



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

NUEVOS SENSORES REFRACTOMÉTRICOS EN FIBRA ÓPTICA

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

PRESENTA:
Amalia Nallely Castro Martínez

TUTOR PRINCIPAL
Dr. Seigiy Khoyaintsev, Facultad de Ingeniería
COMITÉ TUTOR
Dr. Neil Charles Bruce Davidson , CCADET
Dr. Oleksandr Martynyuk, Facultad de Ingeniería

Ciudad Universitaria, CD.MX.

Agosto 2017



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. García Valenzuela Augusto

Secretario: Dr. Martynyuk Oleksandr

Vocal: Dr. Khotyaintsev Sergiy

1^{er.} Suplente: Dra. Sánchez Pérez Celia Angelina

2^{do.} Suplente: Dr. Bruce Davidson Neil Charles

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Sergiy Khotiaintsev

FIRMA

(Segunda hoja)

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento a mis padres María Luisa y José, por todo su apoyo en este y en todos los proyectos que he emprendido en mi vida. A mi hermano Oscar por su ayuda y apoyo, a mis tíos, en especial a mis tías Antonia y Elena, a mi tío Pedro y a todos los miembros de mi familia que me han apoyado siempre.

De todo corazón agradezco a Antonio por todos los momentos maravillosos que hemos pasado juntos, por todo tu amor, apoyo y ayuda que me ha brindado durante estos años que llevamos juntos, muchas gracias.

A todos mis amigos que me han ayudado a ser una mejor persona cada día, muchas gracias a José Antonio Gama, Adán Bonilla y a todos los que han formado parte de mi vida y que recuerdo con mucho cariño.

A mis compañeros de trabajo, Selene, Carmen, Christian y Juan, por todos los momentos que pasamos, su ayuda y compañerismo. Al Dr. Sergei Khotiaintsev por ayudarme a llevar a cabo este trabajo.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Stanislav Zvanovec y todos mis compañeros de la Universidad Técnica de República Checa por brindarme la oportunidad de trabajar con ustedes y adoptarme como un miembro más de su equipo. Agradezco a Matej Komanec, Tomas Nemecek y Redwan Ahmed por toda la paciencia y enseñanzas que me brindaron. A mi gran amiga y confidente Lika Nadaraia por toda su ayuda y amistad incondicional.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por el apoyo económico para el desarrollo de este proyecto.

A la DGAPA-PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto de innovación tecnológica “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 DGAPA-PAPIME de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto “Nuevas prácticas de laboratorio con actividades y experimentos virtuales y reales para el mejoramiento de la enseñanza y aprendizaje en dos asignaturas de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones” con número de referencia PE10161.

A la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto “Sistemas de detección temprano de riesgos en edificios históricos”, un Proyecto Colaboración Conjunta del Fondo de Colaboración del Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

RESUMEN

En esta tesis se presenta el estudio de sensores ópticos con elementos de detección (transductores ópticos) externos y sensores basados en fibras microestructuradas, aplicados a la discriminación de líquidos.

Se realizó el análisis de dos tipos de sensores, el primero es un sensor con elemento de detección externo con superficie semielipsoidal. En este trabajo se presentan datos teóricos y experimentales sobre la respuesta de estos sensores analizados en dos configuraciones (modo de transmisión y modo de reflexión), con diferentes analitos y dos elementos de detección (transductores ópticos) con forma diferente (semiesférica y semielipsoidal).

El segundo sensor está basado en fibras ópticas microestructuradas de núcleo suspendido. Se realizó el análisis de este sensor con 4 fibras de diferente diámetro de núcleo y con diferentes analitos, demostrando que el diámetro del núcleo afecta de manera directa parámetros como el rango dinámico y la sensibilidad del sensor.

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran la viabilidad de utilización de estos sensores para la discriminación de líquidos, en un amplio rango de índices de refracción.

Índice

CAPÍTULO 1: Introducción.....	7
Antecedentes	7
Objetivo Principal	8
Objetivos Particulares	8
Metas	8
Metodología	9
Referencias del Capítulo 1	9
CAPÍTULO 2: Sensores de fibra óptica: Estado del Arte.....	11
2.1. Introducción	11
2.2. Clases y tipos de Sensores Ópticos	11
2.3. Sensores de Fibras Ópticas.....	13
2.3.1. Clasificación de sensores de fibra óptica	13
2.3.2 Ventajas y desventajas de los sensores de fibras ópticas.....	13
2.3.3. Sensores Refractométricos de Fibras Ópticas	15
2.3.4. Sensores Refractométricos de Fibras Ópticas con Transductores Externos	16
2.3.6. Aplicaciones de los sensores refractométricos de fibras ópticas	24
2.4. Problemas actuales en el desarrollo de los sensores refractométricos de fibras ópticas con transductores externos	25
Conclusiones.....	26
Referencias del Capítulo 2	26
CAPÍTULO 3. Modelo Matemático del Sensor	28
3.1. Introducción.....	28
3.2. Descripción general del sensor refractométrico con elemento de detección externo.....	28
3.3. Modelo matemático del sensor refractométrico con transductor externo orientado al software SRFO	34
Conclusiones.....	41
Referencias del Capítulo 3	42
CAPÍTULO 4. Instalación Experimental y Metodología del Experimento.....	43
4.1. Introducción.....	43
4.2. Descripción de la Instalación Experimental.....	43
4.2.1. Muestras de transductores refractométricos	43
4.2.2. Fuente de luz.....	44
4.2.3. Fibra óptica.....	46

4.2.4.	Foto detector	47
4.2.5.	Divisor del haz	48
4.3.	Metodología de la Caracterización de los Sensores en Modo de Transmisión y Reflexión	50
4.3.1	Las características de medida.....	50
4.3.2	Configuración experimental	50
4.3.3	El Campo de Medida, Alcance, Resolución, Limite de Detección, Rango Dinámico y Sensibilidad	52
	Conclusiones.....	54
CAPÍTULO 5: Resultados		55
5.1.	Introducción	55
5.2.	Resultados Teóricos	55
5.2.1.	Resultados Teóricos en Modo de Transmisión	55
5.2.2.	Resultados Teóricos en Modo de Reflexión	58
5.3.	Resultados Experimentales	61
5.3.1	Resultados Experimentales en Modo de Transmisión.....	62
5.3.2	Resultados Experimentales en Modo de Reflexión	63
5.4.	Análisis de la Sensibilidad, Pérdida intrínseca óptica y Rango de operación de los transductores extrínsecos de los tres tipos	65
5.5	Efecto de dimensiones relativas de los elementos transductores y las fibras ópticas, y la NA de las fibras ópticas sobre las características del sensor	67
	Conclusiones.....	72
	Referencias del Capítulo 5	73
CAPÍTULO 6: Sensor Refractométrico Intrínseco en Fibra Óptica Microestructurada .		74
6.1.	Introducción	74
6.2.	Descripción del sensor	74
6.3.	Metodología de la caracterización del sensor SC-MOF	74
6.4.	Resultados	76
	Conclusiones.....	79
CAPÍTULO 7. Conclusiones Generales		81
	Trabajo a futuro	83

CAPÍTULO 1: Introducción

Antecedentes

La refractometría óptica es una herramienta eficaz para la evaluación del índice de refracción de analitos para determinar parámetros específicos, tales como la densidad y el nivel de líquido para el control de la contaminación ambiental, fugas de líquidos de tuberías y otros peligros. Los sensores refractométricos de fibra óptica excluyen la posibilidad de ignición en un medio explosivo o con sustancias inflamables, es una característica atractiva que permite que los sensores se desplegarán en áreas peligrosas, como las refinerías y almacenes en la industria petroquímica. En adición, los sensores refractométricos de fibras ópticas pueden ser empleados en aplicaciones de monitoreo remoto.

Los sensores refractométricos de fibras ópticas se basan generalmente en la medición de la intensidad de radiación óptica, dado que emplean la reflexión total o parcial de la luz en la interfaz del elemento de detección (transductor óptico) con el analito, el correspondiente coeficiente de reflexión es una medida del índice de refracción n del analito [1].

Los sensores refractométricos de fibras ópticas con elemento sensor externo emplean la reflexión interna de la luz en la superficie del elemento que está en contacto con el analito. Este tipo de sensor opera en un amplio rango de índices de refracción, desde sustancias criogénicas con un índice de refracción pequeño (por ejemplo, el helio líquido presenta un índice de refracción de $n=1.0245$ @ 546 nm, el índice de refracción del nitrógeno líquido es de $n=1.205$ @ 589 nm [2,3]); en soluciones acuosas con la finalidad de medir la concentración de azúcar [4] o de sal [5] en la industria alimenticia, y para medición de nivel de líquido en tanques de combustible [6-7].

Existen otros tipos de sensores refractométricos, por ejemplo los basados en Rejillas de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) que han sido utilizados para medir el nivel de líquido [8-10]; sensores basados en Rejillas de Periodo Largo (LPFG) aplicados en la detección de contaminantes en la gasolina [11], o que han empleado una estructura híbrida de dos rejillas grabadas en la misma fibra óptica [12]. Los sensores refractométricos basados en estructuras de fibras ópticas monomodo (Single Mode Fiber, SMF) como tapers [13-15], son capaces de medir índices de refracción mayores al índice de refracción del sílice, al igual que otras estructuras basadas en SMF como el interferómetro tipo Michelson [16], interferómetro tipo Mach-Zehnder [17] pueden aumentar la sensibilidad del sensor modificando el diámetro del taper.

El desarrollo de nuevas fibras ópticas, como las fibras ópticas microestructuradas (MOF) trae una nueva gama de posibles aplicaciones. Por ejemplo, al utilizaron los agujeros del revestimiento de la MOF es posible la detección de sustancias, como el de gas acetileno [18], o diferentes analitos [19].

Los sensores refractométricos de fibra óptica con elemento de detección externo ofrecen ciertas ventajas, la más importante es la facilidad con la que pueden implementarse y la amplia gama de índice de refracción que puede medir. Hay dos configuraciones posibles de los sensores con elemento de detección externo: transmisión y reflexión [5-7, 20]. El sensor con un elemento de detección externo que opera en modo de reflexión presenta algunas ventajas en comparación con el modo de transmisión: la sensibilidad se

incrementa debido a que la señal viaja dos veces dentro del elemento de detección y la reducción del número de fibras ópticas que se utilizan.

En este trabajo se considera un nuevo elemento de detección basado en un semielipsoide de Polimetilmetacrilato (PMMA) con la finalidad de evaluar la respuesta de este sensor en ambas configuraciones. El interés de realizar la caracterización de este sensor surge de buscar nuevas formas de elementos de detección que presenten mejores características, así como la comparación de la respuesta del sensor obtenida en la configuración de transmisión con la de reflexión.

Objetivo Principal

Obtener nuevos conocimientos científicos y prácticos sobre el funcionamiento y las vías de implementación de algunos nuevos sensores refractométricos basados en fibras ópticas, para aplicaciones potenciales en diferentes áreas de la actividad humana.

Objetivos Particulares

- Evaluar y comparar teórica y experimentalmente las características de los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección (transductores) externos con superficie de trabajo de segundo orden.
- Explorar teórica y experimentalmente las características de los sensores refractométricos de fibra óptica con transductores ópticos externos en el modo de reflexión.
- Investigar la situación de competencia con respecto a sensores refractométricos basados en algunas fibras ópticas microestructuradas.

Metas

- Por medio de una revisión del estado del arte de sensores refractométricos de fibras ópticas, identificar los problemas actuales en el desarrollo y mejoramiento de dichos sensores.
- Evaluar la eficacia de algunos paquetes de software en el análisis de los sensores refractométricos, con la finalidad de escoger una herramienta teórica más eficiente para los fines de este trabajo.
- Obtener datos cuantitativos sobre la respuesta del sensor al índice de refracción externo en función de sus parámetros, mediante el modelado matemático de los sensores.
- Fabricar una serie de muestras de sensores refractométricos con superficie de trabajo de segundo orden, diseñar e implementar una instalación experimental y realizar la caracterización experimental de los sensores en los modos de transmisión y reflexión; comparar las predicciones teóricas con datos experimentales sobre la respuesta del sensor al índice de refracción externo.
- Comparar algunas características de sensores refractométricos en cuestión con sensores intrínsecos basados en fibras ópticas microestructuradas.

Metodología

La metodología de este trabajo incluye el uso de métodos teóricos y experimentales. En particular, el desarrollo y empleo de modelos matemáticos de propagación de la luz en elementos ópticos. Se prevé el uso de los conceptos de Óptica Geométrica y el método de trazado de rayos en particular.

Se incluye el uso de métodos experimentales, tales como el diseño, fabricación y caracterización experimental de las muestras de los elementos transductores ópticos de plástico y las MOF de diferentes diámetros de núcleo.

Para la interpretación de los datos experimentales, se incluye el tratamiento estadístico de los mismos, con la finalidad de obtener los datos estadísticamente significativos.

Referencias del Capítulo 1

- [1] S. Yin and P. Ruffin, *Fiber Optic Sensors* (Wiley, 2002).
- [2] K. E. Romo-Medrano and S. N. Khotiaintsev, "An optical-fibre refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen," *Meas. Sci. Technol.* 17, 998–1004 (2006).
- [3] T. Chen, Q. Wang, R. Zhang, Y. Lin, and K. P. Chen, "Distributed liquid level sensors using self-heated optical fibers for cryogenic liquid management," *Appl. Opt.* 51, 6282–6289 (2012).
- [4] M. Shao, X. Qiao, H. Fu, H. Li, Z. Jia, and H. Zhou, "Refractive index sensing of SMS fiber structure based Mach-Zehnder interferometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 26, 437–439 (2014).
- [5] S. Khotiaintsev, K. Khotiaintsev, and A. Garcia-Moreno, "Modeling of the fiber-optical water salinity sensor," in *8th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling*, Kharkiv, Ukraine, 2006, pp. 36–38.
- [6] S. Khotiaintsev, "Discrete POF liquid-level sensor for measuring the level of gasoline and detecting water in automobile tanks," in *Proceedings of the 18th International Conference on Plastic Optical Fibers* (2009), pp. 1–4.
- [7] S. Khotiaintsev, E. Llanito-Caudillo, S. Perez-Garcia, and J. Morales-Farah, "Optical-fiber refractometric sensor with semi-cylindrical optical detection element for measuring the level of gasoline," in *Proceedings of the IEEE Conference on Electronics, Robotics and Automotive Mechanics* (IEEE, 2009), pp. 468–473.
- [8] K. R. Sohn, "Liquid sensors using refractive intensity at the end-face of a glass fiber connected to fiber-Bragg grating," *Sens. Actuators A* 158, 193–197 (2010).
- [9] Q. Jiang, D. Hu, and M. Yang, "Simultaneous measurement of liquid level and surrounding refractive index using tilted fiber Bragg grating," *Sens. Actuators A* 170, 62–65 (2011)
- [10] Y. Huang, B. Chen, G. Chen, H. Xiao, and S. U. Khan, "Simultaneous detection of liquid level and refractive index with a long-period fiber grating based sensor device," *Meas. Sci. Technol.* 24, 095303 (2013).

- [11] S. Kher, S. Chaubey, J. Kishore, and S. M. Oak, "Detection of fuel adulteration with high sensitivity using turnaround point long period fiber gratings in B/Ge doped fibers," *Sens. J.* 13, 4482–4486 (2013).
- [12] Z. Yan, C. Mou, Z. Sun, K. Zhou, H. Wang, Y. Wang, and L. Zhang, "Hybrid tilted fiber grating based refractive index and liquid level sensing system," *Opt. Commun.* 351, 144–148 (2015).
- [13] M. Komanec, T. Martan, T. Nemecek, and S. Zvanovec, "Multimode fiber tapers for reproducible refractometric liquid detection," *Opt. Eng.* 54, 047102 (2015).
- [14] D. Wu, Y. Zhao, and O. Wang, SMF Taper Evanescent Field Based RI Sensor Combined with Fiber Loop Ring Down Technology (IEEE, 2015).
- [15] A. Mukherjee, D. Munsif, V. Saxena, R. Rajput, P. Tewari, V. Singh, and P. Gupta-Bhaya, "Characterization of a fiber optic liquid refractive index sensor," *Sens. Actuators B* 145, 265–271 (2010).
- [16] Z. Tian, S. S. Yam, and H. P. Loock, "Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber," *Opt. Lett.* 33, 1105–1107 (2008).
- [17] G. Yin, S. Lou, and H. Zou, "Refractive index sensor with asymmetrical fiber Mach-Zehnder interferometer based on concatenating single-mode abrupt taper and core-offset section," *Opt. Laser Technol.* 45, 294–300 (2013).
- [18] A. S. Webb, F. Poletti, D. J. Richardson, and J. K. Sahu, "Suspended-core holey fiber for evanescent-field sensing," *Opt. Eng.* 46, 010503 (2007).
- [19] T. Nemecek, M. Komanec, M. Martan, R. Ahmad, and S. Zvanovec, "Suspended-core microstructured fiber for refractometric detection of liquids," *Appl. Opt.* 54, 8899–8903 (2015).
- [20] V. Svirid, S. Khotiaintsev, and P. L. Swart, "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element," *Opt. Eng.* 41, 779–787 (2002).

CAPÍTULO 2: Sensores de fibra óptica: Estado del Arte

2.1. Introducción

El continuo crecimiento en el uso de fibras ópticas se debe en gran parte a las ventajas que ofrece respecto a otros medios de transmisión; como son bajas pérdidas por transmisión, inmunidad a las interferencias electromagnéticas, bajo peso, y aislamiento eléctrico. Las ventajas antes mencionadas hacen que la fibra óptica sea de gran interés para las telecomunicaciones, en el área de láseres y en sensores; sin embargo, otra de las ventajas de la fibra óptica y que sin duda ha contribuido a su desarrollo es el hecho de poder usar dispositivos integrados a la misma [1].

Los sensores en fibra óptica ofrecen ciertas ventajas sobre los de otro tipo por estar formados por materiales dieléctricos no conductivos. Por tal motivo reducen la probabilidad de ignición de un medio potencialmente explosivo y/o inflamable y son atractivas para aplicaciones en áreas peligrosas (como refinerías y almacenes de productos petroquímicos, etc.) en enlaces de sistemas de telecomunicaciones así como en sistemas de medición de diversas cantidades físicas, basadas en efectos ópticos. En particular, utilizando las fibras ópticas se puede medir el índice de refracción del medio externo. La medición de índice de refracción (refractometría) tiene numerosas aplicaciones en la industria, medicina, biología, y en la investigación científica. Además de medición de índice de refracción de líquidos, los sensores refractométricos de fibra óptica ofrecen soluciones atractivas en la detección de fugas de líquido, discriminación entre distintos líquidos, y medición de nivel de líquidos. La medición de niveles de líquido es necesaria en muchas aplicaciones donde es indispensable conocer el volumen o masa que tiene el líquido, por ejemplo en los sistemas de su almacenamiento y/o procesamiento químico o físico. Existe un extenso rango de sensores de nivel de líquido, ya sean mecánicos, eléctricos, ultrasónicos y ópticos. Los sensores electrónicos son ampliamente usados aunque su funcionalidad se ve limitada en ambientes potencialmente explosivos [1]-[3].

2.2. Clases y tipos de Sensores Ópticos

Un sensor puede describirse de manera general como un dispositivo capaz de detectar y/o cuantificar la variación de algún parámetro. Las principales partes que forman a un sensor son: dispositivo transductor, canal de comunicación, detector, subsistema de procesamiento de la señal. Podemos definir como sensor óptico al sistema óptico donde la señal de entrada es modificada o modulada, en alguna de sus características ópticas, por el objeto bajo medición [1].

Existen diferentes clasificaciones para los sensores ópticos. Las principales clasificaciones que se hacen de este tipo de sensores son tres y se basan en los siguientes principios:

- Tipo de magnitud física
- Tipo de modulación de la onda
- Forma de implementación del sensor

Tipo de magnitud física

Se clasifican de acuerdo al tipo de magnitud física que el sensor detecta o mide. Dentro de esta clasificación se encuentran 7 categorías:

- *Sensores mecánicos*: se relacionan las magnitudes tales como desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerza y presión a una variación de la radiación óptica.
- *Sensores térmicos*: estos sensores relacionan la temperatura con una variación de la radiación óptica, pueden aprovechar la variación del espectro de absorción o índice de refracción de un material con la temperatura.
- *Sensores electromagnéticos*: este tipo de sensores detectan o miden el campo electromagnético, corriente y voltaje eléctrico por medio de efectos electro ópticos, magneto ópticos, térmicos y otros.
- *Sensores de radiación ionizante*: este tipo de sensores utilizan materiales y dispositivos fotónicos para medir radiación ionizante como rayos X, α , β , γ y rayos cósmicos por medio de efectos de luminiscencia o fluorescencia.
- *Sensores de composición química*: el principio de funcionamiento de estos sensores se basa en la modificación de radiación óptica (por ejemplo, su espectro) ocasionada por el tipo o la concentración química de algún material.
- *Sensores de velocidad de flujo (una, dos o tres fases) y turbulencia*: el efecto Doppler, la dispersión y absorción provocada por partículas suspendidas en el gas o fluido son principales técnicas que se emplean en este tipo de sensores.
- *Sensores biomédicos*: abarcan una gama de magnitudes físicas y químicas, tales como la acidez, oxígeno en la sangre, flujo de sangre, entre otros parámetros.

Tipo de Modulación de la onda

De acuerdo al tipo de modulación de la radiación óptica, los sensores se clasifican en:

- *Amplitud e intensidad*: En este tipo de sensores se modifica la intensidad de la luz en función de la magnitud física bajo medición. Estos dispositivos son de los más utilizados debido a su bajo costo en comparación con otros sensores ópticos.
- *Fase*: En este tipo de sensores es necesario contar con una fuente de luz coherente, dispositivos ópticos complejos para controlar la polarización de la luz y utilizar configuraciones interferométricas para la medición de cambios de fase efectuados por la magnitud física bajo medición, lo cual aumenta su costo y complejidad, pero ofrecen una mayor sensibilidad respecto a los demás tipos de sensores.
- *Polarización*: En esta clase de sensores la magnitud física bajo medición modula la polarización de la luz.
- *Frecuencia*: Estos sensores utilizan el efecto Doppler para la medición de velocidad de movimiento. Además, utilizan el cambio de frecuencia de un láser en forma de anillo para medir la velocidad de giro.
- *Espectro óptico*: En estos sensores la magnitud física bajo medición modifica el espectro de radiación óptica.

Forma de implementación

De acuerdo a este criterio, los sensores ópticos se ordenan en:

- Sensores hechos de elementos ópticos discretos, tales como lentes, prismas, rejillas y espejos.

- Sensores hechos de fibras ópticas.
- Sensores hechos en forma de circuitos ópticos integrados.

Con base en esta clasificación, este estudio se centra en el trabajo con sensores de fibra óptica, por tanto profundizaremos más en las características de este tipo de sensores.

2.3. Sensores de Fibras Ópticas

2.3.1. Clasificación de sensores de fibra óptica

Sensores extrínsecos e intrínsecos

Adicionalmente a las clasificaciones que se mencionaron anteriormente, los sensores de fibra óptica se pueden dividir en dos grupos:

- *Sensores extrínsecos*: la interacción entre la magnitud física bajo medición y la radiación óptica ocurre en un dispositivo óptico externo a la fibra óptica y la señal que resulta de esta interacción se transmite por medio de una fibra óptica al equipo receptor.
- *Sensores intrínsecos*: la fibra óptica es utilizada para transportar la luz y también sirve como elemento transductor para convertir la magnitud física bajo medición en la modulación de la portadora óptica. Dentro de este tipo de sensores se encuentran varios tipos de magnitudes físicas y distintos mecanismos de transducción, desde sensores mecánicos basados en el doblado y microcurvaturas de las fibras ópticas hasta los sensores de temperatura, deformación y de índice de refracción, basados en Rejillas de Bragg y Rejillas de Periodo Largo.

Distribución espacial de los transductores

Este criterio considera el número de transductores que forman el sensor y la distribución de éstos en el espacio. Dentro de esta clasificación se consideran cuatro grupos:

- *Sensores puntuales*: un solo transductor mide la magnitud física de interés en un solo punto.
- *Sensores integrados*: un conjunto de transductores se encuentra en un área en diferentes puntos del objeto bajo medición, pero todos los valores medidos son integrados en una sola cantidad – la lectura integrada de la magnitud física en cuestión.
- *Sensores distribuidos*: los transductores realizan mediciones en un área o a lo largo de una línea continua, con una resolución espacial dada.
- *Sensores cuasi distribuidos*: miden la magnitud física bajo estudio en diferentes puntos, pero a través de un solo canal mediante técnicas de multiplexado.

2.3.2 Ventajas y desventajas de los sensores de fibras ópticas

Los sensores de fibras ópticas presentan ventajas atractivas para la aplicación de éstos en diferentes campos de la industria, como medicina e investigación científica, por mencionar algunos; sin embargo, también cuentan con algunas desventajas. A continuación, presentamos las principales ventajas y desventajas para este tipo de sensores.

Ventajas

Las principales ventajas que presentan los sensores hechos en fibras ópticas se mencionan a continuación [1]-[3]:

- Las fibras ópticas están fabricadas con materiales dieléctricos, por lo que resultan elementos química y eléctricamente pasivos, útiles para aplicaciones en ambientes hostiles, corrosivos o inflamables. También presentan inmunidad a las interferencias electromagnéticas debido a que la fibra óptica es un medio dieléctrico.
- Posibilitan la implementación de interfaces eficientes, simples y de dimensiones pequeñas entre el sensor y la muestra bajo estudio, facilitando el proceso de detección y medición.
- Gracias a la alta temperatura de fusión que tiene el material de las fibras ópticas (sílice), es posible utilizar este tipo de sensores en un amplio rango de temperaturas, desde temperaturas muy bajas (criogénicas), hasta muy altas (casi a temperatura de fundición del cuarzo). Esta propiedad hace a los sensores de fibras ópticas viables para aplicaciones en donde los sensores fabricados en materiales semiconductores se encuentran limitados por las propiedades físicas de sus componentes.
- Debido al tamaño pequeño y peso de las fibras ópticas, se fabrican transductores muy pequeños y ligeros, que representa una ventaja en varias aplicaciones.
- Con las fibras ópticas, el punto de medición puede estar muy lejos gracias a las características superiores que tiene la fibra óptica como medio de transmisión en comparación a enlaces de cable de cobre, cable coaxial o guía de onda de microondas.
- La sensibilidad, rango dinámico y resolución de los sensores ópticos puede ser mucho mayor en comparación con sensores convencionales, en particular cuando se utilizan técnicas interferométricas o polarimétricas que hasta el momento presentan la mayor sensibilidad en la medición.
- Con fibras ópticas, es relativamente fácil integrar una gran cantidad de sensores en un solo canal mediante técnicas de multiplexado (con técnicas espectrales y otras).

Desventajas

Existen principalmente dos desventajas. La primera es la sensibilidad que presentan las fibras ópticas a otros parámetros que puede interferir con la medición de la variable bajo estudio. Por ejemplo, al trabajar con sensores basados en Rejillas de Bragg aplicados a la medición de tensión mecánica, es necesario contar con algún compensador para combatir el efecto de la temperatura del medio ambiente. Cabe mencionar que este tipo de desventaja también se presenta en sensores convencionales.

La segunda desventaja se relaciona con el costo de los sensores de fibras ópticas. En la mayoría de los casos, los sensores ópticos tienen un costo mucho mayor en comparación con sensores eléctricos o mecánicos. Fundamentalmente, esto se debe al costo de los componentes que al ser producidos en menor escala, por medio de una tecnología nueva, resulta en un incremento en el precio de éstos. Afortunadamente, la

investigación y aplicación de sistemas de fibra óptica ha aumentado, y con ello la competitividad en el mercado por parte de los fabricantes, traduciéndose en una reducción en los costos de los componentes utilizados en sensores de fibras ópticas de sílice y plástico [1].

2.3.3. Sensores Refractométricos de Fibras Ópticas

La refractometría óptica permite la identificación de sustancias sólidas y líquidas, permitiendo conocer diferentes parámetros como concentración de una sustancia específica en un líquido, la caracterización de mezclas de dos o más sustancias, posibilitando numerosas aplicaciones como medición del nivel de líquidos, detección de fugas, etc. Por tanto, es una herramienta de gran importancia para la industria, la medicina y la investigación científica en química, biología y otros campos. Hoy en día, hay muchos refractómetros comerciales disponibles. El más común es el refractómetro Abbe, que emplea la medida del ángulo crítico para la determinación del índice de refracción de la muestra.

