a statistically random manner by means of the Monte-Carlo algorithm. Ray tracing was performed and the relative transmission was calculated as  $T^*(n) = I(n)/I_a$ , where  $I(n)$  is the light intensity at the sensor output (which is a function of the external refractive index  $n$ ) and  $I_a$  is the light intensity at the sensor output when the sensor is in the air.

We analyzed the effect of various parameters on the relative transmission and intrinsic optical loss of the transducer. We



varied the diameter  $\Phi_2$  in a range of 0.01 ... 0.1 and the numerical aperture  $NA_2$  in the range of 0.1 ... 0.7. The optimum theoretical distance  $\Lambda=0.913$  was used as basis for designing the transducer for the range of the external refractive index of  $1.333 < n < 1.358$ . The graphs of the calculated relative transmission function  $T^*(n)$  are shown in Fig. 2. The graphs in Fig. 2-a show a significant non-linearity in the range of  $1.347 < n < 1.367$ . The graphs in Fig. 2-b are more linear. Particularly, Curve 4 fits in the range of the external refractive index of our interest ( $1.333 < n < 1.358$ ). Therefore, we used the corresponding combination of parameters as basis for further linearization of the relative transmission function  $T^*(n)$ .

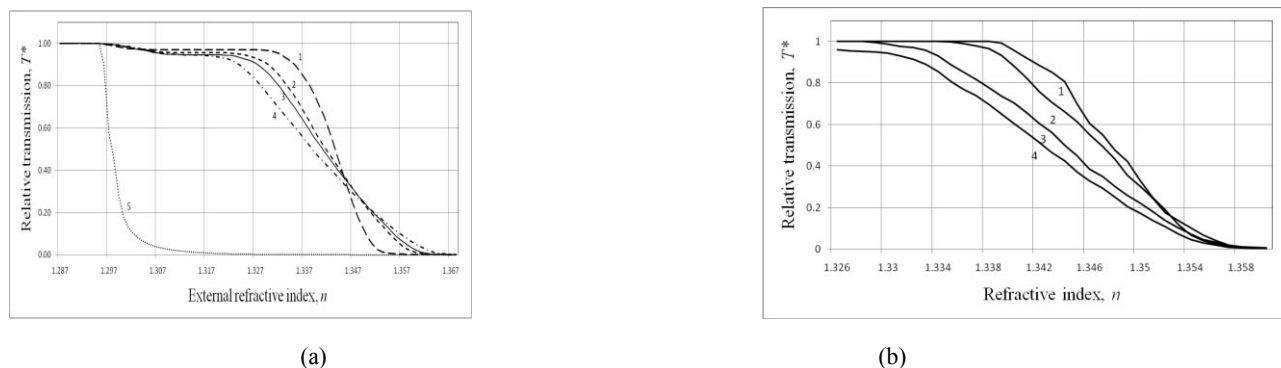


Fig. 2. Theoretical relative transmission  $T^*$  vs. the external refractive index  $n$ : (a)  $NA_1=0.1$ ,  $NA_2=0.5$ ,  $\Phi_1=0.05$ ,  $\Lambda=0.913$ . Curve 1- $\Phi_2=0.03$ , 2- $\Phi_2=0.06$ , 3- $\Phi_2=0.07$ , 4- $\Phi_2=0.1$ , 5- $\Phi_2=0.01$ ; (b)  $NA_1=0.1$ ,  $\Phi_1=\Phi_2=0.05$ ,  $\Lambda=0.913$ . Curve 1-  $NA_2=0.1$ , 2- $NA_2=0.2$ , 3- $NA_2=0.3$ , 4- $NA_2=0.7$ .

Following are the optimization results of the transducer for the refractive index span of  $1.333 < n < 1.358$ . The graph of the optimal theoretical relative transmission  $T^*$  vs. the external refractive index  $n$  is plotted in Fig. 3-a. The graphs in this figure are obtained under the parameters:  $NA_1=0.1$ ,  $NA_2=0.5$ ,  $\Phi_1=\Phi_2=0.05$  and  $\Lambda=0.913$ .