Existen diferentes tipos de sensores refractométricos de fibra óptica de campo evanescente, fabricados en fibras de diferentes materiales y que hacen uso de diversos dispositivos ópticos. Entre los más conocidos podemos encontrar sensores refractométricos basados en *tapers* fabricados en las fibras monomodo (SMF); fibras ópticas de plástico parcialmente peladas; sensores que operan en un régimen de interferencia, entre los cuales podemos encontrar sensores que emplean rejillas ya sean FBG o LPFG, estructuras que incluyen interferómetros de tipo Mach-Zehnder, sensores basados en la Resonancia de Plasmón Superficial (SPR) o resonadores Fabry-Perot; sensores con transductores ópticos externos de diferentes formas y materiales, por ejemplo, prismas y semiesferas, entre los más comunes [4].

Los nuevos desarrollos de fibras ópticas especiales, presentan nuevas oportunidades en el área de la refractometría óptica. Particularmente, se ha investigado la aplicación de fibras microestructuradas para la detección de diferentes sustancias como gases o líquidos, presentando algunas ventajas atractivas para diversos campos de investigación como la química y biología, en donde las muestras a analizar son de volúmenes muy pequeños.

Los dispositivos de tipo intensidad constituyen, quizás, el mayor grupo de sensores refractométricos de fibra óptica existentes. Muchos de estos sensores emplean la reflexión interna de la luz (parcial o total) en la interfaz del elemento de detección y el medio externo, es decir, son sensores de campo evanescente. La reflexión óptica en la interfaz es una función del índice de refracción de los dos medios.

A pesar de la sensibilidad y resolución superior que presentan algunos otros tipos de sensores que se mencionaron anteriormente, los sensores refractométricos de tipo intensidad de campo evanescente de fibra óptica son sencillos, de bajo costo y de pequeño tamaño, además son fáciles de acoplar con las redes de fibra óptica. Estas ventajas los hacen competitivos en muchas aplicaciones prácticas.

2.3.4. Sensores Refractométricos de Fibras Ópticas con Transductores Externos

Principio de funcionamiento

Los sensores refractométricos de fibras ópticas con elementos de detección (transductores) externos emplean la reflexión interna (parcial y/o total) de la luz en la interfaz del elemento transductor que se encuentra en contacto con el medio que rodea al transductor. La ventaja de utilizar elementos transductores externos principalmente consiste en tener un mayor número de parámetros geométricos y ópticos que pueden ser modificados en el diseño del sensor con la finalidad de obtener una respuesta deseada del sensor: la transmisión óptica del sensor en función del índice de refracción del medio externo, $T(n)$. Las diversas aplicaciones del sensor necesitan diferentes características de la función $T(n)$: A) Las características lineales en diferentes rangos de índice externo de refracción para la medición de dicho índice y/o caracterización de concentración de diferentes sustancias en un líquido; B) Las características escalonadas en diferentes intervalos de índice de refracción externo para la discriminación entre el aire o un gas, y un líquido, esto para aplicaciones tales como la medición de niveles de líquidos, detección de fugas de líquidos y algunas otras aplicaciones.

Reflexión y refracción de las ondas en un interfaz de dos medios dieléctricos. Ley de Snell.

Cuando la luz incide sobre un interfaz de dos medios dieléctricos con índices de refracción diferentes ocurre tanto la reflexión de una parte de la energía incidente como transmisión de otra parte de la luz incidente (excepto el caso de reflexión total interna, que se analiza en la subsección siguiente) [5]. La figura 2.1 ilustra estos fenómenos.

La relación entre el ángulo de incidencia θ_i y ángulo de reflexión θ_r está dada por la Ley de reflexión:

$$\theta_i = \theta_r. \quad (2.1)$$

La relación entre el ángulo de incidencia θ_i y ángulo de refracción θ_t está dada por la Ley de Snell (figura 2.2):

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

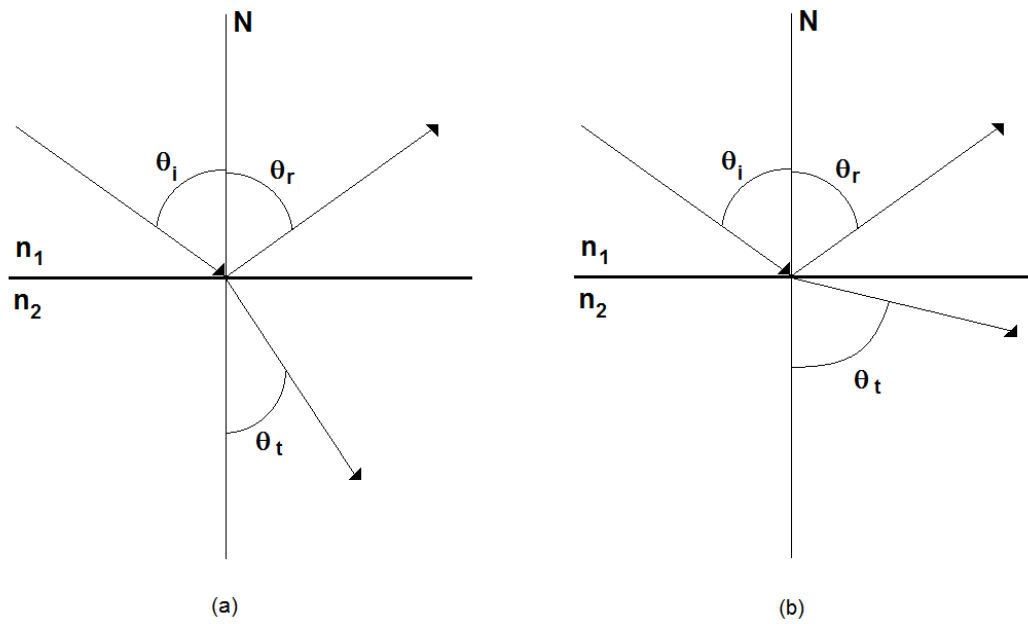


Figura 2.1. Ilustración de la reflexión y refracción de la luz en un interfaz de dos medios dieléctricos: (a) $n_1 < n_2$, (b) $n_1 > n_2$.

En el caso en que la onda pasa de un medio de mayor densidad a otro menor ($n_1 > n_2$), según se va aumentando el ángulo de incidencia, se llega a un valor en que toda la luz es reflejada. El ángulo de incidencia, en esta situación, se denomina Ángulo Crítico, θ_c :

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right). \quad (2.3)$$

A partir del ángulo crítico, θ_c , toda la energía de la luz es reflejada y regresa al medio de n_1 . Este fenómeno es conocido como Reflexión Total Interna (Figura 2.2 (b) y (c)). Para la interfaz vidrio-aire, el ángulo crítico está alrededor de los 41° .

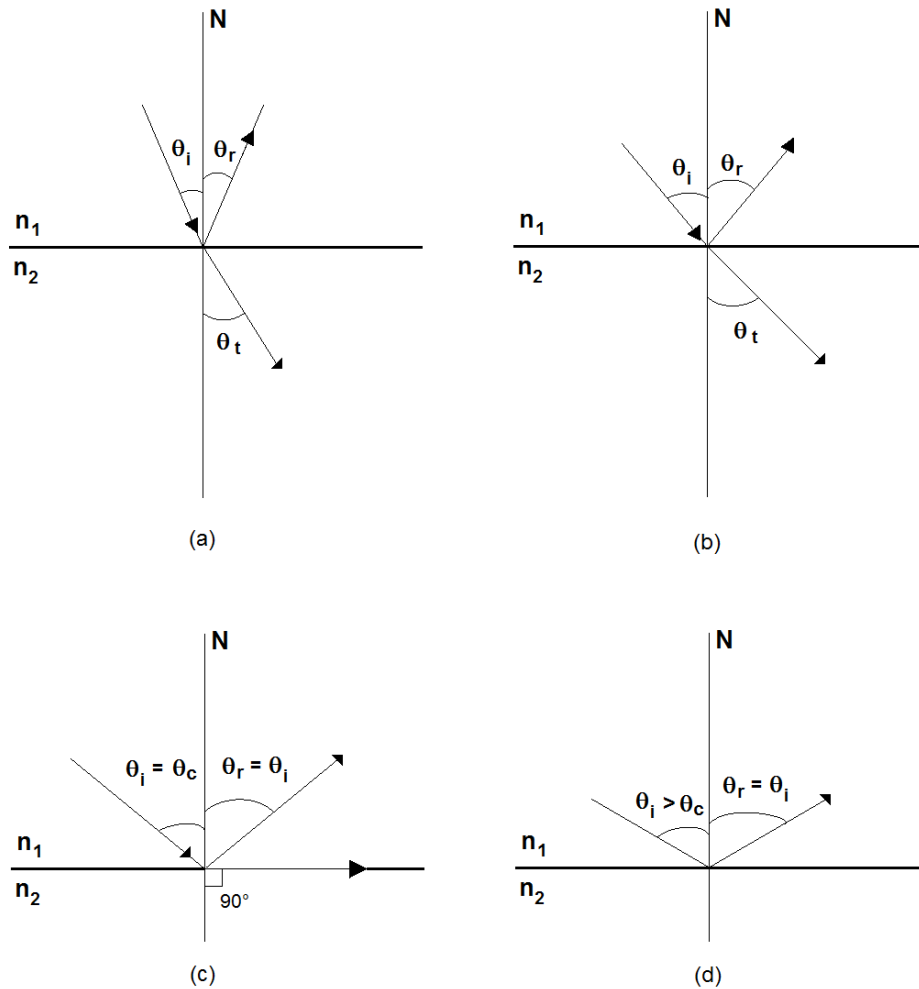


Figura 2.2. Ilustración de la reflexión interna en una interfaz de dos medios dieléctricos con $n_1 > n_2$: (a) y (b) – reflexión parcial interna, (c) y (d) – reflexión total interna [5].

Polarización de la luz

La polarización de la luz se refiere a la orientación espacial dinámica de los vectores de campo eléctrico E y magnético H de la respectiva onda electromagnética. Sin embargo, comúnmente se definen en términos del vector de campo eléctrico E . La figura 2.3 ilustra diversos tipos de polarización de la luz.

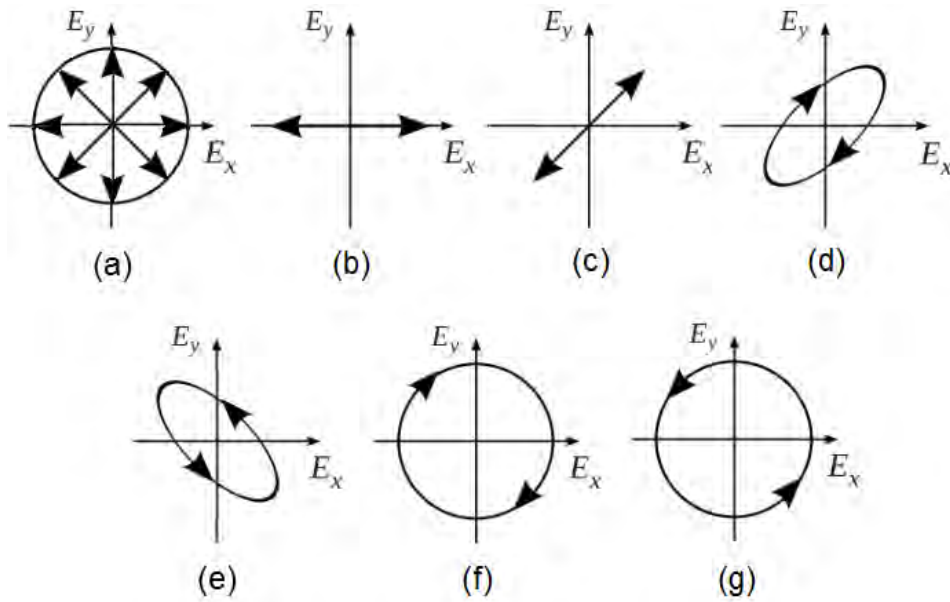


Figura 2.3. Tipos de polarización de la onda: (a) la luz no polarizada (polarización caótica), (b) polarización lineal horizontal, (c) polarización lineal a 45°, (d) polarización elíptica cuando la punta del vector E gira en la dirección de manecilla de reloj, (e) polarización elíptica cuando la punta del vector E gira en la dirección contraria a la manecilla de reloj, (f) y (g) polarización circular cuando el vector del campo eléctrico E gira en y contra la dirección de manecilla de un reloj, respectivamente.

Polarizaciones s y p

La polarización del rayo incidente a un interfaz de dos medios se puede separar en 2 casos (Figura 2.4):

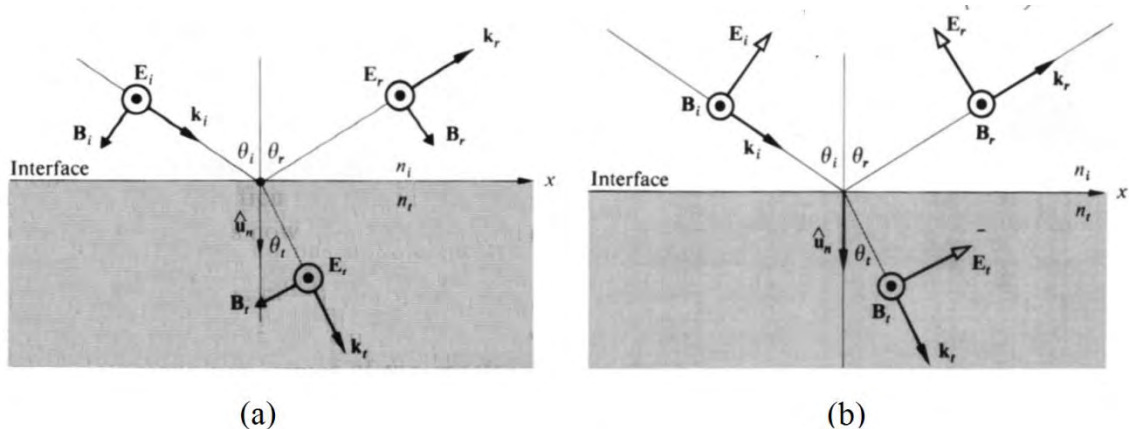


Figura 2.4. Ilustración del concepto de la polarización s y p [5].

- A. La luz s -polarizada – con su vector E perpendicular al plano de incidencia (el plano que contiene el incidente, reflejada y refractada rayos, es el plano de la figura 2.4.).
- B. La luz p -polarizada – con su vector E paralelo al plano de incidencia.

Efecto de la polarización de las ondas sobre su refracción y reflexión en un interfaz de dos medios dieléctricos. Fórmulas de Fresnel

Las relaciones entre las **amplitudes** de la onda incidente y ondas reflejadas y refractadas (o transmitidas) dependen de la polarización de la onda incidente y están dadas por las Fórmulas de Fresnel (2.4) – (2.7). Las Fórmulas de Fresnel consideran que los dos materiales son paramagnéticos:

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = t_s - 1, \quad (2.4)$$

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = r_s + 1, \quad (2.5)$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i}, \quad (2.6)$$

$$t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i}. \quad (2.7)$$

donde n_i es el índice de refracción del medio de donde proviene el haz (medio incidente), n_t es el índice de refracción del medio al otro lado de la interfaz (medio en donde se transmite la luz), θ_i y θ_t son los ángulos de incidencia y transmisión, respectivamente (θ_t se obtiene de θ_i por la Ley de Snell), los subíndices s y p corresponden a la onda cuyo vector de campo eléctrico perpendicular y paralelo al plano de incidencia del haz, respectivamente.

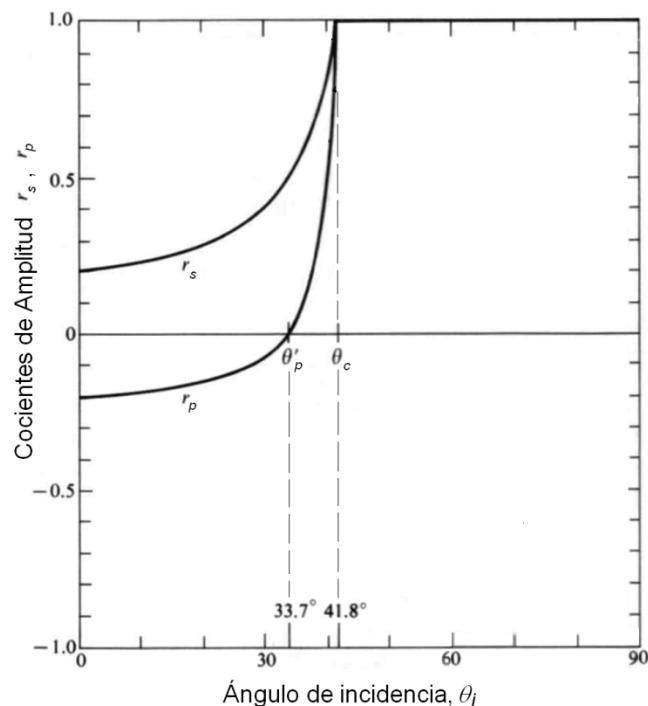


Figura 2.5. Variación de coeficientes de reflexión de amplitud r_s y r_p en función de ángulo de incidencia θ_i para la reflexión interna $n_t < n_i$, $n_i=1.5$ (vidrio) y $n_t=1$ (aire) [5].

Los cocientes de reflexión de **intensidades** R_s y R_p son cuadrados de los respectivos cocientes de reflexión y transmisión r_s y r_p :

$$R_s = \left[\frac{\text{sen}(\theta_t - \theta_i)}{\text{sen}(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right]^2 \quad (2.8)$$

$$R_p = \left[\frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right]^2 \quad (2.9)$$

$$T_s = 1 - R_s \quad (2.10)$$

$$T_p = 1 - R_p \quad (2.11)$$

Si la onda no está polarizada, el coeficiente de reflexión es:

$$R = \frac{(R_s + R_p)}{2} \quad (2.12)$$

Para un n_1 y un n_2 dados, existe un ángulo característico para el cual, el valor de R_p se hace cero, y una onda incidente, polarizada en p , es totalmente refractada. Este ángulo es conocido como Angulo de Brewster (Figura 2.6).

$$\theta_{Br} = \arctg(n_1/n_2) \quad (2.13)$$

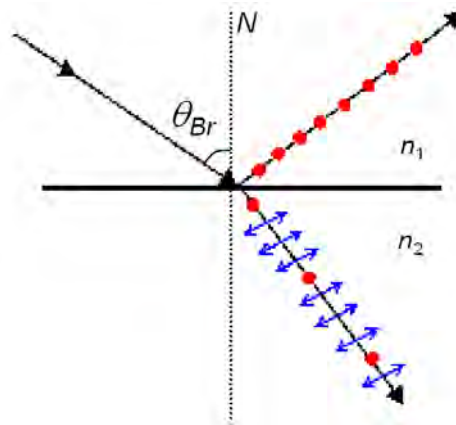


Figura 2.6. Ilustración de la separación de polarizaciones s y p en el caso de ángulo de incidencia de Brewster.

Para el vidrio y el aire (o vacío) el valor del ángulo de Brewster está cerca de los 56° .

Las figuras 2.7 y 2.8 ilustran el comportamiento de los cocientes de reflexión de intensidad R_s y R_p (de ondas con la polarización s y p) en función de ángulo de incidencia en los casos de $n_1 < n_2$ y $n_1 > n_2$, respectivamente. En ambas figuras se considera el material utilizado en nuestro sensor (su elemento de detección refractométrico): PMMA de $n=1.492$. Sin embargo, únicamente la figura 2.7 corresponde al caso de nuestro sensor refractométrico en el cual $n_1 > n_2$.

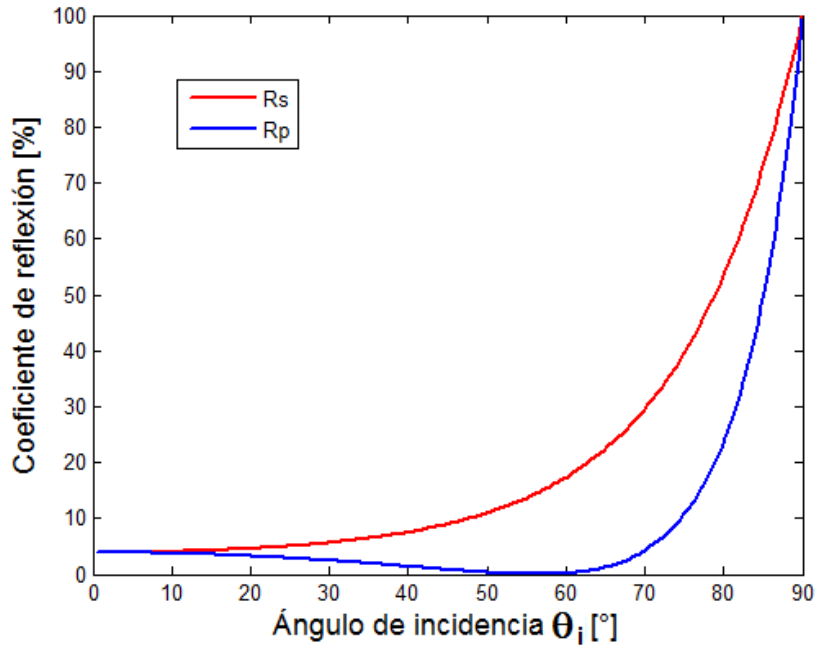


Figura 2.7. Cocientes de reflexión de intensidad, R_s y R_p , de ondas con la polarización s y p en función de ángulo de incidencia en el caso de $n_1 < n_2$ ($n_1 = 1$ y $n_2 = 1.492$).

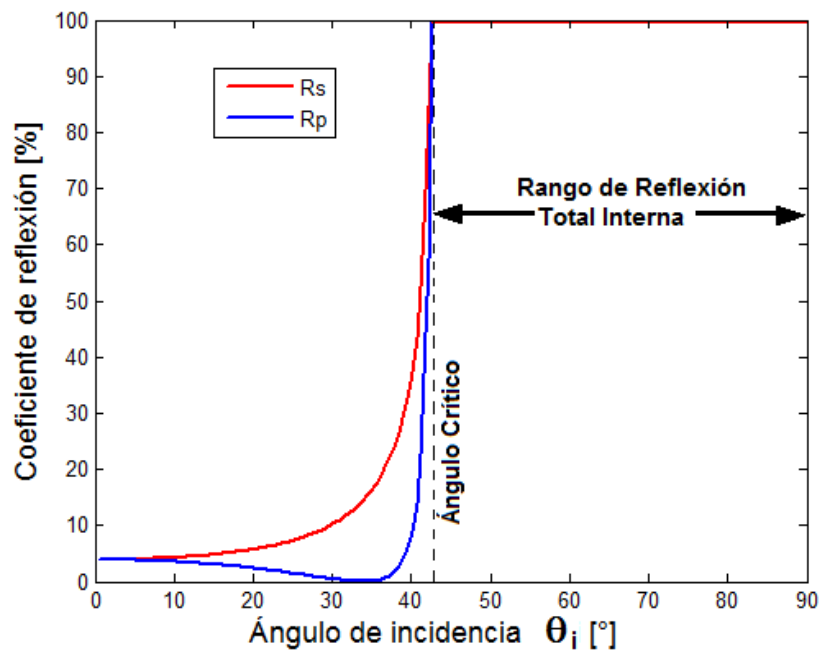


Figura 2.8. Cocientes de reflexión de intensidad, R_s y R_p , de ondas con la polarización s y p en función de ángulo de incidencia en el caso de $n_1 > n_2$ ($n_1 = 1.492$ y $n_2 = 1.0$).

Cambio de estado de polarización en la reflexión de una superficie dieléctrica

En la reflexión oblicua la polarización lineal se mantiene si el haz está polarizada exactamente en el plano de incidencia (polarización p), o exactamente ortogonal al plano de polarización (polarización s).

En la reflexión oblicua de la luz no polarizada, los rayos reflejados y refractados están polarizados parcialmente. En el haz reflejado la polarización s es dominante y en el haz refractado la polarización p es dominante. El grado de polarización de los dos haces depende del ángulo de incidencia.

Los efectos de la polarización de la luz en los sensores refractométricos tienen cierta importancia, sin embargo el software SRFO que hemos utilizado no tuvo la capacidad de considerar dichos efectos. Por esto, el análisis de propagación de la luz en elementos transductores extrínsecos es este trabajo se llevó a cabo sin considerar los efectos de polarización de la luz.

2.3.5. Configuraciones de los sensores refractométricos de fibra óptica con transductores externos

Existen dos configuraciones en las que pueden trabajar los sensores refractométricos de fibra óptica con transductores externos, modo de transmisión y modo de reflexión (Figura 2.8 (a) y (b)).

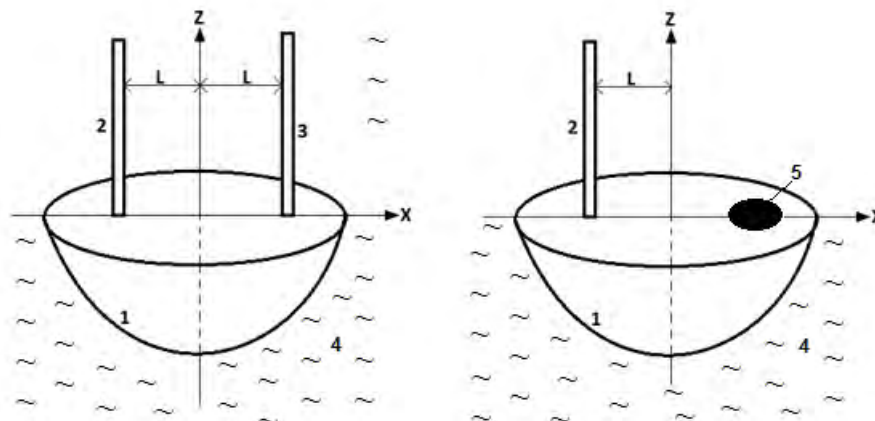


Figura 2.9. Esquemas de los sensores refractométricos genéricos con elementos de detección externos en el modo de transmisión (a) y reflexión (b). 1- elemento de detección (transductor), 2 - fibra óptica transmisora, 3 - fibra óptica receptora, 4 – medio externo (el aire o un líquido), 5 - reflector.

En la configuración de transmisión el elemento de detección o transductor óptico, está conectado a la fuente no coherente de luz y al foto detector por un par de fibras ópticas multimodo, como se muestra la Figura 2.9 (a). Las dos fibras se acoplan ópticamente por la reflexión interna en la superficie de trabajo del elemento transductor; la intensidad óptica queda en función del índice de refracción del transductor y del índice de refracción del medio externo. Por lo tanto la transmisión óptica del transductor es una función del índice de refracción externo. Tal diseño permite una fácil modificación de la función de

transmisión de sensor (una respuesta al índice de refracción externo) de acuerdo a las necesidades de los usuarios particulares. La modificación se consigue mediante un cambio en los parámetros geométricos y ópticos, así como las constantes del material del elemento de detección óptico y de las dos fibras ópticas que constituyen el sensor óptico.

La configuración de los sensores refractométricos de fibras ópticas con transductor externo esférico en el modo de transmisión es la más estudiada en la actualidad; sin embargo, al trabajar con el sensor en el modo de reflexión (Figura 2.9 (b)) tendremos algunas ventajas, comenzando por reducir el número de fibras ópticas de dos a una, lo que se traduce en menor costo.

2.3.6. Aplicaciones de los sensores refractométricos de fibras ópticas

Durante la última década fueron desarrollados diferentes sensores ópticos refractométricos basados en fibras ópticas y empleados en una amplia gama de aplicaciones en diversos campos de la investigación y la industria. En este trabajo nos centraremos en el estudio de sensores refractométricos en fibras ópticas aplicados a la discriminación de líquidos (particularmente en mezclas acuosas, combustibles y aceites), así como la medición de nivel de líquido.

En la industria automotriz, se han desarrollado diferentes mecanismos que permiten la evaluación de los combustibles utilizados con la finalidad de detectar posibles adulteraciones a éstos que puedan llegar a contaminar el medio ambiente y la salud de la población. En este sentido, Gobiernos como el de Brasil, han propiciado el desarrollo de sensores para medir la calidad de los combustibles que se comercializan dentro de ese país, un ejemplo de esto es el desarrollo de un sensor refractométrico que emplea una LPFG, inscrita en una fibra óptica dopada con Boro y Germanio mediante el haz de un láser de CO₂, aplicado a la detección de la adulteración del combustible y la identificación de hidrocarburos dentro de tuberías [6]. Otro ejemplo de este tipo de aplicación, es el sensor desarrollado por Possetti et al. [7] que consta de una LPFG inscrita en una SMF, utilizada en la medición de la concentración de etanol en la gasolina, que puede operar en un rango de índices de refracción de $n=1.36$ a $n=1.43$. Se han desarrollado diferentes métodos para aumentar la sensibilidad de los sensores basados en rejillas, por ejemplo se han realizado investigaciones donde se agregan nano partículas de oro a la LPFG [8] o se fabrican estructuras híbridas con dos rejillas inscritas en una misma fibra óptica con diferentes ángulos de inclinación [9], consiguiendo aumentar su sensibilidad en un rango de índices de refracción aproximadamente de $n=1.34$ a $n=1.4$, haciendo al sensor viable para su aplicación con soluciones acuosas.

El rango de operación de varios sensores basados en fibras ópticas de sílice para la detección de líquidos, se encuentra limitado por el índice de refracción de dicho material; por tal motivo restringen operación con sustancias como aceites que presentan un índice de refracción mayor a de la sílice. Una solución a este problema consiste en utilizar estructuras basadas tapers fabricados en SMF [10] o en MMF [11], por mencionar algunas.

Otra de las aplicaciones que nos interesa, es la medición del nivel de líquido mediante sensores refractométricos de fibras ópticas, a continuación mencionaremos algunos de los desarrollados en la última década. Sohn *et al.* realizaron la medición de líquido en un tanque mediante una fibra óptica multimodo (MMF) conectada a un FBG [12], la

detección de líquido emplea la reflexión que sufre la señal en el final de la MMF monitoreando dicho extremo de la fibra mediante la FBG para detectar posibles daños en caso de que choque con el contenedor. Otros sensores desarrollados miden el nivel de líquido mediante la inmersión de una rejilla inscrita en fibra óptica, ya sea LPFG [13] o FBG [14].

En la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM fue realizada una serie de proyectos de investigación científica y trabajos de tesis sobre sensores refractométricos de fibra óptica con un elemento transductor óptico externo de una forma geométrica semiesférica y semicilíndrica, para aplicaciones potenciales en diversos campos como en la industria alimentaria para acceder a la concentración de sal y azúcar [15] en soluciones acuosas, medición de sustancias criogénicas como el nitrógeno líquido y el helio líquido, también se utilizan para medir el nivel de agua, gasolina y combustible diésel en tanques en una forma de matrices de sensores [16]-[17]. Las ventajas principales de los sensores refractométricos de fibra óptica con elemento de detección externo son en primer lugar su simplicidad y bajo costo en comparación sensores de fibras ópticas de otro tipo, así como el rango de índices de refracción en los que es posible trabajar con estos sensores.

2.4. Problemas actuales en el desarrollo de los sensores refractométricos de fibras ópticas con transductores externos

A pesar de varios parámetros que pueden ser explotados en el sensor refractométrico, la variación del transductor externo para la modificación de su respuesta al índice de refracción externo, no es nada fácil de lograr una función de transmisión de cualquier gradiente deseado, que se encuentra directamente relacionado a la sensibilidad del sensor, y linealidad deseada en un rango específico del índice de refracción externo. Por otro lado, al inicio de este trabajo no fueron exploradas las propiedades del sensor refractométrico con el transductor externo en el modo de reflexión. Por lo tanto, es de interés de estudiar las propiedades del sensor refractométrico de fibras ópticas con transductor externo en el modo de reflexión.

Además, es de interés el análisis de la función de transmisión del sensor refractométrico de fibras ópticas con transductor externo en el modo de reflexión, para conocer en qué medida puede ser modificado al cambiar la geometría de su superficie de trabajo o parámetros de la fibra óptica. Más específicamente, sería importante e interesante explorar el efecto de diferentes superficies de segundo orden que no fueron estudiadas anteriormente en la presente aplicación, sobre la respuesta del sensor al índice de refracción externo.

En trabajos anteriores, se han considerado transductores ópticos de sílice, por tanto sería importante e interesante explorar las propiedades transductores y fibras ópticas hechas de los materiales plásticos, tales como polimetilmetacrilato, PMMA.

En lo relacionado a las aplicaciones potenciales, una aplicación particular de gran importancia práctica es la posibilidad de obtener la función de transmisión suficientemente lineal y de alta sensibilidad en un rango de índice de refracción externo que corresponde al agua y soluciones acuáticas de cloruro de sodio y de etilenglicol de diversas concentraciones.

Conclusiones

Los sensores de fibra óptica, en particular, los sensores refractométricos tienen varios campos de aplicación debido a las ventajas competitivas con respecto a los sensores mecánicos, eléctricos y de otros tipos. Sus principales ventajas consisten en la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, seguridad en ambientes inflamables y explosivos, alta resistencia a agentes químicos, un rango de temperaturas superior al rango que soportan los sensores de competencia y numerosas otras ventajas.

Los sensores refractométricos con elemento de detección externo de tipo intensidad presentan un gran interés práctico, dado que son relativamente fáciles de implementar y por esto tienen un costo menor en comparación con otros sensores de competencia [2].

Sin embargo, todavía existen problemas no resueltos que dificultan y restringen la introducción de estos sensores en la práctica. Por esto, es importante la obtención de nuevos conocimientos científicos y aplicados sobre los siguientes aspectos particulares dentro del tema del presente trabajo:

1. Las características de los sensores refractométricos de fibras ópticas con transductores externos en el modo de reflexión;
2. El efecto de la forma de superficie de trabajo de los transductores sobre la respuesta del sensor al índice de refracción externo. En particular, el efecto de las superficies de trabajo de segundo orden.
3. La situación de competencia de dichos sensores con respecto a los sensores refractométricos intrínsecos de las últimas generaciones, tales como los sensores basados en fibras microestructuradas.

Referencias del Capítulo 2

- [1] J. M. López, *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
- [2] K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, *Optical Fiber Sensor Technology: Applications and Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [3] John Dakin and Brian Culshaw, *Optical Fiber Sensors*, Boston: Artech, 1988.
- [4] Baldini, F., Chester, A. N., Homola, J., & Martellucci, S. (Eds.). *Optical chemical sensors* (Vol. 224). Springer Science & Business Media, 2006.
- [5] E. Hecht, *Optics* (4th Edition). Pearson Education Ltd., (2014).
- [6] S. Kher, S. Chaubey, J. Kishore, and S. M. Oak, "Detection of fuel adulteration with high sensitivity using turnaround point long period fiber gratings in B/Ge doped fibers," *Sens. J.* 13, 4482–4486 (2013).
- [7] Possetti, Gustavo Rafael Collere; Muller, Marcia; Fabris, José Luís. "Refractometric optical fiber sensor for measurement of ethanol concentration in ethanol-gasoline blend." *En Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International.* IEEE, 2009. p. 616-620.

- [8] Tang, Jaw-Luen; WANG, Jien-Neng. Chemical sensing sensitivity of long-period grating sensor enhanced by colloidal gold nanoparticles. *Sensors*, 2008, vol. 8, no 1, p. 171-184.
- [9] Z. Yan, C. Mou, Z. Sun, K. Zhou, H. Wang, Y. Wang, and L. Zhang, "Hybrid tilted fiber grating based refractive index and liquid level sensing system," *Opt. Commun.* 351, 144–148 (2015).
- [10] D. Wu, Y. Zhao, and O. Wang, SMF Taper Evanescent Field Based RI Sensor Combined with Fiber Loop Ring Down Technology (IEEE, 2015).
- [11] M. Komanec, T. Martan, T. Nemecek, and S. Zvanovec, "Multimode fiber tapers for reproducible refractometric liquid detection," *Opt. Eng.* 54, 047102 (2015).
- [12] K. R. Sohn, "Liquid sensors using refractive intensity at the end-face of a glass fiber connected to fiber-Bragg grating," *Sens. Actuators A* 158, 193–197 (2010).
- [13] Y. Huang, B. Chen, G. Chen, H. Xiao, and S. U. Khan, "Simultaneous detection of liquid level and refractive index with a long-period fiber grating based sensor device," *Meas. Sci. Technol.* 24, 095303 (2013).
- [14] Q. Jiang, D. Hu, and M. Yang, "Simultaneous measurement of liquid level and surrounding refractive index using tilted fiber Bragg grating," *Sens. Actuators A* 170, 62–65 (2011).
- [15] S. Khotiaintsev et al., "Measurement of Water Salinity Using Optical Fiber Refractometric Transducer," *Electronics and Communications, Special Issue "Problems in Electronics,"* vol. 27, part 1, pp. 27-30 (2006).
- [16] S. Khotiaintsev, "Discrete POF liquid-level sensor for measuring the level of gasoline and detecting water in automobile tanks," in Fig. 8. Sensitivity of developed sensors as a function of the RI of an external analyte. *Proceedings of the 18th International Conference on Plastic Optical Fibers* (2009), pp. 1–4,
- [17] S. Khotiaintsev, E. Llanito-Caudillo, S. Perez-Garcia, and J. Morales- Farah, "Optical-fiber refractometric sensor with semi-cylindrical optical detection element for measuring the level of gasoline," in *Proceedings of the IEEE Conference on Electronics, Robotics and Automotive Mechanics* (IEEE, 2009), pp. 468–473.

CAPÍTULO 3. Modelo Matemático del Sensor

3.1. Introducción

La respuesta de los sensores refractométricos con elemento de detección externo respecto al índice de refracción del medio externo (índice externo de refracción) depende de los parámetros de las fibras ópticas, así como de las constantes ópticas de los materiales y la forma de la superficie del elemento transductor. El patrón de propagación de la luz dentro del sensor es complejo, por tal motivo, es de suma importancia contar con una herramienta teórica para el análisis de los sensores refractométricos con elementos transductores de diferentes materiales y superficies.

El análisis teórico de los sensores refractométricos con elemento de detección externo se puede realizar utilizando óptica geométrica; dado que el tamaño de los elementos transductores y diámetros de las fibras ópticas es mucho mayor a la longitud de onda con que se trabaja, es posible realizar el análisis de los sensores mediante trazado de rayos.

3.2. Descripción general del sensor refractométrico con elemento de detección externo

Los sensores refractométricos con elemento de detección externo están formados de un transductor óptico acoplado vía fibra óptica a una fuente remota de luz y a un fotoreceptor. Estos sensores se pueden utilizar en dos configuraciones, transmisión y reflexión. En la figura 3.1 se muestran los diagramas genéricos de un sensor refractométrico con elemento de detección externo en los dos modos de configuración.

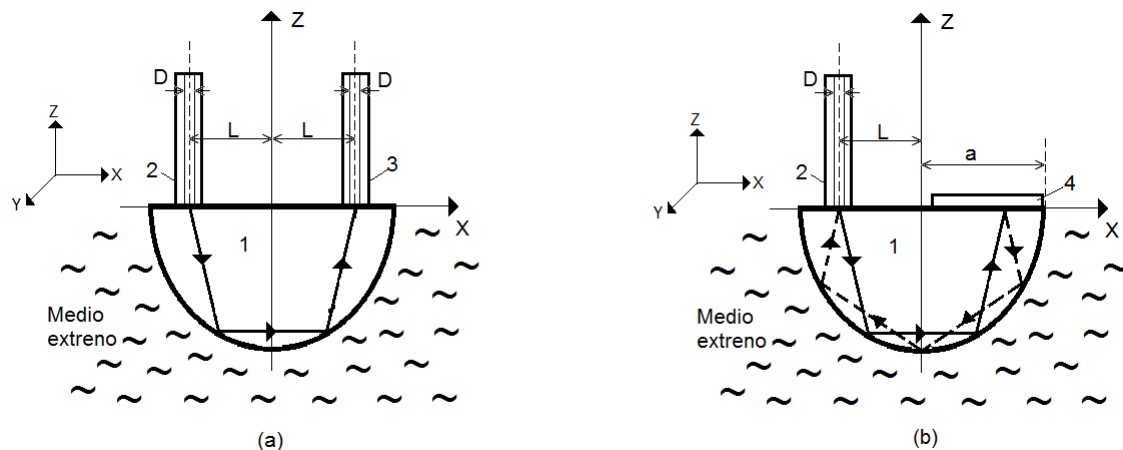


Figura 3.1. Esquema genérico de un sensor refractométrico con elemento de detección externo en configuración de Transmisión (a) y Reflexión (b): 1- elemento de detección externo, 2- fibra óptica transmisora, 3- fibra óptica receptora y 4- espejo.

El principio de funcionamiento de este tipo de sensores es el siguiente. En modo de transmisión, la luz de una fuente remota es acoplada a través de la fibra óptica transmisora al elemento transductor óptico; la luz se propaga mediante reflexiones internas (parciales y/o totales dependiendo de ángulos de incidencia de cada rayo al interfaz de elemento de detección y medio circundante y relación de índices de refracción de estos dos medios) hasta llegar al plano de salida del elemento de

detección ($Z=0$), en donde una parte de los rayos con su respectiva potencia óptica es acoplada al núcleo de la fibra óptica receptora, la cual a su vez está conectada al foto receptor. En modo de reflexión, la fibra óptica receptora es sustituida por un espejo, de tal manera que la radiación óptica se propaga dos veces (ida y vuelta) en el elemento de detección: al llegar de regreso al plano de entrada parte de los rayos con su respectiva potencia óptica es acoplada al núcleo de la fibra óptica receptora y propaga por esta fibra óptica hacia un acoplador direccional de tipo "Y" y luego a un fotoreceptor. Cuando el elemento de detección se encuentra en aire, la reflectancia de la interfaz del transductor y el medio externo es mayor; la reflectancia disminuye con el aumento del índice de refracción del medio externo, debido a una menor diferencia entre los índices de refracción de ambos medios. Por esto, la transmitancia del sensor es una función del índice externo de refracción.

En este sensor, la señal de salida que se registra es la corriente del fotoreceptor, de tal manera que la transmitancia T en configuración de transmisión (o reflectancia R en el modo de reflexión) del sensor está dada por la corriente del foto receptor, la cual es una función del índice de refracción del medio externo y los parámetros geométricos y ópticos del elemento de detección y las fibras ópticas. Considerando que la potencia óptica de la fuente es estable, la respuesta del fotoreceptor es lineal en todo intervalo de la intensidad de la luz incidente sobre él, y los cocientes de transmisión de las fibras ópticas son constantes, se puede asumir que la transmitancia T (o reflectancia R) es una función del índice externo de reflexión.

La función de transmitancia del sensor $T(n)$ es la relación entre la potencia de entrada, P_1 y la potencia de salida, P_2 del sensor. La potencia de entrada P_1 es una constante y la potencia de salida P_2 es una función del índice externo de refracción:

$$T(n) = \frac{P_2(n)}{P_1} \quad (3.1)$$

Debido a que la potencia de entrada P_1 no se puede medir experimentalmente ya que es la potencia de la luz en el núcleo de la fibra óptica. Por esto, es conveniente caracterizar el funcionamiento experimental del sensor en términos de la función de Transmitancia relativa, T^* :

$$T^*(n) = \frac{P_2(n)}{P_2(\text{aire})} = \frac{T(n)}{T(n=1)} \quad (3.2)$$

dónde $P_2(n)$ es la potencia óptica medida en un medio externo distinto al aire, $P_2(\text{aire})$ es la potencia óptica de salida medida con el elemento detector en el aire y $T(n=1)$ es la transmitancia del sensor medida en el aire. La función $T^*(n)$ es una función que está libre de la potencia de entrada P_1 y su posible variación por los efectos de la temperatura sobre la fuente de luz, la degradación de la fuente de luz, las pérdidas de potencia introducidas por las fibras ópticas y pérdidas por el acoplamiento imperfecto de las fibras ópticas con el elemento de detección (transductor); es decir, la función $T^*(n)$ está libre de las pérdidas ópticas y variaciones de potencia que no dependen del índice de refracción del medio circundante, sólo depende del índice de refracción del medio externo bajo parámetros fijos del sensor.

De manera similar, en los sensores configurados en el modo de reflexión tenemos la función de Reflectancia $R(n)$, descrita por la relación entre la potencia óptica a la entrada del sensor P_1 y la potencia a la salida del sensor P_2 . (En el modo de reflexión la luz de entrada P_1 y salida P_2 es la luz que viaja en los sentidos contrarios en la misma fibra óptica (2) de la configuración mostrada en la figura 3.1 (b)).

$$R(n) = \frac{P_2(n)}{P_1} \quad (3.3)$$

En el modo de reflexión también podemos introducir la función de Reflectancia relativa $R^*(n)$, que es la razón de la potencia de salida $P_2(n)$ medida con sensor en un medio diferente al aire y la potencia de salida medida con el sensor en el aire $P_2(\text{aire})$:

$$R^*(n) = \frac{P_2(n)}{P_2(\text{aire})} = \frac{R(n)}{R(n=1)}, \quad (3.4)$$

$R(n=1)$ es la reflectancia del sensor medida en el aire.

3.2.1 Análisis geométrico del sensor refractométrico con transductor externo

En este trabajo se analiza la respuesta de tres elementos de detección con diferentes formas geométricas, el primero se trata de una semiesfera, y los otros dos son semielipsoidales (Figura 3.2). El elemento Semi-elipsoidal A tiene como característica que las dimensiones en el eje z son mayores a las dimensiones de los ejes x e y, es decir, presenta la forma de una semiesfera alargada. En el caso del elemento Semi-elipsoidal B, las dimensiones en el eje z son menores a las de los ejes x e y, de tal manera que podemos decir que es una semiesfera achatada.

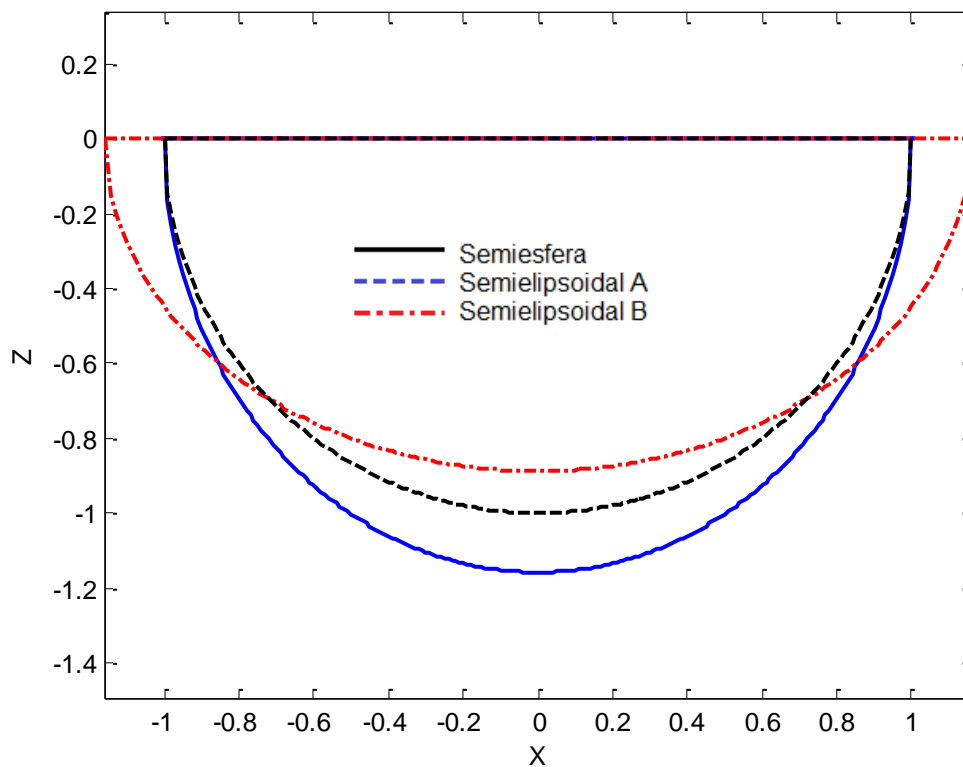


Figura 3.2. Geometría de los elementos de detección en el plano xz.

Una vez definida la geometría de los elementos transductores, comencemos con el análisis de las trayectorias de los rayos dentro de los elementos de detección. Los rayos que viajan dentro de los elementos transductores pueden seguir diferentes rutas.

Empecemos el análisis con la trayectoria más sencilla que se puede presentar, es decir la trayectoria de un rayo que sufre dos reflexiones dentro del elemento transductor semi-esférico.

Considerando que el elemento transductor se encuentra rodeado por aire y que el índice de refracción del elemento transductor de PMMA es de $n_e=1.492$. El ángulo crítico para una un rayo que incide en la interfaz del elemento transductor y el medio externo se puede obtener mediante la ley de Snell de la siguiente forma.

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_{ext}}{n_e}\right) \quad (3.5)$$

Donde n_{ext} es el índice de refracción del medio externo y n_e es el índice de refracción del elemento transductor. Cuando el elemento transductor se encuentra en aire, el ángulo crítico obtenido es $\theta_c=42.09^\circ$. En la figura 3.3 podemos observar el caso donde el rayo presenta dos reflexiones dentro del elemento transductor, en ese caso los ángulos de incidencia en ambas reflexiones son igual a $\theta_i = 45^\circ$, el valor es mayor al ángulo crítico, por tanto, nuestro sensor está operando en reflexión total interna, en otras palabras, toda la potencia está siendo reflejada dentro del elemento transductor. Por otro lado, un parámetro importante en nuestro sensor es la posición de las fibras ópticas respecto al elemento transductor, definamos el parámetro adimensional Λ , como la relación de la distancia z entre el punto de incidencia del rayo en el elemento transductor y el centro del elemento entre el radio del elemento de detección, a . Para el caso de la trayectoria con dos reflexiones, el parámetro $\Lambda=0.71$.

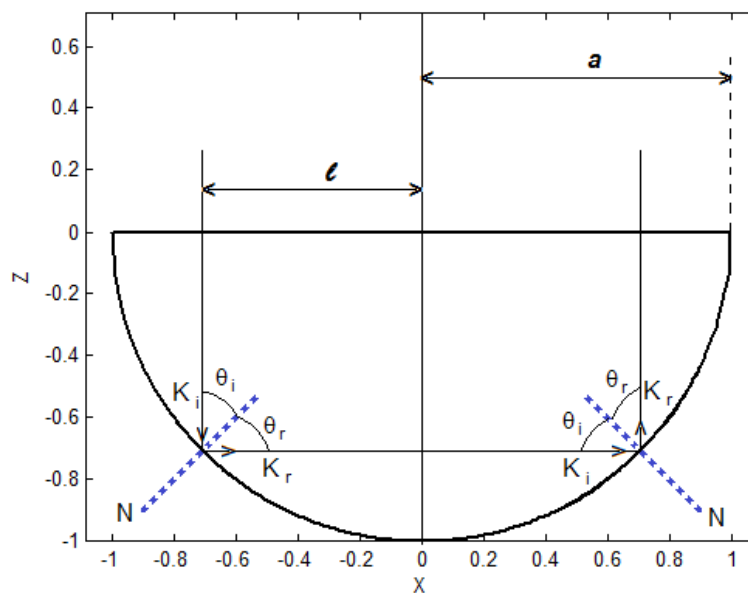


Figura 3.3. Trayectoria de un rayo dentro del transductor semiesférico. K_i - rayo incidente, K_r - rayo reflejado, θ_i - ángulo del rayo incidente, θ_r - ángulo del rayo reflejado y N - la normal a la interfaz entre el transductor y el medio externo.

En la siguiente tabla se muestran los ángulos críticos obtenidos en diferentes sustancias como medio externo que son de nuestro particular interés.

Tabla 3.1. Ángulos críticos para diferentes sustancias actuando como medio externo.

Sustancia	Índice de refracción (@589 nm)	Ángulo Crítico
Agua	1.333	63.30°
Agua salada (120 ppm)	1.347	64.53°
Agua salada (350 ppm)	1.375	67.16°
Anticongelante	1.392	68.90°

Gasolina	1.432	73.69°
----------	-------	--------

Observando la figura 3.3 podemos notar que para todas las sustancias mencionadas en la Tabla 3.1, el sensor opera en reflexión total interna y por tanto no podemos detectar el cambio de medio externo.

Analicemos otras trayectorias que pueden seguir los rayos con la finalidad de modificar el ángulo de incidencia y poder determinar qué sustancias podemos detectar (Figura 3.4).

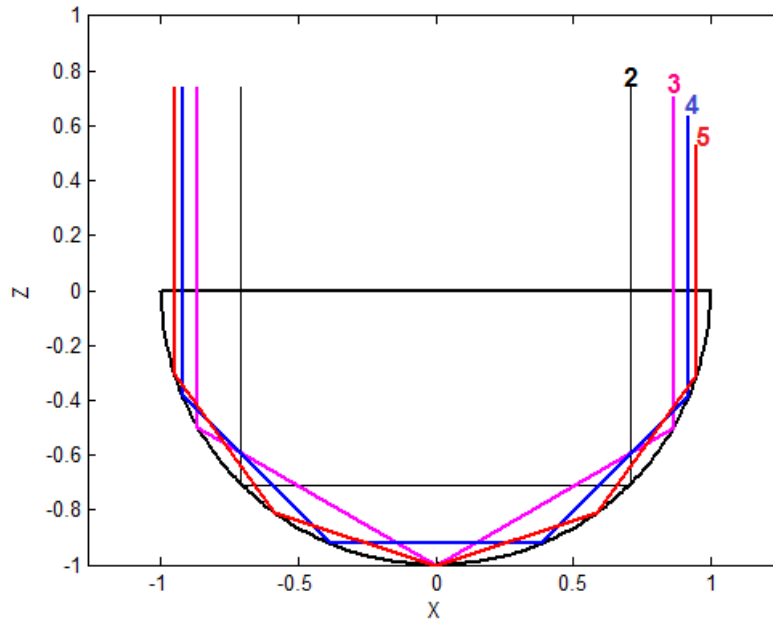


Figura 3.4. Trayectorias de algunos rayos dentro del elemento transductor semiesférico en función de la distancia adimensional del punto de entrada del rayo, Λ .

Tabla 3.2. Relación entre el número de reflexiones, ángulo de incidencia y distancia adimensional Λ en el elemento de detección semiesférico.

# de Trayectoria (Vean la Fig. 3.5)	Número de Reflexiones	Ángulo	Λ
1	2	45°	0.71
2	3	60°	0.86
3	4	67.5°	0.92
4	5	72°	0.95
5	6	75°	0.97

Comparando la Tabla 3.1 con la Tabla 3.2, se ve que para poder discriminar entre aire y agua como medio externo, es necesario trabajar con un ángulo de incidencia mayor a $\theta_c=42.09^\circ$ correspondiente a la interfaz PMMA-Aire y menor a $\theta_c=63.3^\circ$ correspondiente a la interfaz PMMA - Agua. Esto implica trabajar con las fibras ópticas en una posición de $\Lambda=0.71$ si queremos discriminar entre aire y agua o $\Lambda=0.86$ para poder discriminar entre aire, agua y soluciones acuosas. Para poder discriminar entre aire, agua, soluciones acuosas, anticongelante y gasolina, se necesita cumplir con un ángulo de incidencia mayor que $\theta_c=42.09^\circ$ correspondiente a la interfaz PMMA - Aire y menor a $\theta_c=73.69^\circ$ correspondiente a la interfaz PMMA - Gasolina, es decir cumplir con una distancia adimensional $\Lambda=0.95$.

En el caso del elemento semielipsoidal A el comportamiento es muy similar al que se presenta en el elemento semiesférico, dado que la variación en la geometría se realiza en el eje z sin afectar la geometría el eje x.

Tabla 3.3. Relación entre el número de reflexiones, ángulo de incidencia y distancia adimensional Λ en el elemento de detección semielipsoidal A.

# de Trayectoria (Vean la Fig. 3.6)	Número de Reflexiones	Ángulo	Λ
2	2	45°	0.71
3	3	60°	0.86
4	4	67.5°	0.93
5	5	72°	0.95
6	6	75°	0.96

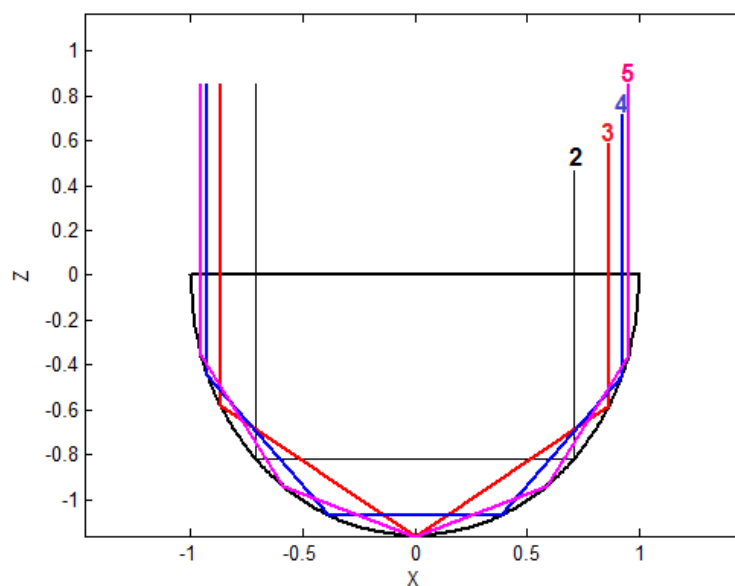


Figura 3.5. Trayectorias de algunos rayos dentro del elemento transductor semielipsoidal A en función de la distancia adimensional del punto de entrada del rayo, Λ .

En el elemento semielipsoidal B al modificar la geometría de este elemento en el eje x, notamos que hay un cambio en las distancias adimensionales Λ a las que ocurren los diferentes números de reflexiones internas en el transductor.