We fabricated the transducer in the form of a micro-sphere with a diameter of 4 mm integrated to the two multimode fiber optics and measured its response to the external refractive index. The observed relative transmission  $T^*(n)$  is shown in Fig. 3-a by curve B. The predicted and observed behavior of the relative transmission  $T^*$  (graphs A and B respectively) coincide well. There is little difference in the nonlinearity  $N$  of the predicted and observed relative transmission  $T^*$  (graph C and D respectively) that we attribute to some simplifications used in the mathematical modeling of the optical beams. Nevertheless, the maximum nonlinearity of the calculated and observed transmission characteristic,  $\Delta N_{max}$ , which is the maximum value of the non-linearity function  $N(n)$  in the transducer input range [12]:  $\Delta N_{max} = |N(n)|_{max}$  coincide accurately to the sign:  $|\Delta N_{max}| \approx 0.05$ . This nonlinearity relates to the operating range shown by eight experimental points in Fig. 6 ( $1.333 < n < 1.358$ ).

We designed another version of the transducer for the range of the external refractive index of  $1.333 < n < 1.380$ . The observed characteristics of this transducer are plotted in Fig. 3-b. The maximum nonlinearity of this transducer is of 0.2. Further improvement in transducer linearity can be achieved either by further careful tailoring of its parameters or by the use of digital linearization techniques.

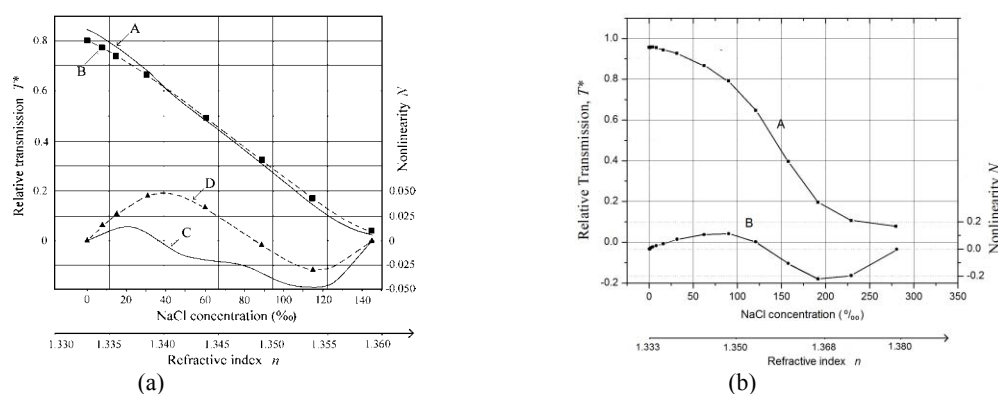


Fig. 3. Transducer relative transmission  $T^*$  and the nonlinearity of this characteristic vs. the concentration of sodium chloride in water: curve A and B – the predicted and observed relative transmission, respectively, curve C and D – the nonlinearity of the predicted and observed relative transmission  $T^*$ , respectively. (a)  $\Lambda=0.913$ ; (b)  $\Lambda=0.933$ .

#### 4. REDUCING THE EFFECT OF OPTICAL LOSS IN THE CONNECTING OPTICAL FIBERS

The implementation of the refractometer in the configuration of the balanced optical bridge circuit shown in Fig. 1 significantly reduced the effect of the optical loss in the connecting optical cables on the performance of the refractometer. We placed all the elements of the optical bridge close to the refractometric transducer in the optical probe I. The optoelectronic unit (III) interrogated the optical probe in a pulsed mode. It also performed the operation  $(I_{AD} \cdot I_{BC}) / (I_{BD} \cdot I_{AC})$ , where  $I_{mn}$  was the transmission function of one of the four analogue channels of the refractometer,  $m$ ,  $n$  corresponded to the channel input and output respectively. In this configuration, the refractometer was very insensitive to such factors as variation in the optical source power, loss in the fiber optic cable etc., except for the quantity of our interest: the optical transmission of the transducer. Experimentally, we found that under the variation of optical loss of the cables from zero to 20 dB the signal at the output of the refractometer varied less than 1.5 %.