Tabla 3.3. Relación entre el número de reflexiones, ángulo de incidencia y distancia adimensional Λ en el elemento de detección semielipsoidal B.

# de Trayectoria (Vean la Fig. 3.7)	Número de Reflexiones	Ángulo	Λ
2	2	45°	0.61
3	3	60°	0.82
4	4	67.5°	0.86
5	5	72°	0.92
6	6	75°	0.95

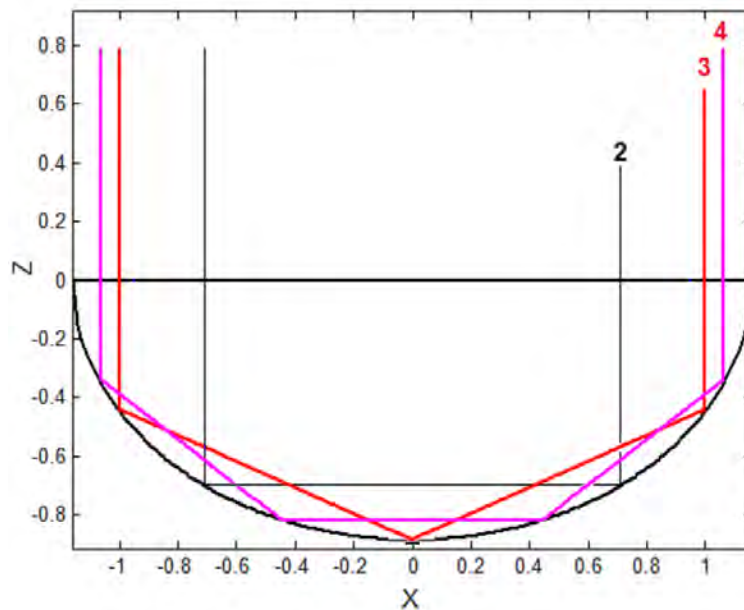


Figura 3.6. Trayectorias de algunos rayos dentro del elemento transductor semielipsoidal B en función de la distancia adimensional del punto de entrada del rayo, Λ .

3.3. Modelo matemático del sensor refractométrico con transductor externo orientado al software SRFO

En el análisis teórico de la propagación de la luz en el sensor refractométrico se realizó mediante trazado de rayos por medio del software no comercial SRFO, dado que las dimensiones de las fibras ópticas utilizadas y de los elementos de detección son muy grandes en comparación a la longitud de onda con que se trabaja. El modelado de los haces de luz se realiza mediante una gran cantidad de rayos elementales (aproximadamente 100,000 rayos), donde la distribución de las direcciones de propagación y la energía de éstos corresponde a los parámetros del haz y la energía del mismo. Cada rayo se analiza de manera individual, desde el ángulo con el que sale de la fibra transmisora y entra a la superficie del elemento detector, como la trayectoria dentro del elemento de detección hasta que se acopla de nuevo a la fibra óptica o sale de la superficie del elemento detector por el cambio en el índice de refracción del medio externo.

El análisis de las características refractométricas del sensor se realizó de mediante el cálculo de la transmitancia en función del índice de refracción externo, considerando como variables de estudio las constantes de los materiales y la geometría del elemento de detección y las fibras ópticas. En la figura 3.7 se muestra el esquema con las variables de estudio consideradas en el modelo matemático implementado para el análisis de los sensores en configuración de transmisión. Los parámetros de los elementos del sensor están referenciados al diámetro del elemento de detección, de la siguiente manera:

$$\Lambda = \frac{L}{a} , \quad (3.5)$$

$$\phi = \frac{D}{a} , \quad (3.6)$$

donde Λ es la distancia adimensional, L es la distancia que hay del centro del núcleo de la fibra óptica y el centro del elemento de detección, Φ es el diámetro adimensional, D el diámetro del núcleo de la fibra óptica y a es el radio del elemento de detección.

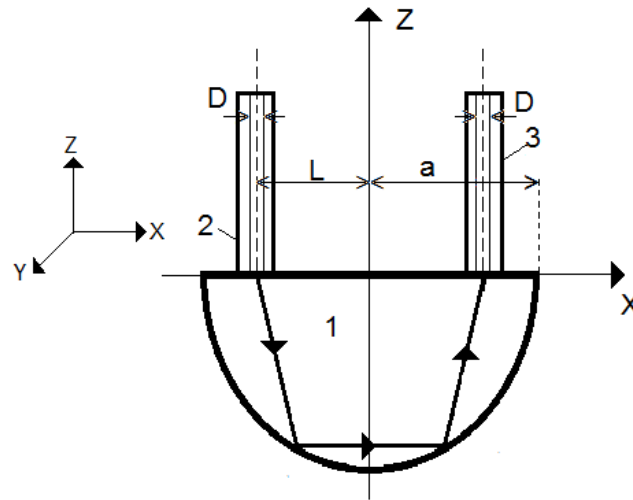


Figura 3.7. Esquema y los parámetros del sensor refractométrico (en configuración de transmisión): 1- elemento de detección, 2- fibra óptica transmisora, 3- fibra óptica receptora.

El modelo matemático del sensor refractométrico en modo de transmisión implementado en el software SRO se describe a continuación.

3.3.1 Definición de la superficie del elemento de detección

La superficie del elemento transductor se define mediante sus ecuaciones generales, colocando el centro de simetría de la superficie del elemento detector en el centro de las coordenadas y los ejes de simetría de la superficie se colocan en paralelamente a los ejes de las coordenadas.

3.3.2 Determinación de las coordenadas iniciales del rayo

Se genera un número aleatorio para presentar la distribución de los puntos de salida de los rayos en la faceta de la fibra óptica en contacto con la superficie del elemento de detección. Cada rayo elemental tiene como coordenadas iniciales un punto en el plano xy dentro de la circunferencia que representa el núcleo de la fibra óptica transmisora. Las coordenadas cilíndricas iniciales se determinan de la siguiente forma:

$$r_i = \rho\sqrt{x_1}, \text{ cuando } 0 \leq r_i \leq \rho, \quad (3.7)$$

$$\varphi = 2\pi x_2, \text{ cuando } 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad (3.8)$$

donde r_i es el radio de la fibra óptica, x_1 y x_2 son dos números aleatorios entre 0 y 1. Estas coordenadas iniciales también se pueden expresar en términos de un sistema de coordenadas rectangulares de la siguiente manera:

$$x_i = r_i \cos \varphi_i - \Lambda, \quad (3.9)$$

$$y_i = r_i \sin \varphi_i, \quad (3.10)$$

$$z_i = z_f. \quad (3.11)$$

Una vez obtenidas las coordenadas del punto inicial del rayo, es necesario calcular la dirección angular del rayo; la distribución de propagación y la energía de estos corresponden a los parámetros del haz. El análisis de las propiedades del sensor se realizó mediante la transmitancia, T , en función del índice de refracción del medio externo n , considerando como variables las constantes de los materiales y la geometría de los elementos del sensor.

La dirección aleatoria se encuentra limitada por la apertura numérica, NA , de la fibra óptica y se determina mediante dos ángulos directores:

$$\theta_i = \text{arc sen} \left(\frac{NA}{n_e} \right) x_3, \text{ cuando } 0 \leq \theta_i \leq \theta_{max}, \quad (3.12)$$

$$\Psi_i = 2\pi x_4, \text{ cuando } 0 \leq \Psi_i \leq 2\pi, \quad (3.13)$$

NA es la apertura numérica de la fibra óptica, n_e es el índice de refracción del elemento de detección, x_3 y x_4 son números aleatorios entre 0 y 1, θ_{max} es la apertura angular de la fibra óptica (el ángulo máximo de entrada y/o salida de la luz), calculado como:

$$\theta_{max} = \text{arc sen} \left(\frac{NA}{n_e} \right). \quad (3.14)$$

El vector de dirección en coordenadas cartesianas queda determinado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} X_i &= \text{sen}\theta_i \cos\Psi_i, \\ Y_i &= \text{sen}\theta_i \text{sen}\Psi_i, \\ Z_i &= \cos\theta_i. \end{aligned} \quad (3.15)$$

3.3.3 Definición de las coordenadas y ángulo del punto de intersección del rayo con la superficie del elemento detector

Conociendo la dirección y posición del rayo, es posible obtener la ecuación vectorial de la recta, L , que describe la dirección del rayo:

$$L = p_0 + Pt, \quad (3.16)$$

P es el vector de dirección del rayo, p_0 es un punto en la recta. Las ecuaciones paramétricas de la ecuación vectorial de la recta son:

$$\begin{aligned} L_x &= p_{0x} + P_x t, \\ L_y &= p_{0y} + P_y t, \\ L_z &= p_{0z} + P_z t. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Al sustituir las ecuaciones paramétricas de la ecuación vectorial de la recta en la ecuación de la superficie del elemento de detección obtenemos el valor de la variable t . Al sustituir el valor de t en las ecuaciones paramétricas de la recta encontramos el punto de intersección del rayo con la superficie del elemento de detección.

El ángulo de incidencia del rayo en el punto de intersección se puede calcular mediante el vector de dirección del rayo, L , y el vector normal a la superficie del elemento de detección, N :

$$\alpha = \arccos \frac{L \cdot N}{|L||N|} \quad . \quad (3.18)$$

Conociendo el valor de α podemos determinar si el rayo será refractado o reflejado. Mediante la ley de Snell podemos obtener el ángulo máximo para que el rayo sea reflejado dentro del elemento transductor. De tal manera que el ángulo α debe ser menor o igual a α_{max} :

$$\alpha_{max} = \arcsen \left(\frac{n_{ext}}{n_e} \right) \quad , \quad (3.19)$$

donde n_e es el índice de refracción del elemento de detección y n_{ext} es el índice de refracción del medio externo.

3.3.4 Cálculo de la potencia del rayo reflejado

La potencia del rayo reflejado en relación con la potencia del rayo incidente está dada por la siguiente expresión.

$$P_r = P_i R \quad (3.20)$$

Donde P_i es la potencia del rayo incidente, P_r la potencia del rayo reflejado y R es el coeficiente de reflexión de la interfaz entre el elemento de detección y el medio externo.

De acuerdo a las fórmulas de Fresnel, existen 2 tipos de polarización, cuando el campo eléctrico es paralelo al plano de incidencia: Polarización p (TM), y cuando el campo eléctrico es perpendicular o transversal al plano de incidencia: Polarización s (TE). Para estos diferentes casos las fórmulas para calcular el coeficiente de reflexión están dadas de la siguiente manera:

$$R_p (TM) = \begin{cases} \left[\frac{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos\alpha - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\alpha}}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos\alpha + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\alpha}} \right]^2, & \text{cuando } \alpha < \alpha_{max} \\ 1, & \text{cuando } \alpha > \alpha_{max} \end{cases} \quad (3.21)$$

$$R_s (TE) = \begin{cases} \left[\frac{\cos\alpha - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\alpha}}{\cos\alpha + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\alpha}} \right]^2, & \text{cuando } \alpha < \alpha_{max} \\ 1, & \text{cuando } \alpha > \alpha_{max} \end{cases} \quad (3.22)$$

Donde n_1 es el índice de refracción del elemento transductor, n_2 el índice de refracción del medio externo, α el ángulo de incidencia y α_{max} el ángulo máximo de incidencia.

Cuando se trabaja con luz no polarizada, el coeficiente de reflexión R_{np} está dado por el promedio de los coeficientes de reflexión para las polarizaciones s (TE) y p (TM), es decir:

$$R_{np} = \frac{R_p(TM) + R_s(TE)}{2} \quad (3.23)$$

3.3.5 Determinación de la dirección del rayo reflejado

De acuerdo a las leyes de la óptica geométrica, el rayo reflejado debe cumplir con las siguientes características:

- El rayo reflejado se encuentra en el mismo plano que el rayo incidente y la normal.
- El ángulo del rayo reflejado es igual al ángulo del rayo incidente.

Por tanto, es posible encontrar la dirección del rayo reflejado mediante la proyección del vector incidente sobre el vector normal y después restar dos veces este resultado al vector incidente.

3.3.6 Verificación de la incidencia del rayo en la fibra óptica receptora

El rayo debe cumplir con dos condiciones para incidir en la fibra óptica receptora:

- 1- El rayo debe intersectar a la fibra óptica receptora en los límites del núcleo de la fibra.
- 2- El ángulo de incidencia debe ser menor o igual a la apertura angular de la fibra óptica receptora: el ángulo máximo permitido, θ_{max} .

Considerando que la ecuación vectorial que representa al rayo, L , es definida como:

$$L = p_0 + Pt \quad (3.24)$$

Donde p_0 es un punto en la recta y P el vector de dirección del rayo, al sustituir las ecuaciones paramétricas de L en la ecuación del plano, se encuentra el punto de intersección del rayo con el plano $z=0$. Finalmente, se calcula la distancia entre el punto de intersección y el centro del núcleo de la fibra óptica receptora, si la distancia es menor al radio del núcleo de la fibra óptica, entonces el rayo cumple con la 1ª condición.

Para comprobar que cumple con la segunda condición, se calcula el ángulo de incidencia de la siguiente forma:

$$\alpha_r = \cos^{-1} \left(\frac{NL}{|N||L|} \right) \quad (3.25)$$

Una vez obtenido el ángulo del rayo reflejado, debe compararse con el ángulo máximo permitido de la siguiente manera:

$$\text{sen } \alpha_r < \frac{NA}{n_e} \quad (3.26)$$

Al cumplir con las dos condiciones se considera que el ángulo incide en la fibra óptica receptora y se almacena en la potencia de salida en un arreglo.

Este programa fue implementado en Visual Basic como un programa de cálculo con una interfaz gráfica, en donde se puede observar la trayectoria de los rayos dentro del elemento de detección (Figura 3.8)..

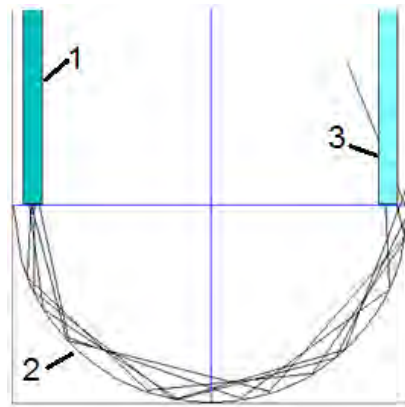


Figura 3.8. Resultado del trazado de rayos en modo de transmisión mediante SRFO (se presenta el plano transversal): 1- fibra óptica transmisora, 2- elemento de detección semiesférico, 3- fibra óptica receptora.

3.3.7 Análisis del sensor en modo de reflexión mediante SRFO

SRFO nos permite el análisis de sensores en el modo de Transmisión, pero no podemos realizar la simulación en modo de Reflexión de forma directa. Por esto, el análisis en el modo de Reflexión fue necesario realizarlo en dos etapas. La primera etapa considera la trayectoria de la luz en el mismo sentido que en el análisis en modo de transmisión; para la segunda etapa, se considera que la transmisión se realiza en el sentido contrario. En ambas etapas SRFO realiza el análisis de cada uno de los rayos siguiendo los pasos desde 3.3.2 hasta 3.3.6.

El sensor refractométrico genérico que se considera en este trabajo consiste de una fibra óptica multimodo acoplada a un extremo del transductor (elemento de detección) como lo demuestra la figura 3.9. En otro extremo del transductor se encuentra un espejo que refleja la luz incidente en el sentido contrario. Una parte de esta luz llega a la faceta de la misma fibra óptica y viaja por el núcleo de esta fibra al fotodetector.

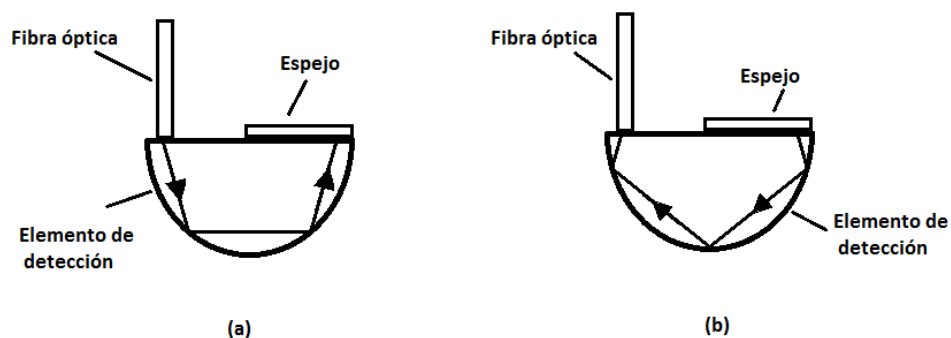


Fig. 3.9. Esquema del funcionamiento del sensor en modo de Reflexión: (a) Propagación en el sentido directo - Etapa 1, (b) Propagación en el sentido contrario - Etapa 2.

La reflectancia del transductor, R , se calcula mediante la integración de las contribuciones de todos los rayos que alcanzan el núcleo de la fibra dentro de los límites de su NA .

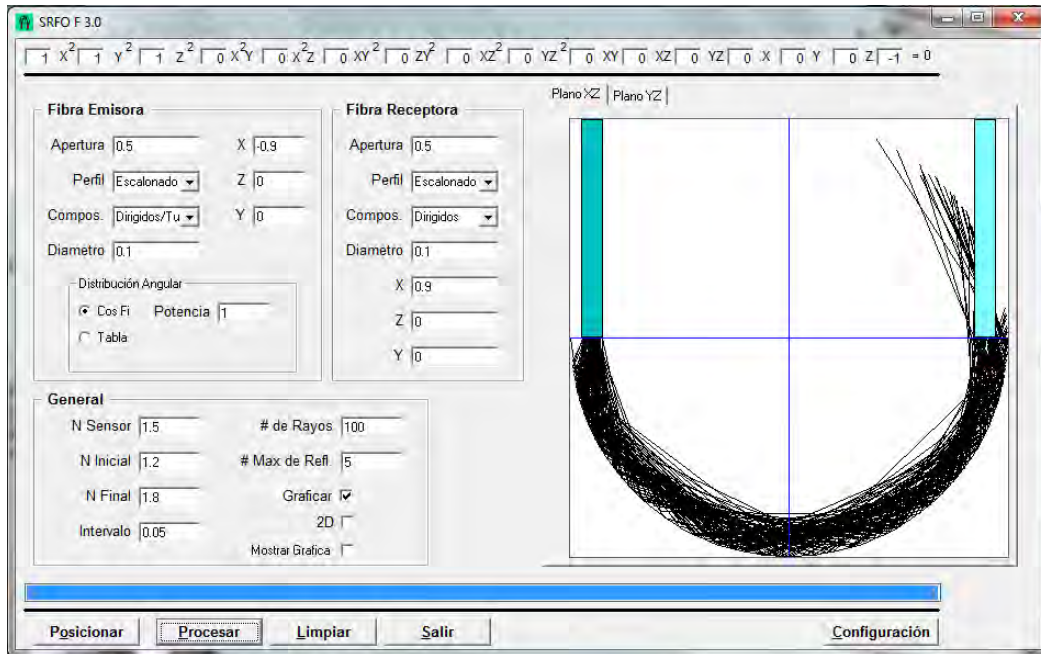


Figura 3.10. Pantalla de la interfaz de usuario del software SRFO (el caso de análisis de sensores en modo de transmisión).

Al finalizar el trazado de rayos, el software calcula la Transmisión, $T(n)=I_{salida}(n)/I_{entrada}$ ("Transmisión absoluta") para el rango deseado de índice externo de refracción, n . Luego se calcula la Transmisión relativa, $T^*(n)=T(n)/T_{n=1}$. Un ejemplo de las funciones $T(n)$ y $T^*(n)$ se presenta en la figura 3.11.

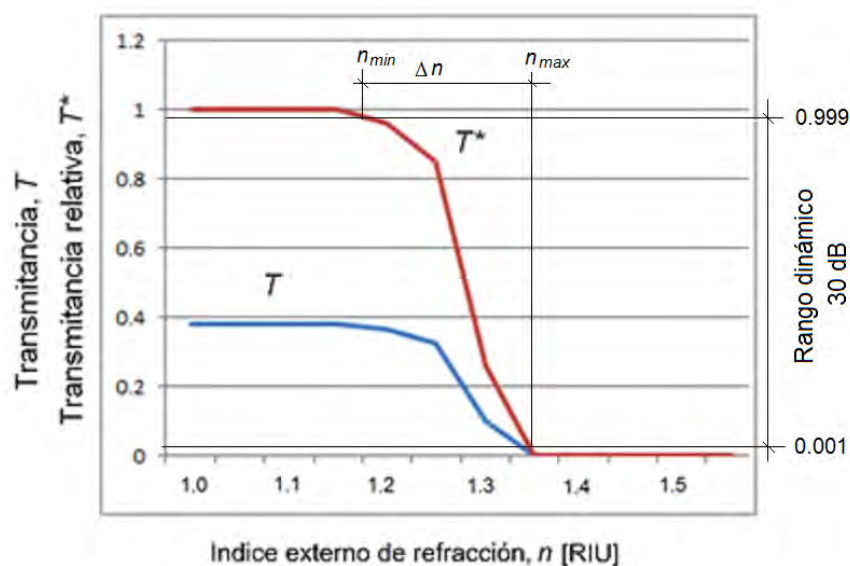


Figura 3.11. Transmitancia, T , y Transmitancia relativa, T^* en función del índice externo de refracción, n , del sensor con un elemento transductor semiesférico calculado con el software SRFO.

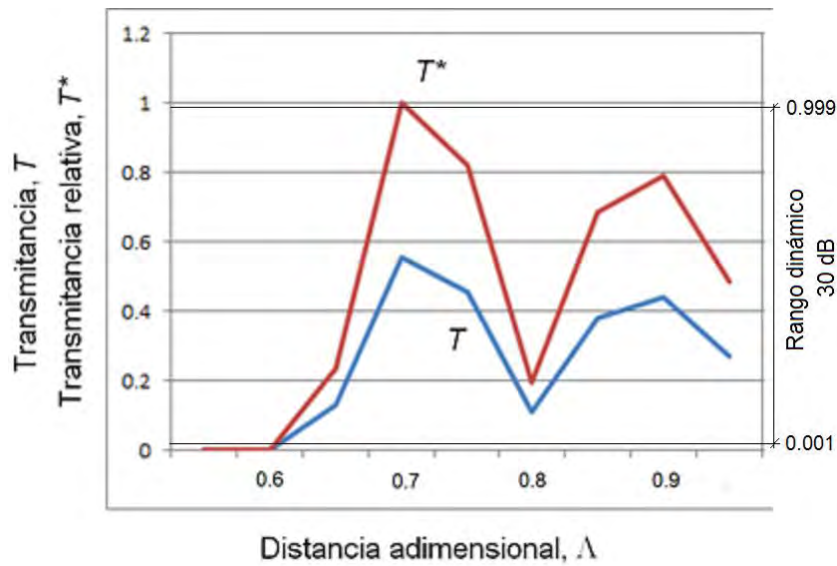


Figura 3.12. Transmitancia, T , y Transmitancia relativa, T^* , en función de la distancia adimensional, Δ , del sensor con un elemento transductor semiesférico calculado con el software SRFO.

Además, se calcula la Transmitancia T y Transmitancia relativa, T^* , en función de la distancia adimensional Δ . Un ejemplo de las funciones $T(\Delta)$ y $T^*(\Delta)$ se presenta en la figura 3.12.

Las dos funciones nos permiten encontrar las combinaciones de parámetros geométricos y ópticos que aseguran la respuesta deseada del sensor, $T^*(n)$: su Campo (*Range*), el Alcance (*Span*), la Sensibilidad (*Sensitivity*), etc., junto con la mínima pérdida óptica intrínseca α y otras características esenciales de un instrumento de medición [2]-[3].

Conclusiones

Al realizar la evaluación de los diferentes paquetes de software nos encontramos con diversas dificultades y problemas en realización de simulaciones de sensores refractométricos de fibras ópticas con transductores externos; por tanto, podemos concluir que no existe un software comercial que cumpla con nuestras necesidades debido a que la mayoría de éstos son desarrollados para simular casos más generales como análisis de lentes, formación de imagen y tareas de iluminación.

Por otro lado, el software SRFO desarrollado específicamente para el análisis de sensores refractométricos con elemento de detección externo, es eficaz y útil, para los propósitos del presente trabajo.

Por esto, en investigaciones teóricas de funcionamiento de sensores considerados en este trabajo que se describen más adelante fue empleado el software SRFO.

El software SRFO implementa el método de trazado de rayos y permite introducir los parámetros físicos y geométricos de las fibras ópticas, transductores (elementos) de detección, la ecuación que describe la forma de la superficie de trabajo del transductor

(elemento de detección) y el índice de refracción externo. El coeficiente de reflexión de Fresnel se calcula en cada punto de la reflexión considerando la luz no polarizada. La reflectancia del transductor se obtiene mediante la integración de las contribuciones de todos los rayos que alcanzan el núcleo de la fibra dentro de los límites de su NA .

Referencias del Capítulo 3

[1] Khotiaintsev, K., "Desarrollo de una aplicación de simulación numérica de sensores refractométricos en fibras óptica", Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Puebla, México, 2005.

[2] A. Creus. Instrumentación Industrial. Publicaciones Marcombo. 1981.

[3] J. P. Bentley. Principles of Measurement Systems. 2nd Edition. Logmann Scientific & Technical. 1983.

CAPÍTULO 4. Instalación Experimental y Metodología del Experimento

4.1. Introducción

La caracterización experimental de los sensores refractométricos en modo de transmisión y en modo de reflexión requiere de configuraciones diferentes en la instalación experimental, aunque la mayoría de elementos esenciales requeridos para tal caracterización son similares o hasta idénticos. A continuación, se describe la instalación experimental, desde las muestras de los transductores refractométricos hasta los elementos comunes y especializados empleados en las dos configuraciones diferentes de la instalación experimental.

4.2. Descripción de la Instalación Experimental

La instalación experimental para estudio de las características de los sensores refractométricos con elemento de detección externo consta principalmente de cuatro partes fundamentales:

- Muestras de transductores
- Fuente de luz
- Fibras ópticas
- Foto receptor
- Divisor del haz (utilizado en el modo de reflexión únicamente)

4.2.1. Muestras de transductores refractométricos

Las muestras de transductores refractométricos utilizados en este trabajo fueron los siguientes: dos con superficie de trabajo semielipsoidal y uno semiesférico. Las ecuaciones que definen la forma de la superficie de trabajo de los sensores es la siguiente:

$$\text{Elemento Semiesférico: } x^2 + y^2 + z^2 = 1. \quad (4.1)$$

$$\text{Elemento Semi-elipsoidal A: } x^2 + y^2 + 0.746z^2 = 1. \quad (4.2)$$

$$\text{Elemento Semi-elipsoidal B: } 0.92x^2 + 0.92y^2 + 1.27z^2 = 1. \quad (4.3)$$

Las muestras de los transductores refractométricos semielipsoidales fueron fabricadas con dos barras de PMMA de 38 mm y 25mm de diámetro respectivamente, para cortar las barras de PMMA se utilizó un torno de control numérico XP4-SM, posteriormente las muestras fueron pulidas y abrillantadas [1]. A continuación, se muestran las imágenes (fotografías) de estos elementos.

Elemento Semi-elipsoidal A



Fig. 4.1. El transductor A (Fotografía).

Diámetro $d = 15.7$ [mm]

Ecuación (4.2) de la superficie de trabajo:

$$x^2 + y^2 + 0.746z^2 = 1$$

Esta forma de superficie (esferoide alargado, *prolate spheroid*) es relativamente cercana a la semiesfera. La dimensión en el eje z es ligeramente mayor de las dimensiones en los ejes x e y .

Elemento Semi-elipsoidal B



Fig. 4.2. El transductor B (Fotografía).

Diámetro $d = 23.7$ [mm]

Ecuación (4.3) de la superficie de trabajo:

$$0.92x^2 + 0.92y^2 + 1.27z^2 = 1$$

Esta forma de superficie (esferoide achatado, *oblate spheroid*) es notablemente distinta de la semiesfera. La dimensión en el eje z es menor en comparación a las dimensiones en los ejes x e y .

4.2.2. Fuente de luz

Al principio, se utilizó un diodo láser de la marca Coherent de longitud de onda $\lambda=670$ nm, y de haz elíptico. Este diodo láser permite la modulación del haz mediante un circuito integrado 555, que genera una señal de 300 Hz.

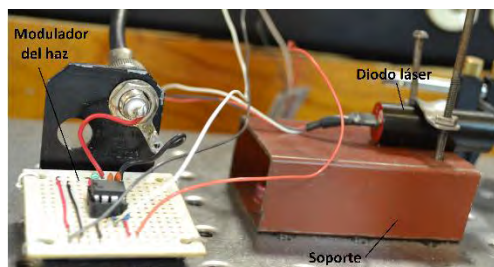


Figura 4.1. Diodo láser con el circuito modulador utilizado en el experimento (Fotografía).

Con el diodo láser se tuvieron dificultades que eran principalmente la forma elíptica del haz que dificultó el acoplamiento entre la fuente la fibra óptica. Para corregir la forma

del haz y disminuir las pérdidas por acoplamiento, se utilizó una lente cilíndrica (una varilla de acrílico de 6 mm de diámetro).

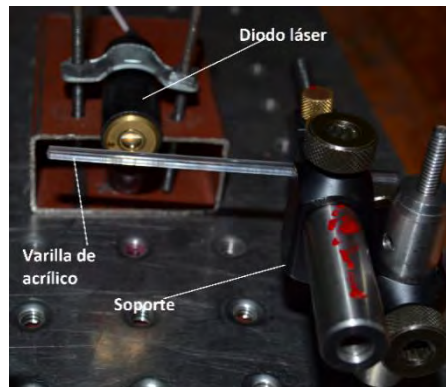


Figura 4.2. Diodo láser con una lente cilíndrica (Fotografía).

Con las modificaciones realizadas a la instalación, la amplitud de señal de salida de la fibra óptica directamente medida con el fotoreceptor alcanzaba un valor de 3 V, sin embargo, al realizar la evaluación del elemento de detección la señal era del orden de los 20 mV, por lo que se decidió cambiar de fuente.

La otra fuente utilizada es un láser de Helio-Neón de la marca Melles Griot, modelo 05-LHR-151. Este láser emite un haz de de 5 [mW] de potencia a una longitud de onda de $\lambda=632.8$ [nm], tiene un haz de diámetro 0.8 [mm] con divergencia de 1 mrad (las especificaciones del láser 05-LHR-151 se pueden consultar en el anexo A).

Con este láser fue posible obtener una señal en la fibra óptica, medida directamente con el fotodetector, aproximadamente del doble de la señal obtenida con el diodo láser.

La modulación del haz del láser 05-LHR-151 se realiza con un interruptor mecánico con motor eléctrico, que produce una señal cuadrada de 500 Hz (figura 4.3). También se utiliza un lente plano convexo de AN 2.4 para el acoplamiento óptico de láser y la fibra óptica (figura 4.4).

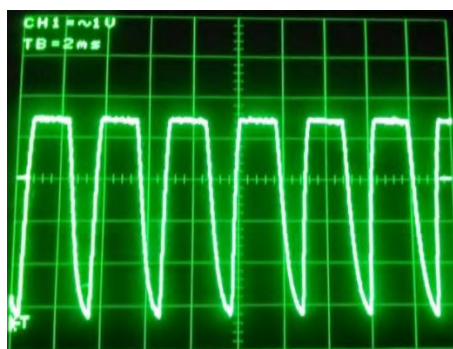


Figura 4.3. Señal a la salida del sensor (imagen obtenida con un osciloscopio).

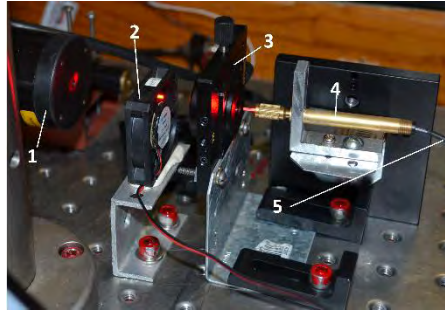


Figura 4.4. Unidad de acoplamiento: (1) Láser de HeNe, (2) Modulador del haz, (3) Soporte para la lente, (4) Sujetador de la fibra óptica (*Fiber Chuck*), (5) Fibra óptica (Fotografía).

4.2.3. Fibra óptica

Se utilizó una fibra óptica de plástico de polimetilmetacrilato (PMMA) de la marca Jiangxi Daishing POF, con núcleo de diámetro de 0.98 mm, con una apertura numérica de $NA=0.5$, índice de refracción del núcleo de 1.492 y perfil de índice escalonado. La decisión de utilizar la fibra Daishing POF se basa en su mayor NA que facilita el acoplamiento con las fuentes de tipo LED, además, una mayor NA aumenta el ancho de las zonas de transmisión y los rangos de índice de refracción externo n en donde trabaja el sensor. En la figura 4.5 se presenta la Transmitancia relativa T^* del sensor en el aire en función de la distancia adimensional Λ obtenida con dos diferentes POFs - la fibra óptica marca Daishing modelo POF y la fibra óptica marca Optimedia modelo OM Giga. Se observa el mayor ancho de la primera zona de transmisión y una unión más fuerte de la segunda y tercer zona, en comparación con la característica de transmisión del sensor con la fibra óptica marca Optimedia modelo OM Giga.

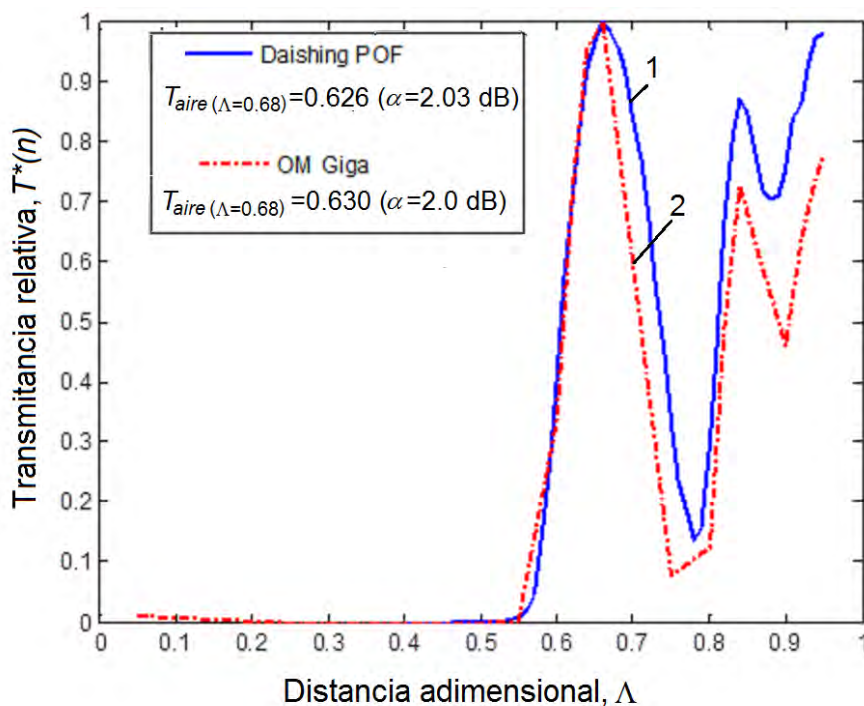


Figura 4.5. Transmitancia relativa T^* en función de la distancia adimensional Λ obtenida con dos diferentes POFs, considerando que el medio externo es el aire: Curva 1 (Azul) - la fibra óptica marca Daishing modelo POF; Curva 2 (Rojo) - la fibra óptica marca Optimedia modelo OM Giga.

Las fibras ópticas utilizadas fueron cortadas y posteriormente pulidas y abrillantadas en ambos extremos, también se comprobó que en la zona del núcleo no se tuvieran zonas con rugosidades o con niebla, repitiendo este procedimiento al inicio de cada uno de los experimentos realizados.

Las fibras ópticas fueron montadas en unidades de desplazamiento de la marca Thorlabs, modelo PT3, que permiten el movimiento de las fibras ópticas en tres ejes y presentan un rango de movimiento de 0 a 25 mm, con una resolución de 0.01 mm. Las fibras ópticas fueron sujetadas por medio de un conector V-Pin de HP para POF adherido a una barra de acrílico y montado en una placa metálica.

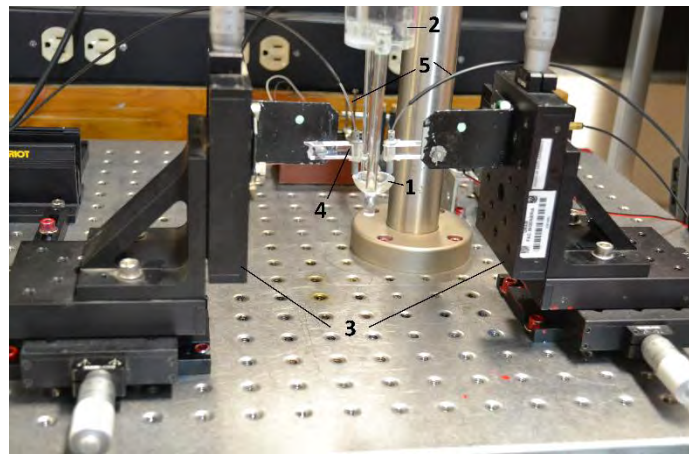


Figura 4.6. El sensor con las fibras ópticas montadas en la configuración de transmisión: (1) Transductor (Elemento detector), (2) Soporte para el elemento detector, (3) Unidades de desplazamiento, (4) Soporte para la fibra óptica y (5) Fibras ópticas (Fotografía).

4.2.4. Foto detector

Se utilizó un fototransistor PT331C (las especificaciones del fototransistor se encuentran en el anexo B), es un fototransistor NPN de silicón de alta sensibilidad y alta velocidad, con una sensibilidad espectral relativa de 0.74 a la longitud de onda del láser empleado ($\lambda=632.8$ nm). La salida de este fototransistor se conecta a un microcontrolador Arduino UNO, que funciona como interfaz entre la computadora y el sistema electroóptico, permitiendo el procesamiento de los datos obtenidos mediante el software MatLab.

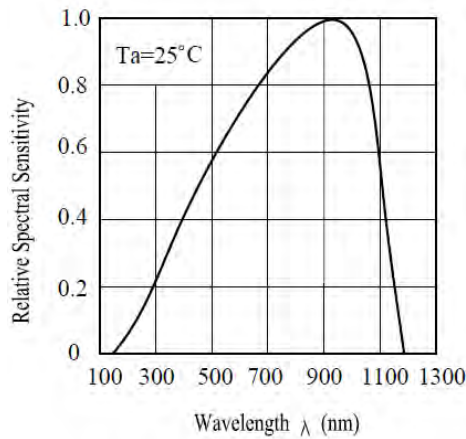


Figura 4.7. Sensibilidad espectral relativa del fototransistor PT331C.

El Arduino está programado para poder leer los valores de voltaje obtenidos en el fotodetector, posteriormente los almacena en una hoja de texto. Una vez realizadas las mediciones necesarias para cada la caracterización del elemento de detección bajo estudio, mediante un programa en MatLab es posible obtener una gráfica del comportamiento del sensor al variar la distancia adimensional.

4.2.5. Divisor del haz

El divisor del haz es de suma importancia para el funcionamiento de los sensores refractométricos en modo de Reflexión. En un principio se decidió utilizar un acoplador óptico multimodo 1x2 50/50 comercial. Este acoplador cuenta con conectores tipo (FC/APC), utiliza fibra óptica MM 50/125, diseñado para trabajar a una longitud de onda de $\lambda=850$ nm.

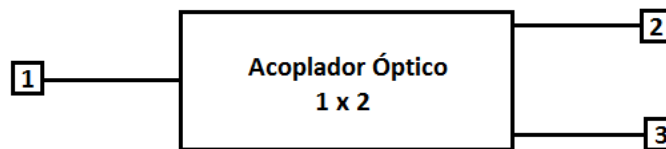


Figura 4.8. Esquema del acoplador óptico utilizado en el experimento: (1) Entrada, (2) Salida 1, (3) Salida 2.

Fue planteado alimentar una de las salidas con la señal de la fuente láser, la entrada del acoplador conectada al elemento de detección y el segundo puerto de salida del acoplador óptico conectarlo al fotodetector.

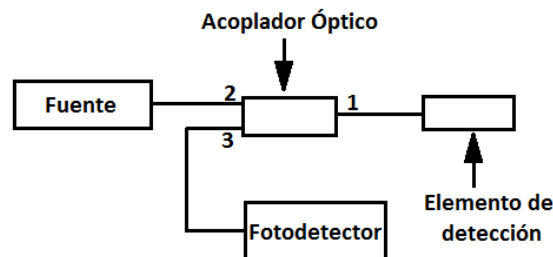


Figura 4.9. Esquema de la conexión del acoplador óptico.

Sin embargo, con este acoplador óptico se presentaron dificultades, incluyendo grandes pérdidas por reflexiones dentro del acoplador óptico. La posible causa es que este modelo del acoplador está diseñado para operar a una longitud de onda de $\lambda=850$ nm, mientras que la longitud de onda de nuestra fuente es de $\lambda=633$ nm. Otro aspecto a considerar es el propio diseño del acoplador óptico, dado que estos dispositivos están diseñados para que no exista una comunicación entre las salidas, es decir que la transmisión entre los puertos 2 y 3 sea nula. Por otro lado, la fibra óptica del acoplador tiene un diámetro del núcleo de $d_n=50$ μm , lo cual dificulta el acoplamiento de la fuente con el núcleo la fibra óptica y contribuye a que parte de la luz sea enviada por el revestimiento (*cladding*) de la fibra óptica ocasionando reflexiones en el interior de este acoplador que puede contribuir con las grandes pérdidas que se presentan en esta configuración.

La otra opción que se probó fue una segunda fibra óptica ubicada a un costado de la fibra óptica transmisora y paralela a esta, con la finalidad de poder detectar la señal reflejada por el espejo. La fibra transmisora y la fibra receptora tienen las mismas características, son fibras de PMMA, de la marca Daishing POF, con diámetro del núcleo de $d_n=1$ mm y una $NA= 0.5$.

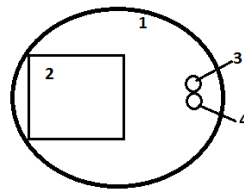


Figura 4.10. Esquema de la configuración de las fibras ópticas diferentes para la transmisión y recepción de la radiación óptica en el modo de reflexión (vista aérea): (1) Elemento de detección, (2) Espejo, (3) Fibra óptica transmisora y (4) Fibra óptica receptora.

Las fibras ópticas fueron montadas en un soporte fabricado con una lámina metálica, posteriormente este soporte se montó en una unidad de desplazamiento PT3 de Thorlabs que nos permite mover las fibras ópticas en 3 ejes.

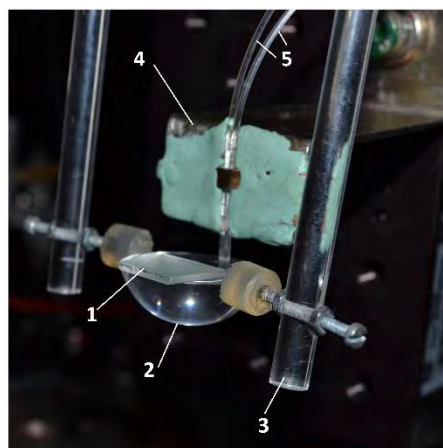


Figura 4.11. Montaje de dos fibras ópticas diferentes para la transmisión y recepción de la radiación óptica en el modo de reflexión: (1) Espejo, (2) Elemento de detección, (3) Soporte del elemento de detección, (4) Soporte para las fibras ópticas, (5) Fibras ópticas (Fotografía).

Utilizando esta configuración se obtuvieron las características de los elementos de detección en modo de reflexión de manera experimental.

4.3. Metodología de la Caracterización de los Sensores en Modo de Transmisión y Reflexión

4.3.1 Las características de medida

Para los dispositivos de medición se han definido una serie de características que describen su funcionamiento de los mismos [2], [3], tales como:

- Campo de medición (*Range*): Conjunto de valores de la variable que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida del instrumento; viene expresado estableciendo los dos valores extremos.
- Alcance (*Span*): La diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.
- Sensibilidad (*Sensitivity*): La razón entre el incremento de la lectura e incremento de la variable que la ocasiona.
- Resolución (*Resolution*): Representa el mínimo incremento del parámetro bajo medición que puede ser identificado por el sistema.
- Rango dinámico (*Dynamic range*): La relación de un máximo nivel especificado de un parámetro, como potencia, corriente, voltaje o frecuencia, con el valor perceptible mínimo de aquel parámetro. Se especifica en decibeles.
- Precisión (*Accuracy*): El grado de concordancia entre los datos de un grupo de mediciones e indica que tan esparcidos se encuentran.
- Exactitud (*Precision*): La exactitud indica que tan cerca está el valor medido por los instrumentos de medición del valor verdadero de la medición.
- No linealidad (*Nonlinearity*): La diferencia entre el comportamiento real del instrumento y la línea recta que aproxima dicho comportamiento.

4.3.2 Configuración experimental

El experimento consistió en la caracterización de la respuesta de los elementos transductores en función de la distancia adimensional Λ .

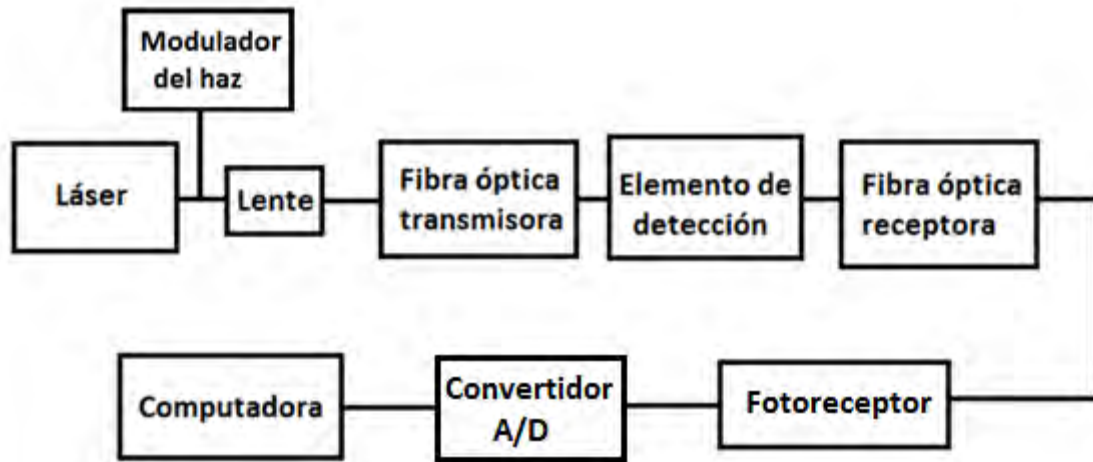


Figura 4.12. Diagrama de bloques del experimento en el modo de transmisión.

La fibra transmisora y la fibra receptora se montaron en unidades de desplazamiento que permiten el movimiento en tres ejes, que permite posicionar las fibras en el eje transversal del elemento detector y variar la distancia entre el centro de la fibra óptica y el elemento transductor. El elemento transductor se encuentra fijo. Este experimento se realizó con los elementos de detección antes mencionados.

La caracterización de los sensores en modo de Reflexión se realizó con los cuatro elementos de detección, descritos anteriormente, y el mismo tipo de fibra óptica utilizada en la caracterización en modo de transmisión. La principal variación que existe en esta configuración es la sustitución de la fibra óptica receptora por un espejo.

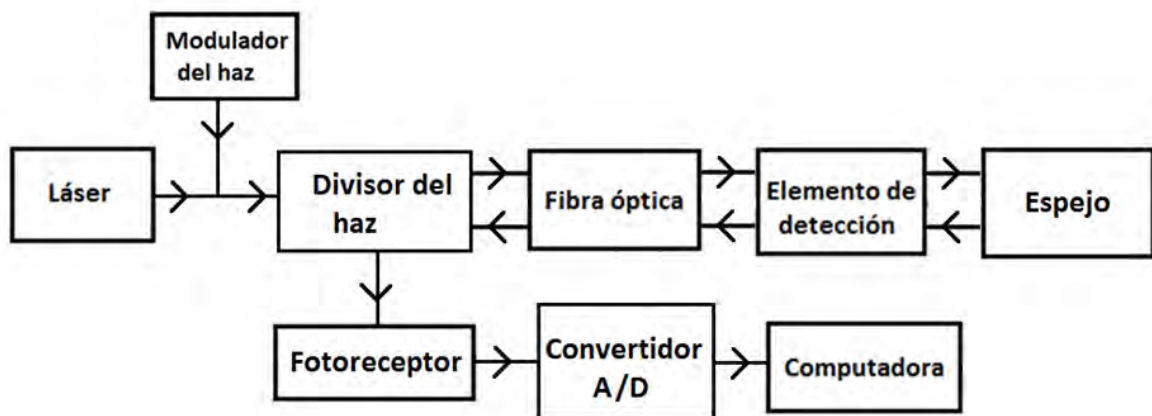


Figura 4.13. Diagrama de bloques del experimento en el modo de Reflexión.

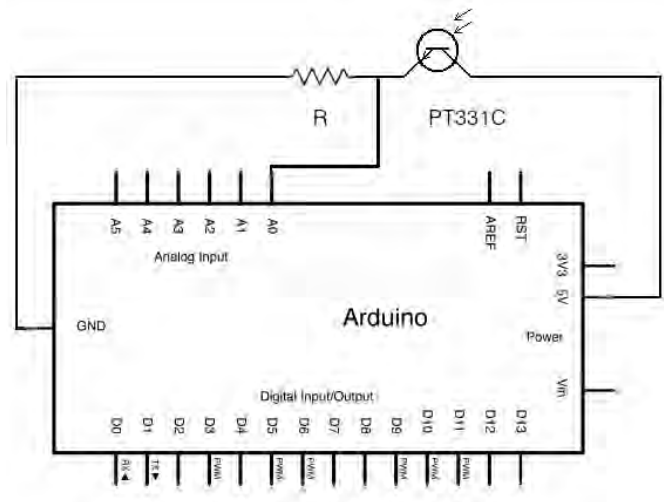


Figura 4.14. Diagrama de conexiones entre el Arduino y el fototransistor PT331C.

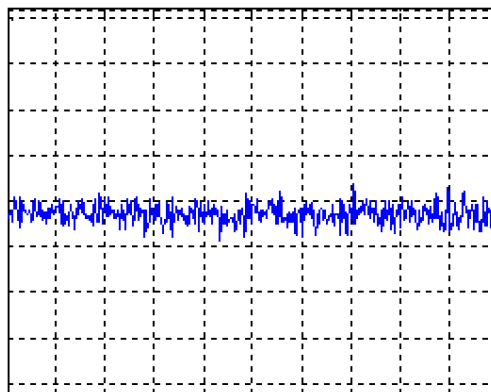


Figura 4.15. Oscilograma de ruido a la salida del fototransistor. Escala horizontal 2ms/div, escala vertical 2mV/div. El voltaje de ruido es de 2.2 V pico a pico o 1.56 V rms

El objetivo de este experimento fue encontrar la respuesta del sensor a la variación de la distancia adimensional Λ , con la finalidad de compararlo con lo obtenido en el modo de transmisión. El experimento consistió en la caracterización de la respuesta de los elementos transductores en función de la distancia adimensional Λ .

4.3.3 El Campo de Medida, Alcance, Resolución, Limite de Detección, Rango Dinámico y Sensibilidad

Las características de adquisición de datos que posee nuestro sistema de medición dependen esencialmente de las especificaciones técnicas del microcontrolador Arduino UNO y de su convertidor analógico digital en particular.

Características del microcontrolador Arduino UNO y su convertidor A/D:

La placa Arduino posee 6 canales conectados a un conversor analógico digital de 10 bits. Esto significa que convertirá tensiones entre 0 y 5 voltios a un número entero entre 0 y 1023. Esto proporciona una resolución en la lectura de: 5 voltios / 1024 unidades, o 0.0049 voltios (4.9mV) por unidad.

Es decir, nuestro sistema de medición mostrado en las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 posee un límite de detección de 4.9 mV, una resolución de 4.9 mV, un voltaje máximo de entrada de 5,017.6 mV y el rango dinámico de 1024 o 30.1 dB en mediciones de potencia óptica de la señal (Figura 4.16).

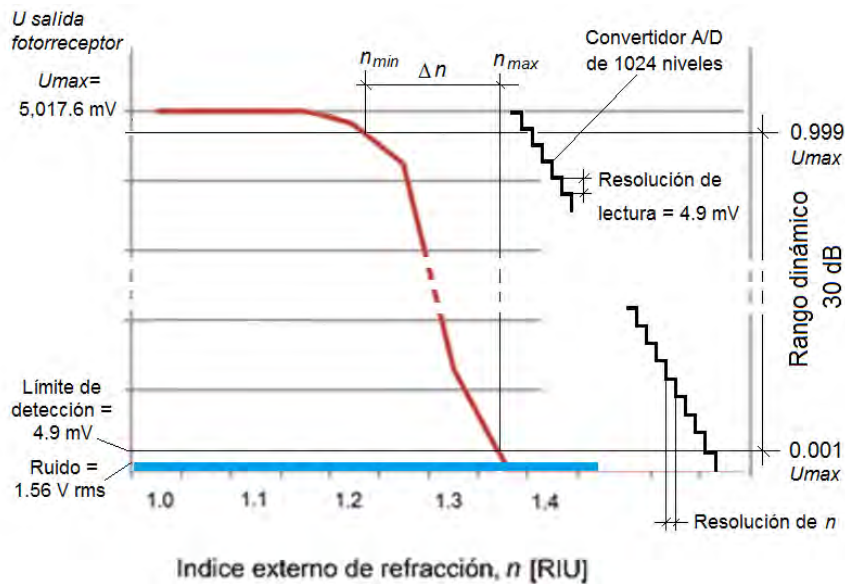


Figura 4.16. Ilustración del proceso y características de medida de la señal de salida del sensor.

El ruido del fototransistor es de 1.56 V rms, lo cual es menor que el límite de detección de Arduino (4.9 mV), por lo cual el límite de detección de Arduino de 4.9 mV define el valor perceptible mínimo a la salida; dicho límite de detección en conjunto con el número de niveles de salida del convertidor analógico digital de Arduino (1024) determina el rango dinámico de nuestro sistema de medición:

$$10 \text{Log}_{10}(1024)=30.1 \text{ (dB)}.$$

La relación Señal/Ruido, $SNR = (U_{señal}/U_{ruido})^2 = (4.9/1.56)^2 = 9.87$ o ~ 10 dB.

Considerando las características mencionadas anteriormente, los límites del Índice de refracción superior n_{max} e inferior n_{min} , (el Campo de Medida o *Range* de índice de refracción n) se fija niveles relativos de 0.999 y 0.001 de voltaje respectivamente a la salida del sensor, esto se logra definir a partir del Rango Dinámico del convertidor A/D de Arduino de tal manera que el límite de detección mantenga una relación señal a ruido de 10 dB, y que el límite superior del rango dinámico sea adecuado para detectar una posible saturación en la señal de entrada.

El Alcance (*Span*), Δn , lo calculamos como la diferencia algebraica entre el valor superior del índice externo de refracción, n_{max} y el valor inferior, n_{min} , del campo de medida (*Range*) del sensor.

La Sensibilidad (*Sensitivity*) la calculamos como la pendiente de la respuesta $T^*(n)$ del sensor: $S=(T^*_{n_{min}}/T^*_{n_{max}})/\Delta n$ (dB/RIU).

La Resolución (*Resolution*) la calculamos como la razón entre el alcance (*Span*), Δn , y número de niveles del convertidor A/D: $R=\Delta n/1024$ (RIU).

Conclusiones

Se diseñó e implementó una instalación experimental para la caracterización de los sensores refractométricos en dos modos: modo de transmisión y modo de reflexión. La instalación permite una modificación relativamente sencilla de los parámetros que se definieron como variables del estudio:

1. La distancia adimensional de las fibras ópticas (o la fibra óptica única) del eje de simetría del transductor refractométrico, Δ ;
2. La forma de superficie de trabajo del transductor (este por medio de un fácil cambio de las muestras de transductores en la presente instalación).

Con esta instalación, después de varias pruebas, modificaciones y ajustes de los elementos de la instalación, la obtención de datos experimentales sobre un total de cuatro muestras de los transductores tanto en el modo de transmisión como en el modo de reflexión.

Referencias del Capítulo 4

- [1] L. A. Ayvar Campos, "Sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloides y elípticos", Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2012.
- [2] A. Creus. Instrumentación Industrial. Publicaciones Marcombo. 1981.
- [3] J. P. Bentley. Principles of Measurement Systems. 2nd Edition. Logmann Scientific & Technical. 1983.

CAPÍTULO 5: Resultados

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados más significativos que se obtuvieron de manera teórica y experimental sobre los sensores refractométricos de fibras ópticas con elemento transductor refractométrico externo. Las investigaciones teóricas constan de la simulación de tres elementos de formas diferentes mediante el software SRFO. Uno de los elementos transductores estudiados fue de forma semiesférica y dos de forma semielipsoidal. El elemento en forma de semiesfera en el modo de transmisión ha sido estudiado parcialmente en trabajos previos; por tanto, los resultados experimentales de los elementos semielipsoidales se compararán con los resultados del elemento con forma de semiesfera en el modo de transmisión publicados en otros trabajos.