#### 5. CONCLUSIONS

We investigated, experimentally, the refractometric characteristics of the fiber-optic transducer with the micro-spherical working surface in the range of the refractive index of external medium of  $1.333 < n < 1.358$  and  $1.333 < n < 1.380$ . In the range of  $1.333 < n < 1.358$  the maximum nonlinearity is of 0.05. In the range  $1.333 < n < 1.380$  the maximum nonlinearity is of 0.2. Further improvement in transducer linearity can be achieved either by further careful optimization of the transducer or by using digital linearization techniques.

The refractometer is implemented in an optical bridge configuration followed by an analogue optoelectronic signal processing unit. Due to the use of the optical bridge circuit, the refractometer has a parasitic variation of its output as low as 1.5 % under a total variation of the optical source power and an optical cable loss of 20 dB. It can have applications such as in the food industry, where salt-brine solutions of various concentrations are widely used. To be competitive in the real world, it would be necessary to supplement the sensor with the independent measurement of temperature and pressure.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the support of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) in a form of research grant DGAPA-PAPIIT IN114109 and support of the National Science and Technology Council of Mexico (CONACyT) in form of research grant 026106/51058. S. P. G. acknowledges the scholarship provided by the Coordination of Graduate Studies (CEP) of the UNAM.

#### REFERENCES

- [1] Iadicicco, A., Cusano, A., Cutolo, A., Bernini, R., Giordano, M., "Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor," *Photon. Tech. Lett.*, 16, 1149-1151 (2004).
- [2] Falate, R., Frazão, O., Rego, G., Fabris, J. L., Santos, J.L., "Refractometric sensor based on a phase-shifted long-period fiber grating," *Appl. Optics* 45(21), 5066-5072 (2006).

- [3] Obando, L.A., Gentleman, D. J., Holloway, J.R., Booksh, K.S., "Manufacture of robust surface plasmon resonance fiber optic based dip-probes," *Sensors and Actuators, B* 100, 439-449 (2004).
- [4] Villatoro, J., Monzon-Hernandez, D., Minkovich, V. P., Badenes, G., "Tapered microstructured optical coated with thin films for high sensitivity gas sensing," *Int. Optical Fiber Sensors Conf. Technical Digest, OSA, ThE59* (2006).
- [5] Lai, Y., Zhou, K., Zhang, L., Bennion, I., "Micro-channels in conventional single-mode fibers for refractive index sensing applications," *Int. Optical Fiber Sensors Conf. Technical Digest, OSA, TuE26* (2006).
- [6] Svirid, V., Khotiaintsev, S., Swart, P., "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element," *Optical Eng.*, 41(4), 779-786 (2002).
- [7] Romo-Medrano, K., Khotiaintsev, S., García-Garduño, V., "An optical-fibre sensor system for monitoring the performance of gas-propellant centrifuge separator of a spacecraft," *Measurement Sci. Techn.*, 15, 1568-1575 (2004).
- [8] Romo-Medrano, K.E., Khotiaintsev, S., "An optical-fiber discrete liquid-level sensor for liquid nitrogen," *Measurement Science and Technology*, 17, 998-1004 (2006).
- [9] Svirid, V., Khotiaintsev, S., Swart, P., "Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element," *Optical Eng.*, 42(5) 1383-1389 (2003).
- [10] Esteban, O., Diaz-Herrera, N., Navarrete, M.C., Gonzales-Cano, A., "Surface plasmon resonance sensors based on uniform-waist tapered fibers in a reflective configuration," *Applied Optics*, 45(28), 7294-7298 (2006).
- [11] Giles, I.P., McNeill, S., Culshaw, B., "A stable remote intensity based optical fibre sensor," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 18, 502-504 (1985).
- [12] Bentley, J.P., *Principles of Measurement Systems*, Longman: Singapore (1988).