5.2. Resultados Teóricos

Se obtuvieron las funciones de Transmitancia de los diferentes elementos respecto a la variación de Λ y con aire como medio externo, mediante el software SRFO. Posteriormente, se obtuvo la respuesta de estos elementos respecto al índice de refracción, para los valores de Λ en donde la función de Transmitancia presenta un valor mayor.

5.2.1. Resultados Teóricos en Modo de Transmisión

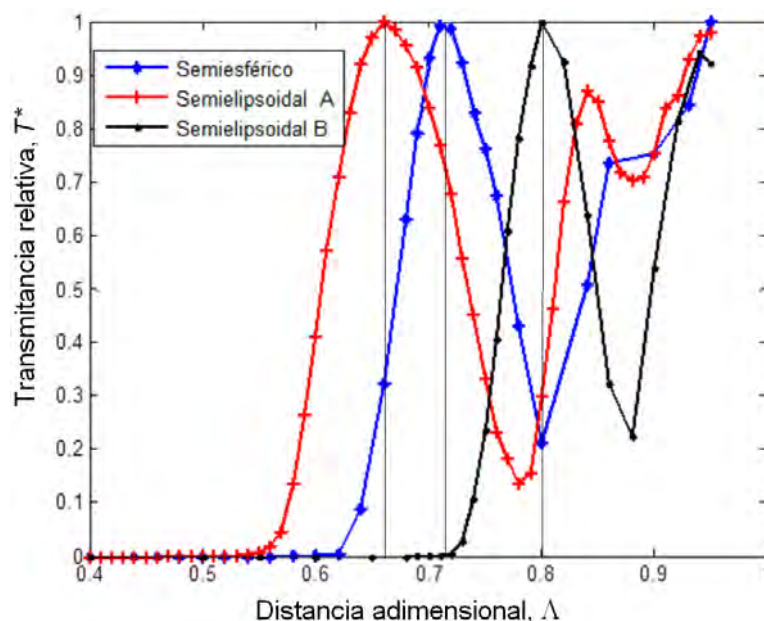


Figura 5.1. Transmitancia relativa T^* teórica respecto a distancia adimensional Λ de los tres elementos transductores en el modo de transmisión, teniendo como medio externo el aire.

Datos: Transductor Semiesférico: $T_{\Lambda=0.71(n=1)}=0.626$, $\alpha_{\Lambda=0.71(n=1)}=2.03$ dB; Transductor Semiélipsoidal A: $T_{\Lambda=0.66(n=1)}=0.31$, $\alpha_{\Lambda=0.71(n=1)}=5.1$ dB; Transductor Semiélipsoidal B: $T_{\Lambda=0.8(n=1)}=0.278$; $\alpha_{\Lambda=0.8(n=1)}=6.06$ dB.

Los datos en la Fig. 5.1 muestran la existencia de zonas donde la función de transmisión óptica relativa T^* presenta máximos para algunos valores de la distancia adimensional, Λ . En el caso de la superficie de trabajo semiesférica, la transmisión máxima se observa

a $\Lambda_{max1} = 0,71$, $\Lambda_{max2} = 0,86$ y $\Lambda_{max3} = 0.95$. Para el caso de transductor Semi-elipsoidal A (la superficie alargada esferoidal, Ec. 4.1), la función de transmisión se desplaza a la izquierda con respecto a la gráfica correspondiente a la superficie de trabajo esférica y la transmisión óptica relativa T^* máxima se produce en pequeñas distancias adimensionales: $\Lambda_{max1} = 0,66$, $\Lambda_{max2} = 0,84$ and $\Lambda_{max3} = 0,95$. En el caso del transductor Semi-elipsoidal B (la superficie oblata esferoidal de trabajo, Ec. 4. 2), la función de transmisión relativa $T^*(\Lambda)$ se desplaza a la derecha con respecto al caso de la superficie de trabajo esférica. La transmisión óptica relativa T^* máxima se produce a distancias adimensionales Λ más grandes: $\Lambda_{max1} = 0.8$ y $\Lambda_{max2} = 0.94$ (las zonas de transmisión de alto orden se fusionan, por lo tanto, los mínimos de las funciones de transmisión son menos pronunciados o desaparecen en distancias adimensionales mayores. Los datos en la Fig. 5.1 nos permitieron escoger los conjuntos más prometedores de distancias adimensionales Λ_{max} para cada uno de los tres superficies de trabajo que hemos considerado en el presente estudio: la Λ_{max} es el parámetro que asegura la transmisión óptica máxima (es decir, el mejor acoplamiento óptico de las dos fibras ópticas a través de la reflexión interna en el elemento de detección). Aunque el buen acoplamiento óptico en el sensor, mientras está en el aire, no asegura la respuesta deseada al índice de refracción externa de medios líquidos, el conjunto de parámetros mencionados Λ es un buen punto de partida para la evaluación de sensores, así como el posterior mejoramiento.

La simulación realizada nos permitió escoger un valor de Λ que asegura el mayor acoplamiento de luz en la fibra óptica, esto para determinar la mejor posición de la fibra óptica con respecto al eje vertical del elemento de detección (parámetro Λ) y así evaluar la respuesta del transductor refractométrico (elemento de detección) en función de cambios en el índice de refracción externo. Los valores seleccionados de Λ para cada elemento de detección, Λ_{max} se resumen en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Valores de Λ_{max} en dónde se encuentra un máximo de la función de transmitancia relativa $T^*(n)$.

Elemento	Λ_{max}
Semiesférico	0.71, 0.86 y 0.95
Semi-elipsoidal A	0.66, 0.84 y 0.95
Semi-elipsoidal B	0.80 y 0.94

Se calculó la función de transmitancia óptica relativa $T^*(n)$ para las tres superficies de trabajo y cada uno de los tres Λ_{max} , parámetro antes mencionado. Lo hicimos por el rango de índice de refracción de $n = 1$ hasta $n = 1,40$ con incrementos de 0,005. Los resultados se representan en una forma de gráficos en las figuras 6.2 – 6.5.

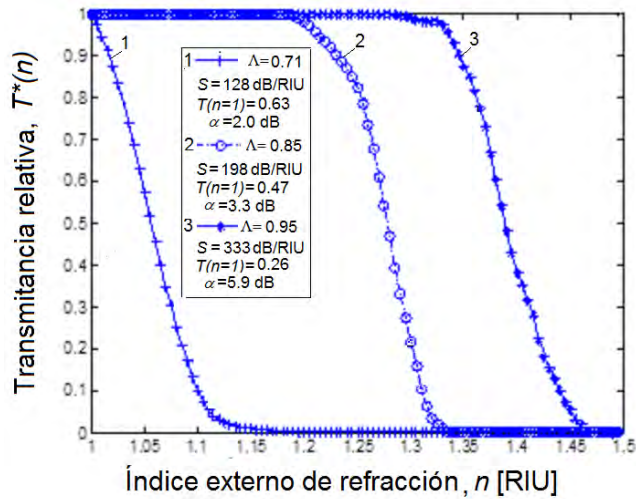


Figura 5.2. Transmitancia relativa $T^*(n)$ del elemento Semiesférico en el modo de Transmisión respecto al índice de refracción externo, n , para tres distancias adimensionales Λ .

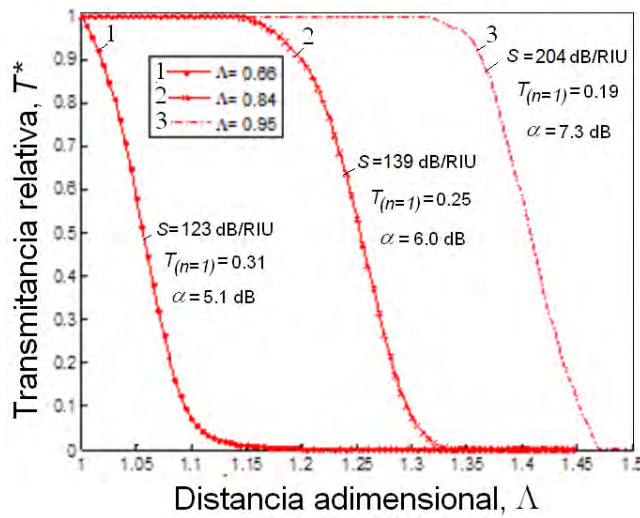


Figura 5.3. Transmitancia relativa $T^*(n)$ teórica del elemento Semi-elipsoidal A en el modo de Transmisión respecto al índice de refracción externo, n .

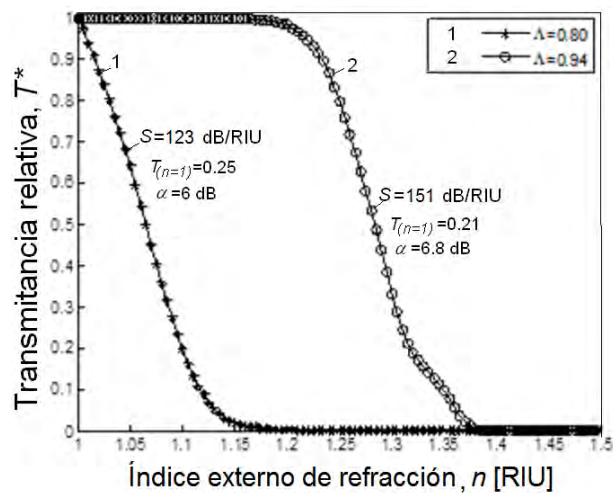


Figura 5.4. Transmitancia relativa $T^*(n)$ teórica del elemento Semi-elipsoidal B en el modo de Transmisión respecto al índice de refracción externo, n .

En las gráficas de las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 podemos observar el rango dinámico que ofrece cada uno de estos elementos al utilizarlos como sensores refractométricos. El elemento elipsoidal A es el que presenta un rango mayor de índice externo de refracción, aproximadamente $1.0 < n < 1.46$. Por tanto este elemento es apropiado para trabajar con sustancias de índices de refracción pequeños (por ejemplo sustancias criogénicas) y con sustancias de índices de refracción relativamente grandes (por ejemplo, gasolina, aceites minerales y sintéticos, y combustible diésel). El menor rango se obtiene con el elemento Semi-elipsoidal B, el cuál puede trabajar con sustancias de índice de refracción hasta de $n=1.35$, lo cual incluye algunas soluciones acuosas.

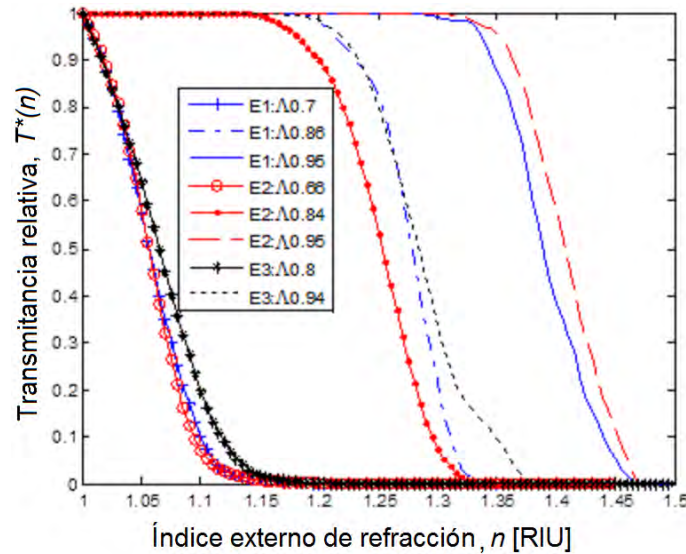


Fig. 5.5. Síntesis de datos sobre la Transmitancia relativa T^* respecto al índice de refracción externo n para tres superficies de trabajo (E1 - semiesfera, E2 – semi-elipsoide A y E3 - semi-elipsoide B) en los valores de Λ que presentan una transmitancia máxima. La Sensibilidad y otros parámetros de estos transductores se presentan en la Tabla 5.3 de la Sección 5.4.

Los datos en las figuras 5.2 – 5.5 muestran que la modificación de la superficie del elemento de trabajo de la esférica a la elipsoidal mueve la función de transmitancia óptica relativa $T^*(n)$ ya sea hacia la izquierda o hacia la derecha sobre el eje de índice de refracción externo n . Es decir, la superficie esferoidal alargada (elemento semi-elipsoidal A) desplaza la función de transmisión óptica relativa $T^*(n)$ a la región de índices de refracción externos más grandes, mientras que la superficie esferoidal achatada (elemento semi-elipsoidal B) desplaza la función de transmisión óptica relativa $T^*(n)$ al región de los índices de refracción externos menores.

5.2.2. Resultados Teóricos en Modo de Reflexión

Se evaluaron teóricamente y se compararon la Reflectancia relativa R^* de los tres elementos transductores respecto a Λ teniendo como medio externo el aire.

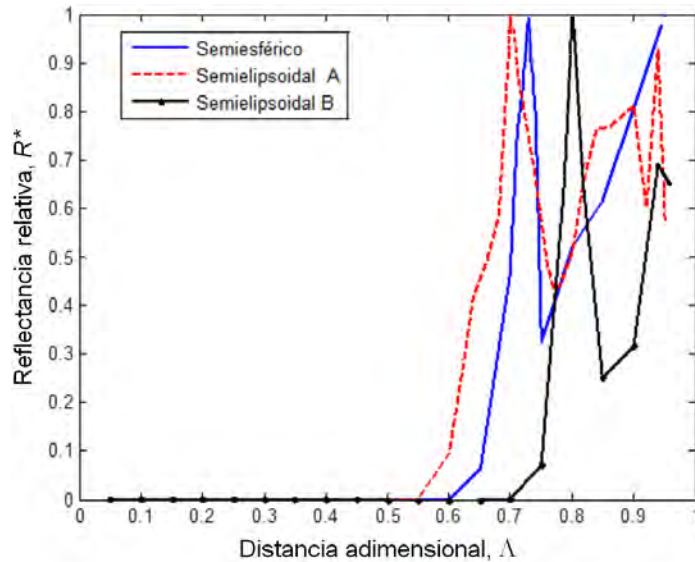


Figura 5.6. Reflectancia relativa R^* de los tres elementos transductores respecto a Λ teniendo como medio externo el aire. Datos: Transductor Semiesférico: $T_{(\Lambda=0.73, n=1)}=0.3$, $\alpha_{(\Lambda=0.71, n=1)}=5.2$ dB; Transductor Semi-elipsoidal A: $R_{(\Lambda=0.7, n=1)}=0.032$, $\alpha_{(\Lambda=0.7, n=1)}=15$ dB; Transductor Semi-elipsoidal B: $T_{(\Lambda=0.8, n=1)}=0.061$; $\alpha_{(\Lambda=0.8, n=1)}=12.1$ dB.

En la figura 5.6 podemos observar que las funciones $R^*(n)$ también presentan zonas con máximos para ciertos valores de Λ . El número de máximos es el mismo que en el caso de las funciones $T^*(n)$.

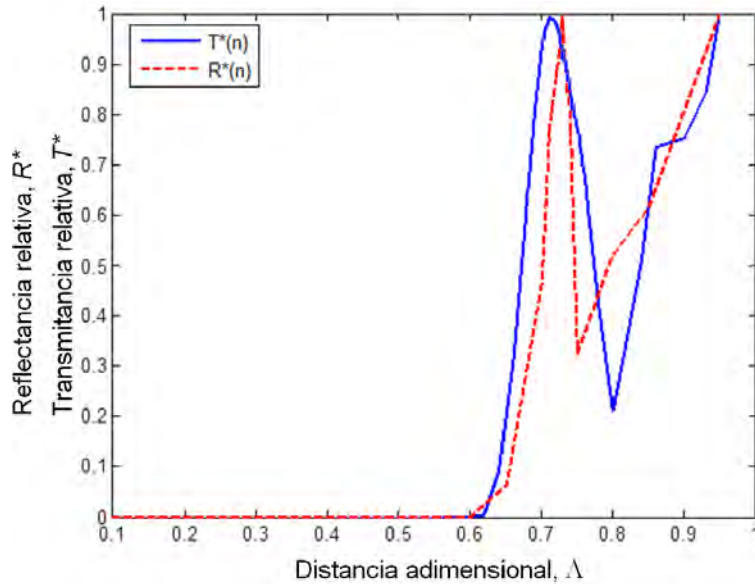


Figura 5.7. Transmitancia relativa $T^*(n)$ y Reflectancia relativa $R^*(n)$ en función de Λ para el elemento de detección semiesférico, teniendo aire como medio externo. Datos: $T_{(\Lambda=0.71, n=1)}=0.63$, $\alpha_{T(\Lambda=0.71, n=1)}=2$ dB; $R_{(\Lambda=0.71, n=1)}=0.39$, $\alpha_{R(\Lambda=0.71, n=1)}=4.07$ dB.

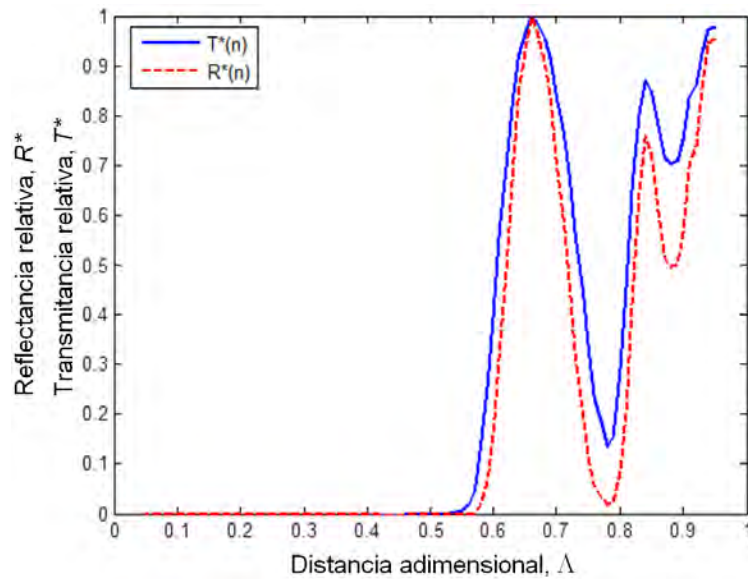


Figura 5.8. Transmitancia relativa $T^*(n)$ y Reflectancia relativa $R^*(n)$ en función de Λ para el elemento de detección semielipsoidal A, teniendo aire como medio externo. Datos: $T_{(\Lambda=0.63, n=1)} = -0.204$, $\alpha_{T(\Lambda=0.63, n=1)} = 6.9$ dB; $R_{(\Lambda=0.63, n=1)} = 0.042$, $\alpha_{R(\Lambda=0.63, n=1)} = 13.8$ dB.

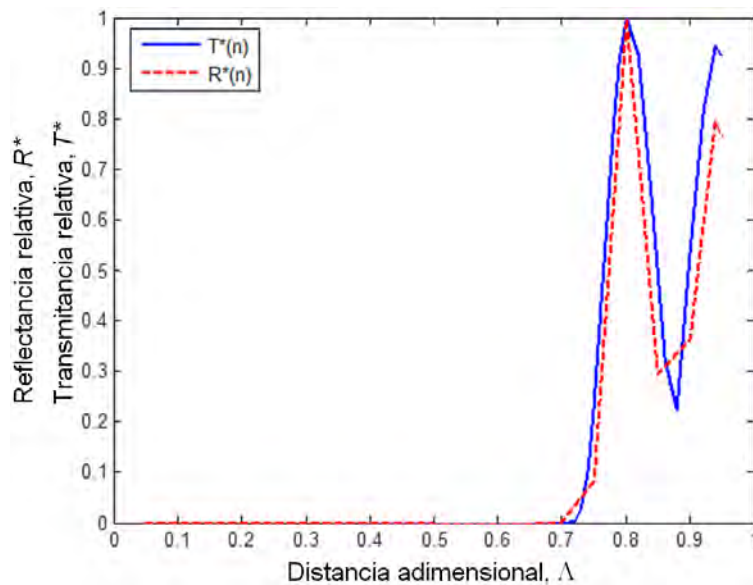


Figura 5.9. Transmitancia relativa T^* y Reflectancia relativa R^* en función de Λ para el elemento de detección semielipsoidal B, teniendo aire como medio externo. Datos: $T_{(\Lambda=0.8, n=1)} = 0.248$, $\alpha_{T(\Lambda=0.8, n=1)} = 6.06$ dB; $R_{(\Lambda=0.8, n=1)} = 0.061$, $\alpha_{R(\Lambda=0.8, n=1)} = 12.1$ dB.

En las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 podemos observar que existe una ligera variación entre las funciones $T^*(n)$ y $R^*(n)$, pero la coincidencia de los máximos de las funciones se encuentran aproximadamente en los mismos puntos.

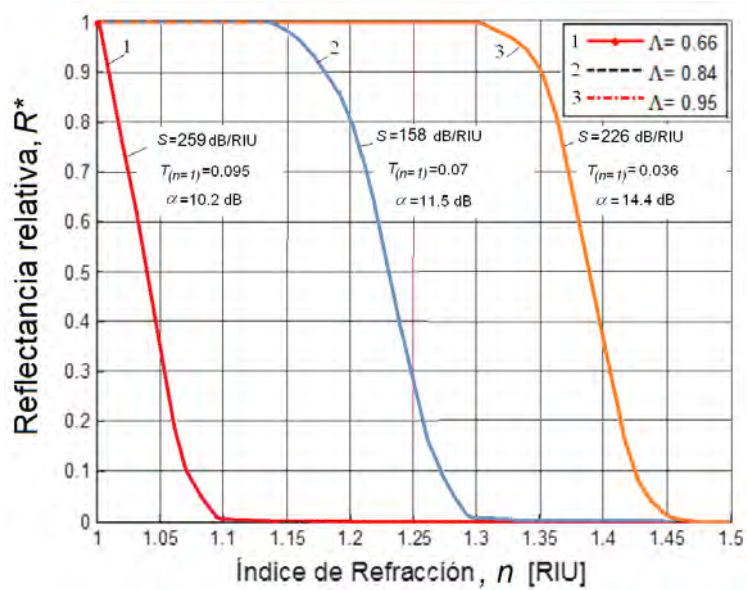


Figura 5.10. Reflectancia relativa R^* teórica del elemento Semi-elipsoidal A respecto al índice de refracción externo n para los valores de Λ que corresponden a la máxima reflectancia del sensor en el aire.

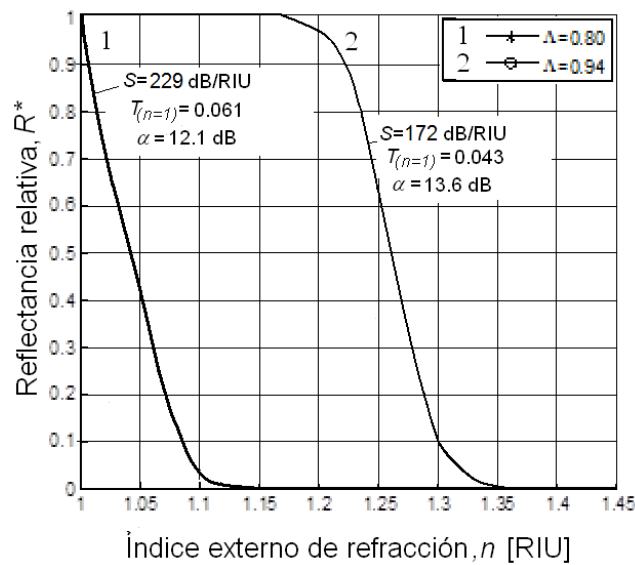


Figura 5.11. Reflectancia relativa $R^*(n)$ teórica del elemento Semi-elipsoidal B respecto al índice de refracción externo n para los valores de Λ que corresponden a la máxima reflectancia del sensor en el aire.

5.3. Resultados Experimentales

Uno de los principales objetivos de este trabajo es realizar el estudio de nuevas formas y configuraciones de sensores refractométricos, por tal motivo el estudio experimental está centrado en la caracterización de los sensores con elemento de detección de superficie semi-elipsoidal, con las características de los elementos Semi-elipsoidal A y Semi-elipsoidal B. El elemento Semi-esférico no se incluye dado que ha sido tema de estudio en varias publicaciones existentes [1]-[4].

5.3.1 Resultados Experimentales en Modo de Transmisión

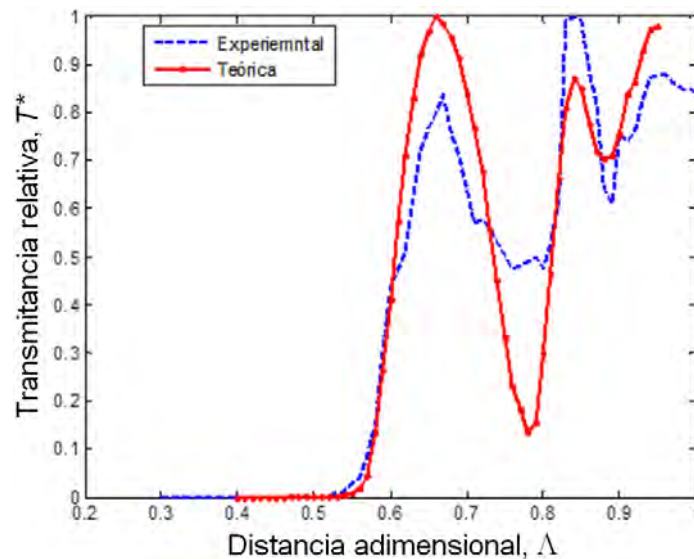


Figura 5.12. Transmitancia relativa T^* experimental y teórica del elemento transductor Semi-elipsoidal A respecto Λ considerando que el aire como medio externo. Datos: $T_{teórica}(\Lambda=0.66, n=1)=0.31$, $\alpha_T(\Lambda=0.66, n=1)=5.1$ dB, $T_{teórica}(\Lambda=0.82, n=1)=0.82$, $\alpha_T(\Lambda=0.82, n=1)=6$ dB.

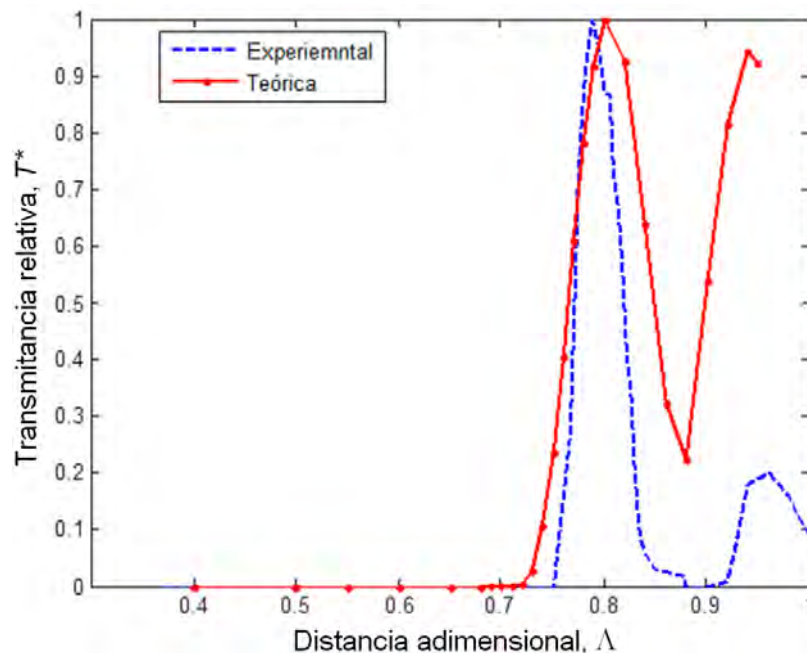


Figura 5.13. Transmitancia relativa T^* experimental y teórica del elemento transductor Semi-elipsoidal B respecto Λ considerando que el aire como medio externo. Datos: $T_{teórica}(\Lambda=0.82, n=1)=0.253$, $\alpha_T(\Lambda=0.82, n=1)=6.28$ dB, $T_{teórica}(\Lambda=0.8, n=1)=0.248$, $\alpha_T(\Lambda=0.8, n=1)=6.06$ dB.

En ambas gráficas se observa un ligero desplazamiento de los máximos de las funciones de Transmitancia obtenidas experimentalmente respecto a las funciones obtenidas mediante SRFO. Las discrepancias mencionadas pueden explicarse a pequeñas variaciones en la forma de los elementos de detección y a posibles errores de alineación, debemos considerar que el núcleo de las fibras ópticas utilizadas

experimentalmente es aproximadamente de 1 mm, haciendo que la manipulación y alineación de este elemento resulte complicado.

5.3.2 Resultados Experimentales en Modo de Reflexión

Los elementos Semi-elipsoidal A y Semi-elipsoidal B fueron caracterizados experimentalmente obteniendo la función de Reflectancia cuando el sensor se encuentra en aire (Figuras 5.14-5.15).

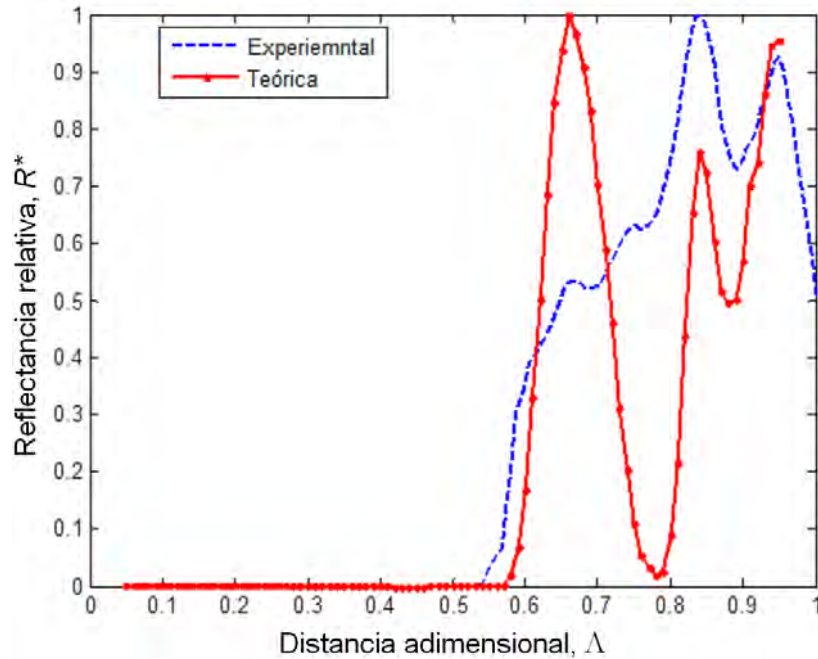


Figura 5.14. Reflectancia relativa R^* teórica y experimental del elemento transductor Semi-elipsoidal A respecto a Λ , teniendo aire como medio externo. Datos: $R_{teórica}(\Lambda=0.68, n=1) = 0.207$, $\alpha_R(\Lambda=0.68, n=1) = 6.85$ dB.

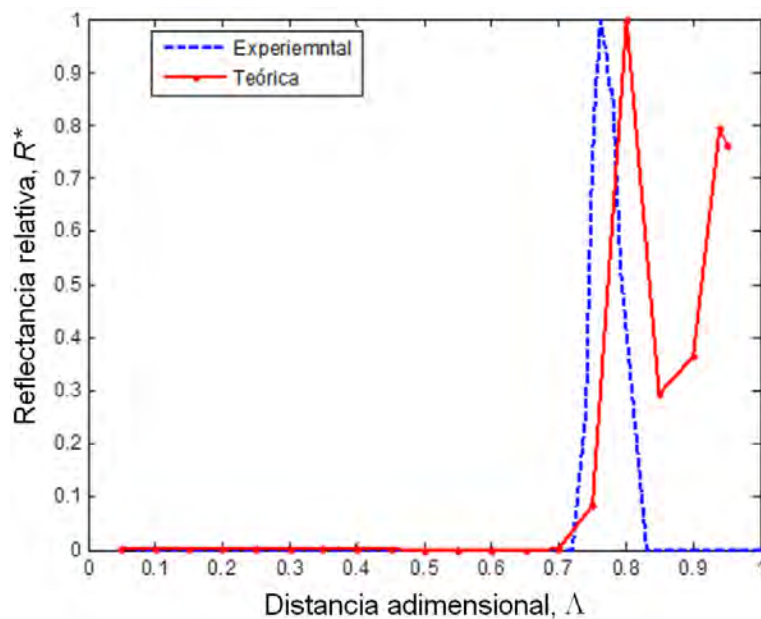


Figura 5.15. Reflectancia relativa R^* teórica y experimental del elemento transductor

Semielipsoidal B respecto a Λ , teniendo aire como medio externo. Datos: $R_{teórica}(\Lambda=0.8, n=1) = 0.061$, $\alpha_R(\Lambda=0.8, n=1) = 12.1$ dB.

El elemento Semielipsoidal A fue elegido para ser probado con sustancias diferentes al aire, debido a que se puede trabajar en un rango de índices de refracción mayor que en el caso del elemento Semielipsoidal B.

La función de la reflectancia del elemento semielipsoidal A se obtuvo para cinco analitos, en un rango de Λ que van desde $\Lambda=0.4$ hasta $\Lambda=1$ dado que en las simulaciones se ha obtenido que para valores de $\Lambda < 0.5$ no existe acoplamiento de luz. En la Tabla 5.2 se muestran los índices de refracción de los analitos, medidos a una longitud de onda de $\lambda=589$ nm, mediante un refractómetro marca Krüss modelo AR4D.

Tabla 5.2. Analitos y sus índices de refracción

	Analito líquido	Índice de refracción (@ 589nm)
1	Agua	1.333
2	Agua salada (120 ppm)	1.347
3	Agua salada (350 ppm)	1.375
4	Anticongelante	1.392
5	Gasolina	1.432
6	Diésel	1.464

Las mediciones se realizaron cinco veces por cada sustancia, los resultados se procesaron para obtener el valor promedio de los resultados obtenidos. Entre cada medición los elementos de detección fueron limpiados con agua destilada para eliminar residuos de las sustancias bajo medición, en el caso particular del anticongelante y la gasolina, los elementos de detección se limpiaron con alcohol isopropílico, posteriormente con agua y jabón.

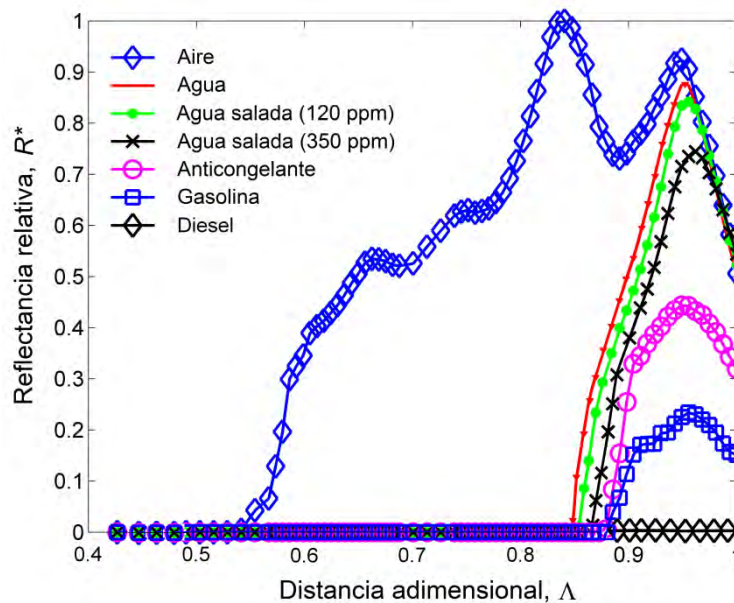


Figura 5.16. Reflectancia relativa R^* experimental respecto a distancia adimensional Λ obtenida con el elemento Semielipsoidal A para seis líquidos de la Tabla 5.2 y el aire.

La Reflectancia R obtenida con aire marca el valor máximo de la reflectancia y se establece como la referencia para la calibración y obtención de la Reflectancia relativa R^* . Los resultados experimentales mostrados en la figura 5.16 - las gráficas de la Reflectancia relativa R^* en función de la distancia adimensional Λ indican que nuestro sensor se puede ser ajustado a un rango de índice de refracción externo específico modificando el parámetro adimensional Λ . El valor de $\Lambda = 0.95$ resulta el más indicado para trabajar en el rango de índices de refracción de las sustancias bajo medición (de $1.33 < n < 1.43$).

La figura 5.17 presenta la Reflectancia relativa R^* en función de índice de refracción del medio externo teórica y experimental obtenida a $\Lambda = 0.95$.

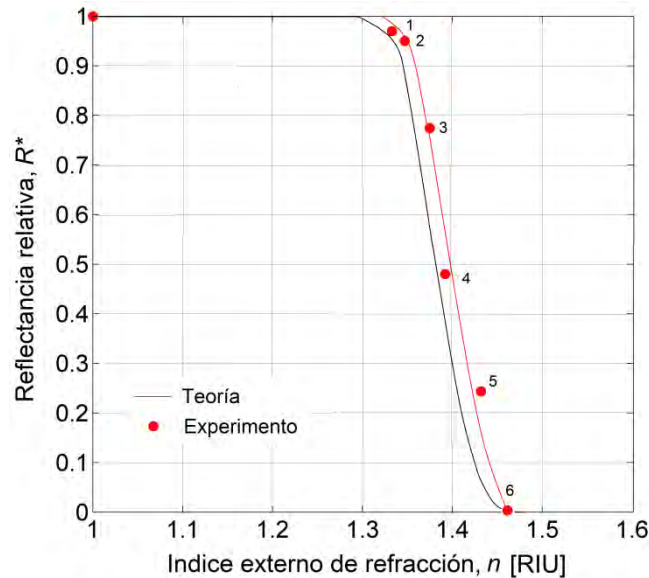


Figura 5.17. Reflectancia relativa R^* en función de índice de refracción del medio externo teórica y experimental obtenida a $\Lambda = 0.95$.

Se observa una buena coincidencia de los resultados de experimento con las predicciones teóricas. La pequeña diferencia que existe entre algunos puntos experimentales y la respuesta teórica mostrada en la figura 5.17 está relacionada en nuestra opinión a la desviación de la forma real de elemento transductor de un elipsoide ideal geométrico [6].

5.4. Análisis de la Sensibilidad, Pérdida intrínseca óptica y Rango de operación de los transductores extrínsecos de los tres tipos

Las características principales: la Sensibilidad, S , la Pérdida intrínseca óptica, α , y el Rango de índice externo de refracción, Δn de los tres transductores externos se presentan a continuación en forma de un cuadro comparativo de la Tabla 5.3.

Podemos observar que según las predicciones teóricas el sensor con el elemento semielipsoidal A, la fibra óptica de un diámetro adimensional de núcleo $d=0.1248$, $NA=0.5$ y el rango dinámico de 30 dB puede trabajar en el rango de índice de refracción externo de $1.0002 < n < 1.4129$ en el modo de transmisión. En el modo de reflexión, este mismo sensor puede trabajar en el rango de índice de refracción externo de $1.0001 < n < 1.3981$. El rango particular de n en que trabaja sensor depende de la

selección del parámetro Λ . Las simulaciones predicen la sensibilidad de 123 dB/RIU en el rango de índice de refracción externo $1.0001 < n < 1.1158$, 139 dB/RIU en el rango de $1.1315 < n < 1.3470$ y 204 dB/RIU en el rango $1.2658 < n < 1.4129$ en el modo de transmisión. En el modo de reflexión, la sensibilidad teórica S es de 259 dB/RIU en el rango de índice de refracción externo $1.0001 < n < 1.1158$, 158 dB/RIU en el rango $1.1287 < n < 1.3181$ y 226 dB/RIU en el rango $1.2651 < n < 1.3981$. La sensibilidad experimental S es por 8% menor que la respectiva predicción teórica. El rango de índice de refracción externo experimental es por 0.065 RIU arriba de respectivo rango teórico.

Tabla 5.3. Cuadro comparativo de las características de los tres transductores externos en transmisión y reflexión.

Tipo del Transductor	Parámetro Λ	Sensibilidad, S (dB/RIU)		Pérdida intrínseca, α (dB)		Campo ($Range$) de n (a nivel de 0.999 (-0.005 dB) a 0.001 (-30 dB))		Alcance ($Span$) Δn (a nivel de 0.999 (-0.005 dB) a 0.001 (-30 dB)) ----- Resolución \mathcal{R} (RIU)	
		Transm.	Reflex.	Transm.	Reflex.	Transm.	Reflex.	Transm.	Reflex.
Semi Esfera	0.71	128	267	2.03	4.07	1.0005 - 1.2349	1.0002 - 1.1115	.2344 ----- .00023	.1122 ----- .00011
	0.85	198	231	3.3	6.6	1.1812 - 1.3334	1.1794 - 1.3091	.1513 ----- .00018	.1297 ----- .00013
	0.96	333	357	5.9	11.9	1.3265 - 1.4167	1.3244 - 1.4085	.0902 ----- .00009	.0841 ----- .00008
Semi Elipsoide A	0.66	123	259	5.1	10.2	1.0002 - 1.2406	1.0001 - 1.1158	.2404 ----- .00023	.1157 ----- .00011
	0.84	139	158	6.0	11.5	1.1315 - 1.3470	1.1287 - 1.3181	.2155 ----- .00021	.1894 ----- .00018
	0.95	204	226 (Exp.: 208)	7.3	14.4	1.2658 - 1.4129	1.2651 - 1.3981 (Exp.: 1.320 - 1.464)	.1471 ----- .00014	.1330 ----- (Exp.: .1440) ----- .00013

Semi Elipsoide B	0.80	123	229	6.06	12.1	1.0012 – 1.2459	1.0001 – 1.1312	.2447 ----- .00024	.1311 ----- .00013
	0.94	151	172	6.8	13.6	1.1811 – 1.3800	1.1780 – 1.3527	.1989 ----- .00019	.1747 ----- .00017

En relación a la diferencia de cerca de 8% que se observa entre algunos datos experimentales y las predicciones teóricas obtenidas por medio de simulaciones numéricas, se asume que estas discrepancias pueden deberse principalmente a la diferencia entre la forma real de las muestras de los transductores refractométricos (fabricados en un taller por medio de un torno controlado por computadora) y sus representaciones matemáticas por ecuaciones de segundo orden empleados en el presente trabajo. Además, dichas diferencias pueden existir por las limitaciones del modelo de la óptica geométrica y trazado de rayos utilizado en las simulaciones, o por errores del experimento, tales como los errores en el posicionamiento y alineación de los elementos ópticos, los efectos de reflexiones ópticas parásitas, entre otros.

5.5 Efecto de dimensiones relativas de los elementos transductores y las fibras ópticas, y la NA de las fibras ópticas sobre las características del sensor

En esta sección se investigan el efecto de las dimensiones relativas de los elementos detectores y las fibras ópticas, y el efecto de la apertura numérica de las fibras ópticas, NA , sobre las características del sensor: su Transmitancia, $T(n)$ y Transmitancia Relativa $T^*(n)$. Se analizan los sensores con elementos transductores externos semiesférico y semielipsoidal A de tamaños 2, 4 y 8 veces mayores y 2, 4 y 8 veces menores que los tamaños de los elementos similares considerados anteriormente en este trabajo.

Las gráficas de la figura 5.18 demuestran la Transmitancia, $T(n)$, de elemento semielipsoidal A de tamaños 2, 4 y 8 veces mayores y 2, 4 y 8 veces menores que el elemento semielipsoidal A considerado en la sección 5.3. Las gráficas de la figura 5.19 demuestran la Transmitancia relativa, $T^*(n)$ del mismo elemento transductor. Los datos presentados en ambas figuras (5.18 y 5.19) corresponden a la apertura numérica $NA=0.5$ de las fibras ópticas.

Se puede observar que la transmisión T crece con el aumento del diámetro relativo del elemento transductor (las curvas $T(n)$ que corresponden a los diámetros x2 y x4) y disminuye con la disminución de dicho diámetro (las curvas que corresponden a 1/2, 1/4 y 1/8 del diámetro original (15.7 mm, 1:1).

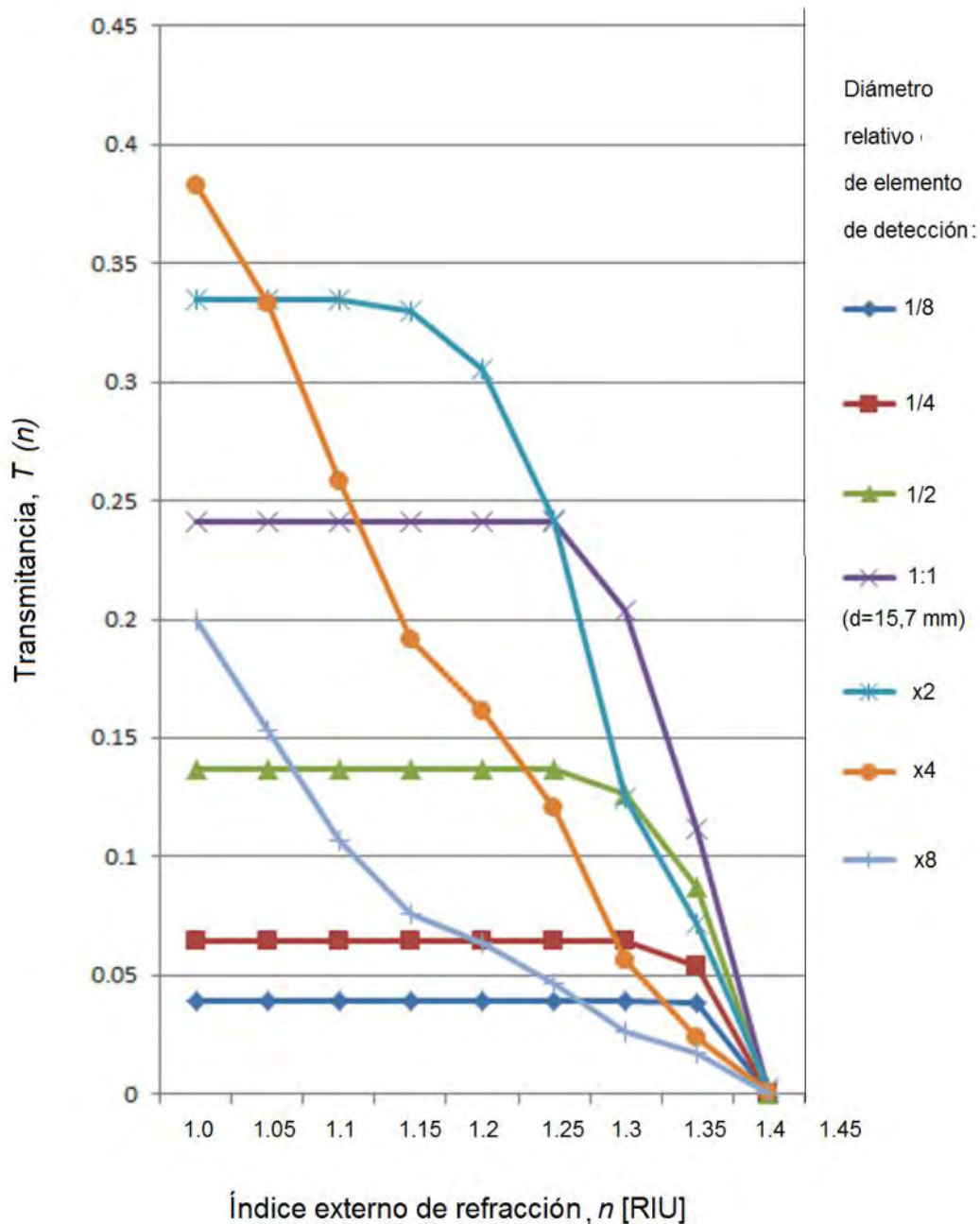


Figura 5.18. Efecto del diámetro de elemento Semi-elipsoidal A sobre la Transmitancia vs. n , $T(n)$, para elementos de hasta 8 veces mayores y 8 veces menores que elemento considerado en la Sección 5.3.

El rango de índice de refracción externo que mide el sensor, Δn , crece con el aumento del diámetro relativo del elemento transductor, pero el gradiente de la respectiva parte de la curva $T(n)$ y la sensibilidad del sensor disminuye. Las gráficas de Transmitancia relativa, $T^*(n)$, de la figura 5.19 demuestran dicha tendencia de forma más clara. Además, la figura 5.19 demuestra ciertas no linealidades de las características $T^*(n)$ que corresponden a diámetros mayores del elemento transductor (diámetros x2, x4 y x8). Se puede concluir que la mayor sensibilidad y linealidad corresponde a diámetros menores del elemento transductor con respecto al diámetro de la fibra óptica (1/2, 1/4 y 1/8 de diámetro base de 15.7 mm).

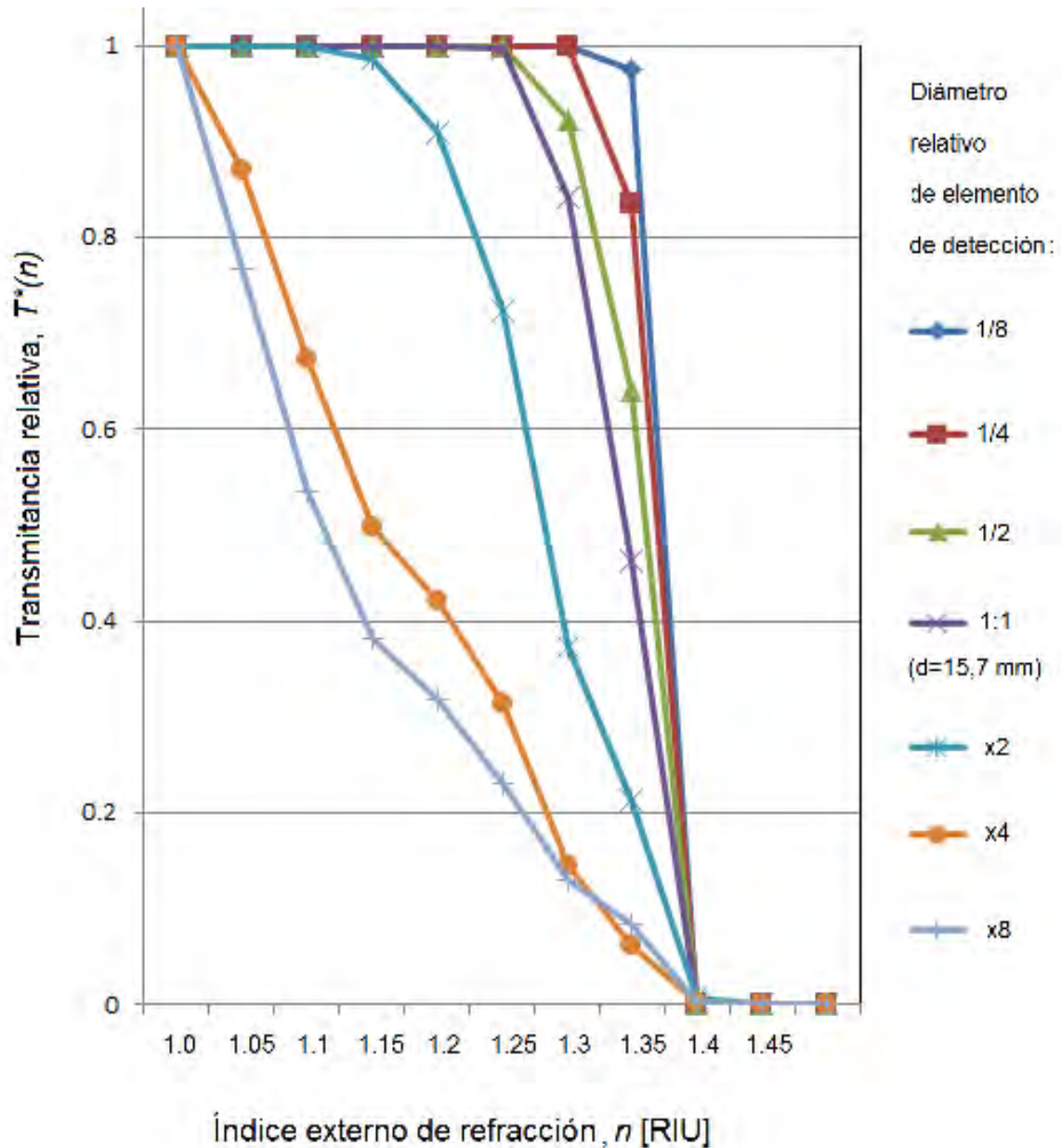
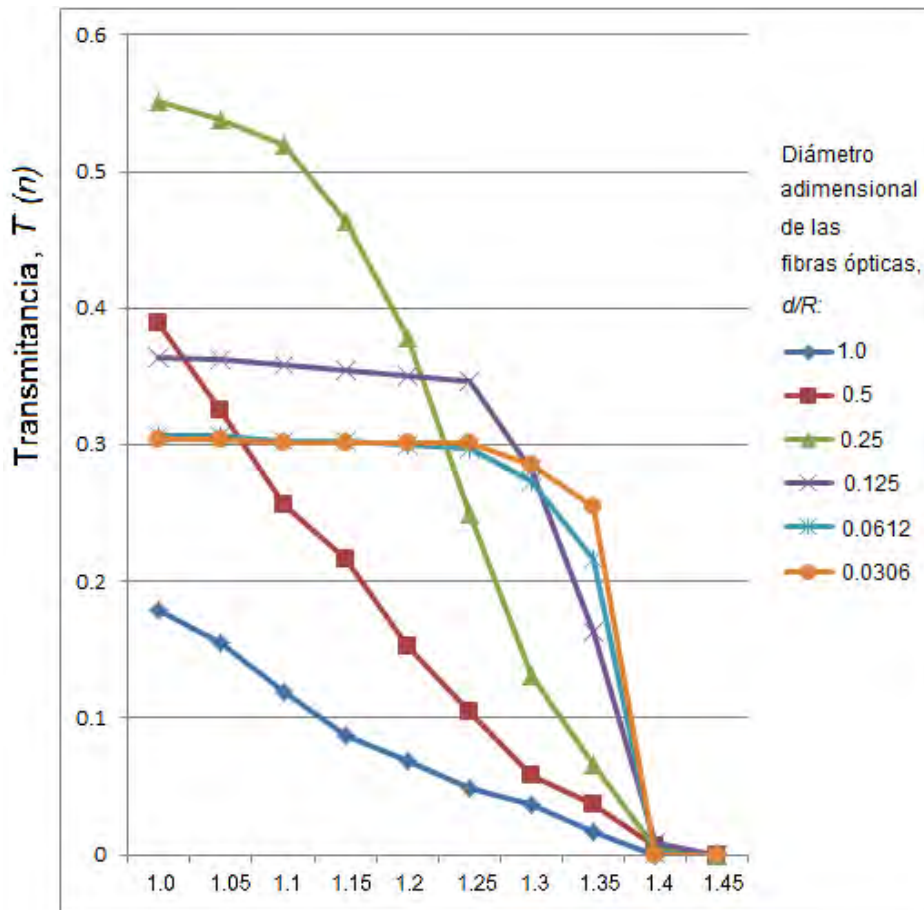


Figura 5.19. Efecto del diámetro de elemento Semielipsoidal A sobre la Transmitancia Relativa vs. n , $T^*(n)$, para elementos de hasta 8 veces mayores y 8 veces menores que elemento considerado en la Sección 5.3.

Las figuras 5.20 y 5.21 demuestran el efecto del diámetro relativo de la fibra óptica, d , sobre la Transmitancia vs. n , $T(n)$, y Transmitancia Relativa vs. n , $T^*(n)$ de un elemento Semiesférico en el caso de $NA=1.0$. Las fibras ópticas existentes no tienen una NA tan alta, por esto el presente caso corresponde a una fuente de tipo LED y un fotodetector conectados directamente a la superficie plana del elemento transductor.



Índice externo de refracción, n [RIU]

Figura 5.20. Efecto del diámetro adimensional de la fibra óptica, d , sobre la Transmitancia vs. n , $T(n)$ de un elemento Semiesférico, para $NA=1.0$ (Este caso corresponde también a una fuente de tipo LED y un foto detector, ambos de diámetro d pegados a la superficie plana del elemento transductor).

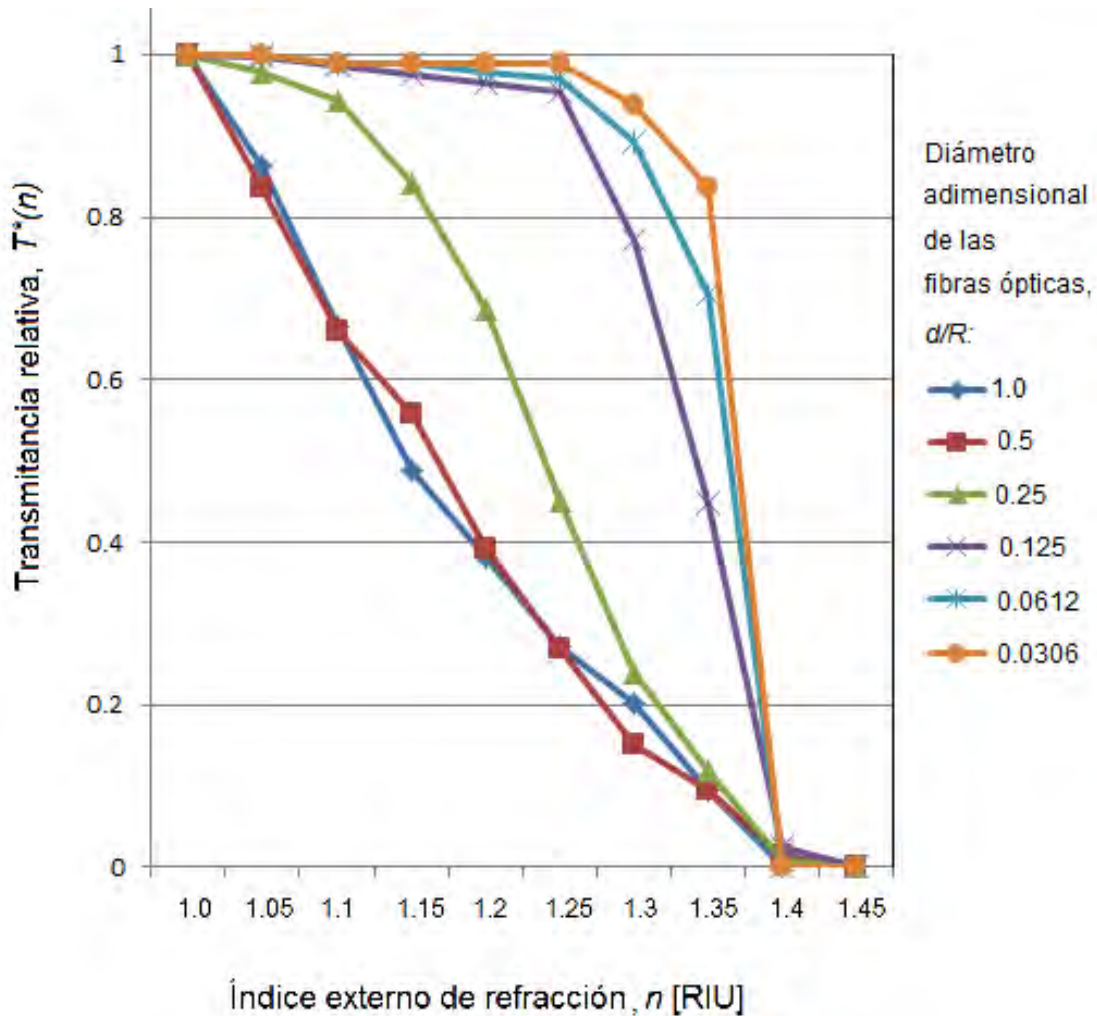


Figura 5.21. Efecto del diámetro adimensional de la fibra óptica, d , sobre la Transmitancia Relativa vs. n , $T^*(n)$ de un elemento Semiesférico, para $NA=1.0$ (La $NA=1$ corresponde más a una fuente de tipo LED que a una fibra óptica).

Se puede observar en las figuras 5.20 y 5.21 que el comportamiento de las funciones $T(n)$ y $T^*(n)$ del elemento semiesférico de tamaños 2, 4 y 8 veces mayores y 2, 4 y 8 veces menores de elemento semiesférico base de diámetro 25 mm considerado en la sección 5.3 de este trabajo es notablemente similar al comportamiento de elemento semielipsoidal A que se presentó y analizó anteriormente, en esta misma sección. Se puede observar que la transmisión T crece con el aumento del diámetro relativo del elemento transductor y disminuye con la disminución de dicho diámetro. También, el rango de índice de refracción externo que mide el sensor, Δn , crece con el aumento del diámetro relativo del elemento transductor, y el gradiente de la curva $T(n)$ disminuye. Por esto, la sensibilidad del sensor disminuye también con el aumento del diámetro relativo del sensor.

El efecto de una NA mayor ($NA=1$) que en el caso anterior ($NA=0.5$) resulta en un aumento de la transmisión T por aproximadamente 45 %. Por otro lado, se observa que la no linealidad de las características $T(n)$ y $T^*(n)$ es mayor en el caso de $NA=1$ en comparación con el caso de $NA=0.5$.

Se puede concluir que la mayor sensibilidad y linealidad corresponde a la NA moderada ($0.3 < NA < 0.5$) y diámetros del elemento transductor iguales o menores de los elementos base que fueron considerados en la sección 5.3 de este trabajo, son diámetros en el rango de 25 a 3 mm aproximadamente.

Conclusiones

A diferencia de los trabajos anteriores restringidos al análisis teórico y experimental de elementos transductores semiesféricos en modo de transmisión [1-5], y análisis únicamente teórico de algunos elementos transductores de superficie de segundo orden [2], en el presente trabajo se obtuvieron datos detallados teóricos tanto para los elementos semiesféricos como elipsoidales de dos tipos en dos modos de operación: el modo de transmisión y en el modo de reflexión. Se verificaron las predicciones teóricas y datos experimentales en el caso de elemento elipsoidal A que presentó las características más atractivas en el análisis teórico.

Para estas formas de superficie del transductor y para los dos modos de operación (transmisión y reflexión) se obtuvo las siguientes cuatro tipos de características teóricas y experimentales de funcionamiento de sensores:

1. La transmitancia relativa T^* respecto a la distancia adimensional Λ considerando aire como medio externo;
2. La transmitancia relativa $T^*(n)$ en los valores de Λ que presentan máximos en la función, respecto al índice de refracción externo n ;
3. La reflectancia relativa R^* respecto a la distancia adimensional Λ en aire como medio externo;
4. La reflectancia relativa $R^*(n)$ en los valores de Λ que presentan máximos en la función, respecto al índice de refracción externo n .

Para el sensor semielipsoidal A se obtuvo la sensibilidad en el rango de 120 a 200 dB/RIU aproximadamente en el modo de transmisión. En el modo de reflexión se obtuvo un notable aumento en la sensibilidad de hasta 160-260 dB/RIU aproximadamente. En ambos modos de trabajo, la sensibilidad y el rango de índice externo de refracción dependen del parámetro Λ . La pérdida intrínseca óptica en los tres tipos de elementos se encuentra entre 2 y 7 dB en el modo de transmisión y entre 7 y 15 dB en el modo de reflexión.

En este sensor el rango de índice externo de refracción se puede cambiar por medio de la selección del parámetro Λ y la selección de modo de operación – transmisión o reflexión.

Una ventaja interesante e importante del modo de reflexión consiste en una sensibilidad notablemente mayor que el sensor tiene en este modo en comparación con el modo de transmisión. Además, en el modo de reflexión la cantidad total de las fibras ópticas necesarias para el funcionamiento del sensor se reduce por un factor de dos, lo que se traduce en menor masa y costo del sensor.

El estudio del efecto de las dimensiones relativas de los elementos detectores y las fibras ópticas, y el efecto de la apertura numérica de las fibras ópticas, NA , sobre las características del sensor reveló que la mayor sensibilidad y linealidad del sensor se obtiene con los diámetros adimensionales de las fibras ópticas $d=D_{\text{núcleo}}/R_{\text{transductor}}$ en el rango de $0.125 < d < 0.5$ y la apertura numérica de la fibra óptica en el rango de $0.3 < NA < 0.5$.

Referencias del Capítulo 5

- [1] V. Svirid, S. Khotiaintsev, P. L. Swart, "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element." *Optical Engineering*, vol. 41, no 4, p. 779-787, 2002.
- [2] K. E. Romo-Medrano, S. Khotiaintsev, "An optical-fibre refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no 5, p. 998-1003, 2006,
- [3] S. Khotiaintsev *et al.*, "Measurement of water salinity using optical fiber refractometric transducer," *Electronics and Communications, Special Issue "Problems in Electronics,"* vol. 27, part 1, pp. 27-30, 2006.
- [4] S. Khotiaintsev et al. "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 (ICPOF-2009), Sydney, Australia, pp.1-4, 2009.
- [5] H. B. Mejía del Puerto, "Sensores ópticos para medición de cantidad de propelente en satélites de comunicaciones," Tesis de doctorado. Posgrado en Ingeniería, UNAM, 2010.
- [6] D. M. Martínez González, "Nuevos elementos de fibra óptica". Tesis de Maestría, Posgrado en Ingeniería, UNAM, 2016.

CAPÍTULO 6: Sensor Refractométrico Intrínseco en Fibra Óptica Microestructurada

6.1. Introducción

El desarrollo de fibras ópticas microestructuradas (MOF) resultó en el desarrollo de algunos sensores refractométricos basados en las fibras ópticas de estos nuevos tipos [1] – [2]. Por esto, es de un gran interés teórico y práctico para evaluar la situación de competencia de nuestro sensor refractométrico basado en elemento de detección externo (sensor extrínseco) respecto a sensores intrínsecos basados en fibras ópticas microestructuradas; es decir, comparar algunas características esenciales de nuestros sensores refractométricos de tipo extrínseco con al menos un sensor intrínseco basado en fibra óptica microestructurada.

A continuación, se presentan los resultados de caracterización de un sensor refractométrico de fibra microestructurada de núcleo suspendido (SC-MOF por sus siglas en inglés). Estos resultados fueron obtenidos en colaboración con el grupo de investigación de fibras ópticas de la Universidad Técnica de República Checa en Praga de Fibras ópticas y espacio libre dirigido por el profesor Dr. Stanislav Zvanovec y que forma parte del trabajo de tesis del estudiante de doctorado Tomas Nemecek.

6.2. Descripción del sensor

La SC-MOF utilizada está fabricada de sílice puro con un diámetro de núcleo de 2,75 μm , con un puente de anchura de 170 nm, y los agujeros en el revestimiento de dimensiones de 30 x 40 μm (Figura 6.1).

El SC-MOF se escindió con precisión para lograr un perfecto corte sin distorsión de la superficie para proporcionar fuerzas capilares iguales en los tres agujeros existentes en el revestimiento. Todas las muestras del sensor se almacenaron a temperatura ambiental de 22 a 25 $^{\circ}\text{C}$ y a una humedad de 35 a 45% antes de las mediciones.

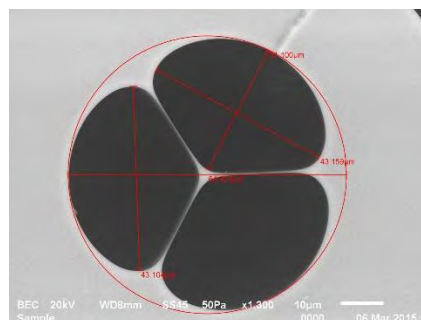


Figura 6.1. Sección transversal de SC-MOF (Fotografía).

6.3. Metodología de la caracterización del sensor SC-MOF

Se realizó la caracterización de cuatro muestras de sensores basados en SC-MOF de diferentes diámetros de núcleo (4 μm , 3.4 μm , 3.1 μm y 2.7 μm) hechas de sílice, con cuatro sustancias (analitos) de diferente índice de refracción.

Tabla 6.1. Índices de refracción de las sustancias utilizadas en el experimento.

Sustancia	Abreviación	Índice de refracción (@1500nm)
Etilenglicol	EG	1.4204
Mezcla: Etilenglicol 25% + Alcohol Isopropílico 75%	EG25-IPA75	1.3861
Mezcla: Etilenglicol 50% + Alcohol Isopropílico 50%	EG50-IPA50	1.3970
Mezcla: Etilenglicol 75% + Alcohol Isopropílico 25%	EG75-IPA25	1.4086

Un extremo de la SC-MOF fue acoplado a una fuente de luz polarizada que opera a 1550nm; en el otro extremo, los capilares de la fibra son llenados poniendo el extremo de la SC-MOF en contacto con el líquido bajo estudio, posteriormente se acopla a un fotodetector para medir la potencia óptica y evaluar las pérdidas ocasionadas por la sustancia bajo prueba. Este tipo de sensor utiliza el efecto de refracción basado en la superposición de las ondas de campo evanescente en los agujeros del revestimiento de la SC-MOF llenos de alguna de las sustancias utilizadas en la caracterización del sensor [2]. En la figura 6.2 se muestra el diagrama de bloques utilizado en los experimentos.

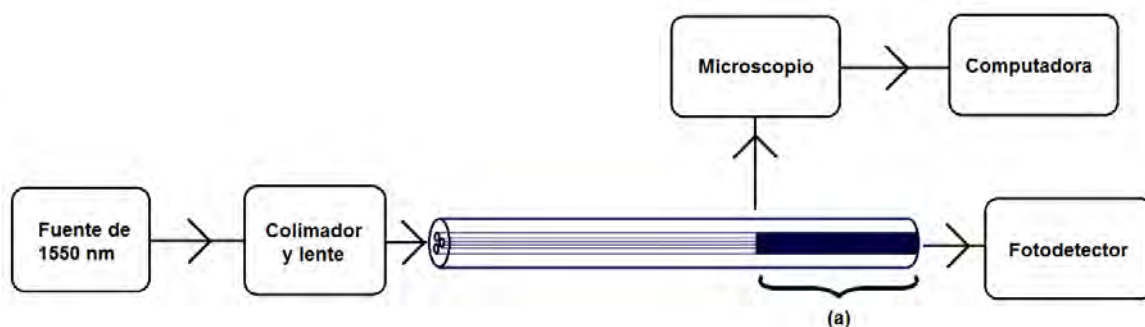


Figura 6.2. Diagrama de bloques de la instalación experimental. (a) Sección de la SC-MOF con los capilares llenos de líquido.

Los capilares de la SC-MOF fueron llenados a diferentes distancias, comenzando con menos de medio centímetro hasta 5 centímetros o cuando la atenuación sea de aproximadamente 30 dB, con aumentos de medio centímetro. Al aumentar la distancia de los capilares llenos con líquido disminuye la potencia recibida en el fotodetector. Las mediciones de cada una de las sustancias se realizaron de dos a tres veces para cada una de las SC-MOF.

Para realizar una medición confiable, es necesario tener un corte perfecto en el extremo de la SC-MOF que se pondrá en contacto con los líquidos, dado que cualquier deformación en la faceta de la SC-MOF se refleja en un llenado no uniforme de los capilares de la SC-MOF, como se muestra en la figura 7.3, principalmente al trabajar con líquidos de viscosidad mayor a la del agua.

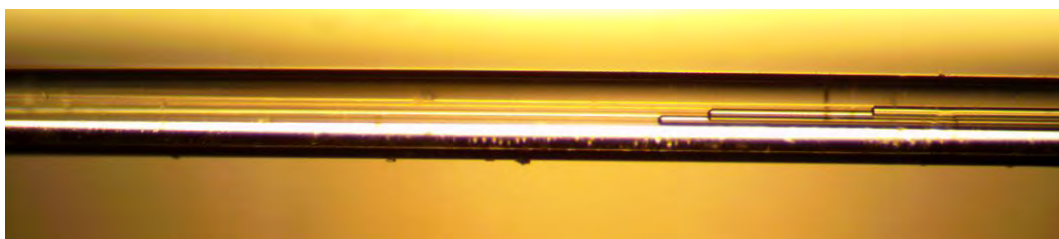


Figura 6.3. Sensor de SC-MOF: Vista lateral (Fotografía).

Otro de los problemas que se presentan en este sensor, es la aparición de burbujas de aire al realizar el rellenado de los capilares de las SC-MOF como se observa en la figura 7.4, este fenómeno también se presenta en sustancias donde la viscosidad es mayor a la del agua, por ejemplo el etilenglicol.

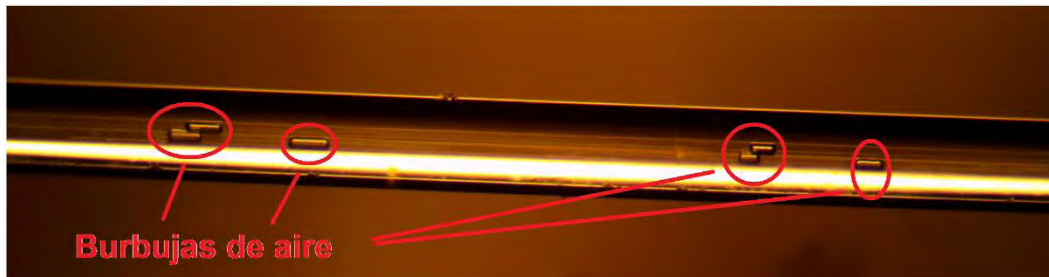


Figura 6.4. Sensor de SC-MOF con burbujas de aire en capilares: vista lateral (Fotografía).

6.4. Resultados

Los resultados de los experimentos se muestran a continuación.

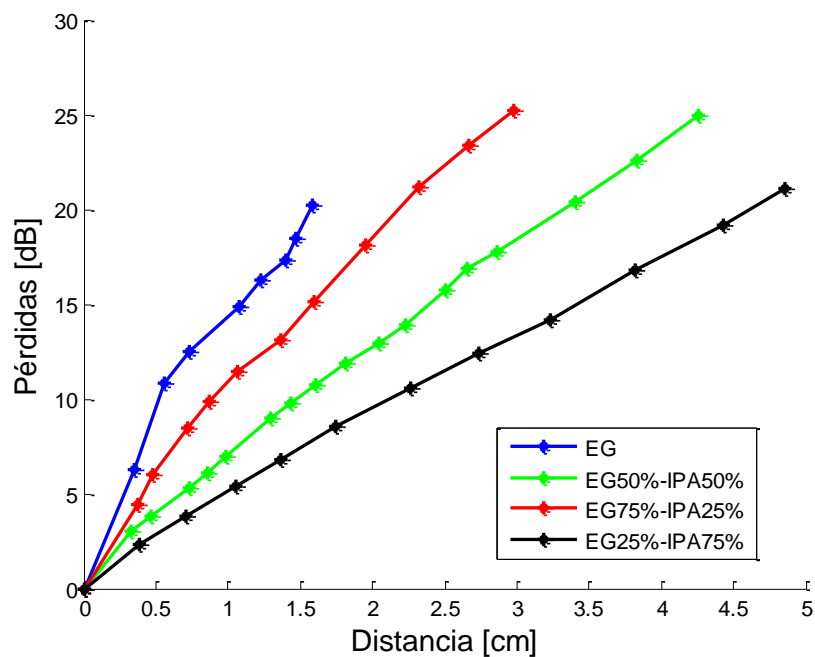


Figura 6.5. Pérdida óptica en el sensor SC-MOF respecto a la longitud del capilar relleno de analito utilizando una SC-MOF de $2.7\mu\text{m}$ de diámetro de núcleo, para 4 diferentes analitos.

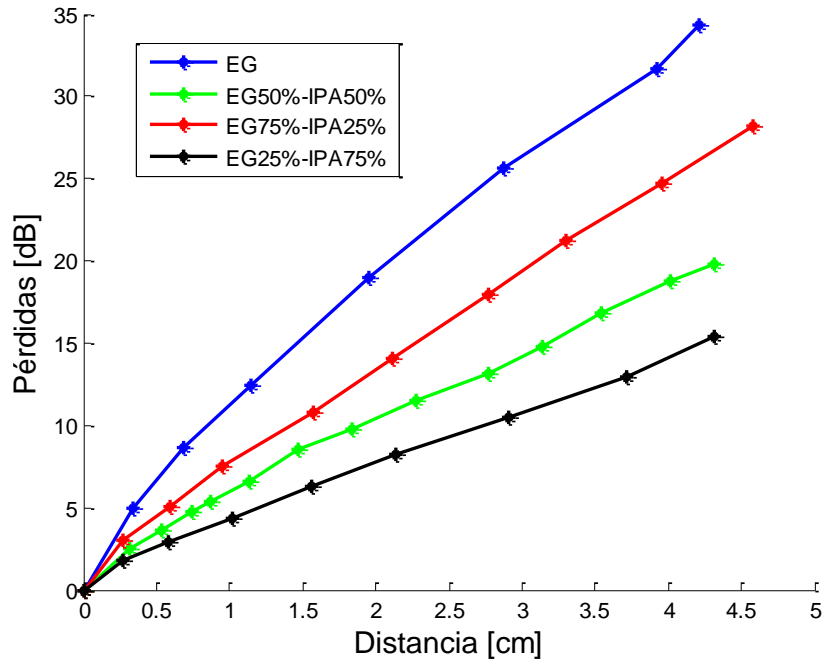


Figura 6.6. Pérdida óptica en el sensor SC-MOF respecto a la longitud del capilar relleno de analito utilizando una SC-MOF de $3.1\mu\text{m}$ de diámetro de núcleo, para 4 diferentes analitos.

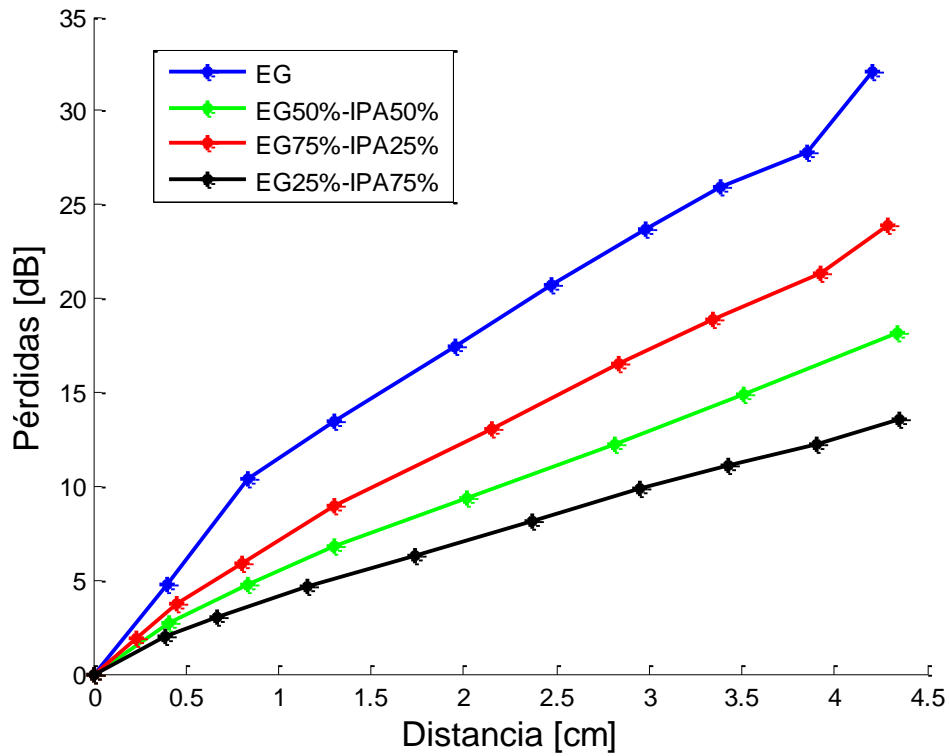


Figura 6.7. Pérdida óptica en el sensor SC-MOF respecto a la longitud del capilar relleno de analito utilizando una SC-MOF de $3.4\mu\text{m}$ de diámetro de núcleo, para 4 diferentes analitos.

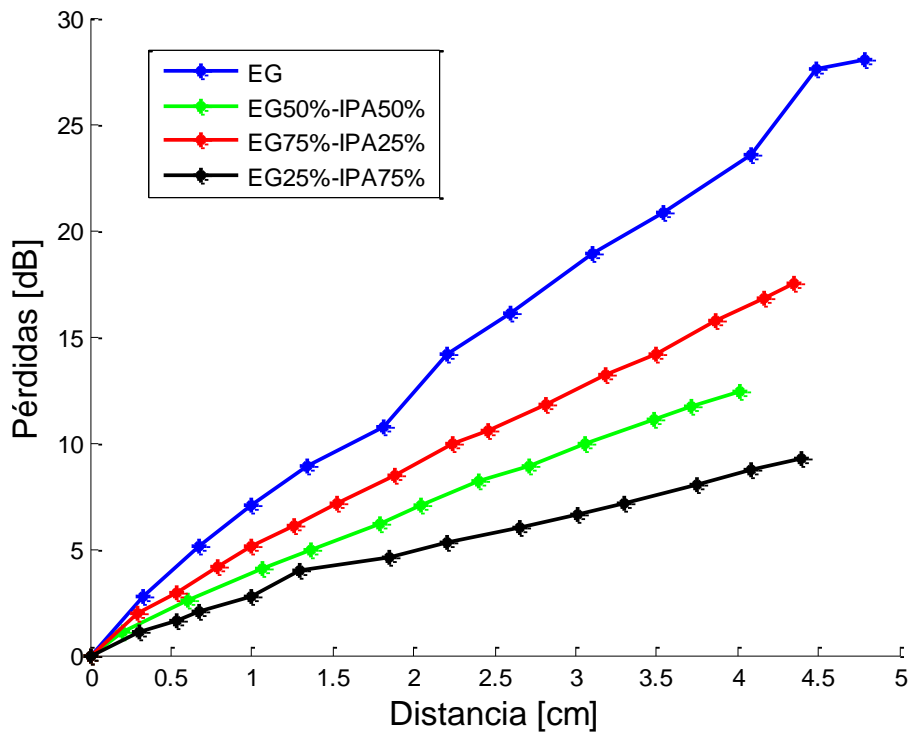


Figura 6.8. Pérdida óptica en el sensor SC-MOF respecto a la longitud del capilar relleno de analito utilizando una SC-MOF de 4 μ m de diámetro de núcleo, para 4 diferentes analitos.

La luz dentro de la SC-MOF es fuertemente guiada gracias a la diferencia en los índices de refracción entre sílice y aire, la superposición de las ondas del campo evanescente es mínima en el revestimiento de la SC-MOF; al disminuir la diferencia entre los índices de refracción, es decir, cuando los capilares de la SC-MOF son llenados con alguna sustancia de mayor índice de refracción que el aire, la superposición de las ondas del campo evanescente aumenta.

Conociendo la distancia de los capilares llenos con la sustancia bajo estudio y las pérdidas ocasionadas por dicha sustancia, es posible determinar de qué líquido se trata. En este aspecto todas las SC-MOF presentan una respuesta similar, dado que al aumentar la distancia de los capilares llenos del líquido es más clara la diferencia entre cada una de las sustancias. Sin embargo, el diámetro del núcleo de la SC-MOF influye directamente en la sensibilidad del sensor. Esto se puede observar de mejor manera en la figura 6.9.

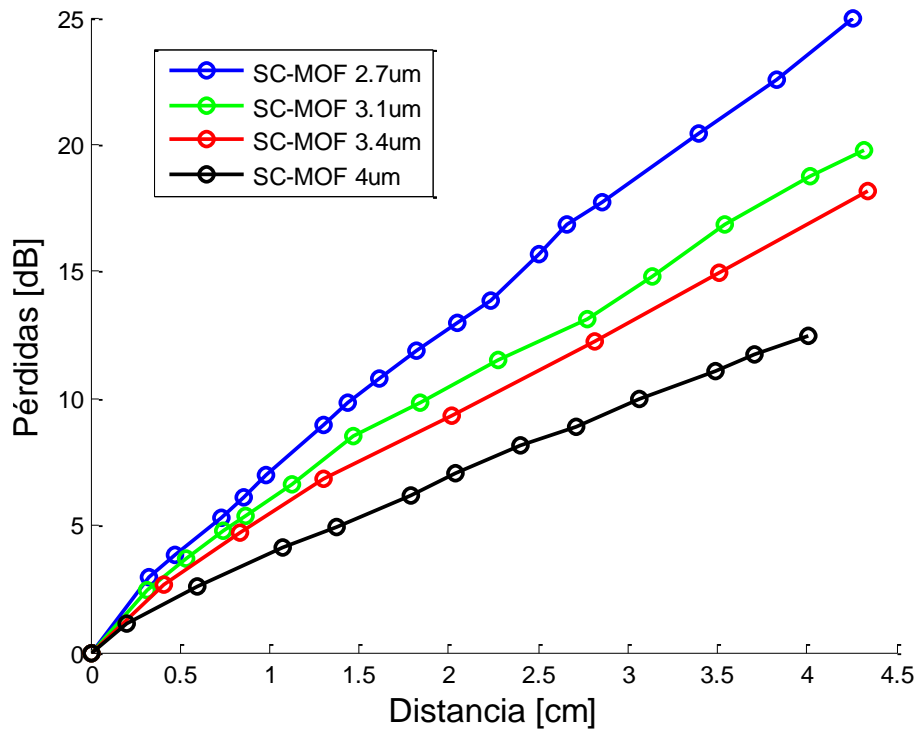


Figura 6.9. Pérdidas ópticas en el sensor SC-MOF vs. la longitud de capilar relleno con el analito EG50-IPA50 para diferentes diámetros del núcleo de la SC-MOF.

Al disminuir el diámetro del núcleo de la SC-MOF, aumenta la sensibilidad del sensor a la presencia de alguna sustancia dentro de la SC-MOF. Esto es algo que se debe tener en cuenta al seleccionar la SC-MOF que se utilizará y el rango de índices de refracción en que se desea trabajar.

El sensor refractométrico intrínseco basado en SC-MOF exhibió una sensibilidad similar al sensor refractométrico extrínseco con el transductor semielipsoidal A (cerca de 180 dB/RIU) en el rango de índice de refracción externo de $1,33 < n < 1,40$.

En el rango de $1,41 < n < 1,43$ el sensor basado en SC-MOF tiene la sensibilidad que supera 500 dB/RIU. Es un rendimiento mejor en comparación con el sensor con el elemento semi-elipsoidal A (cuya sensibilidad es alrededor de 250 dB/RIU). Dicha diferencia en rendimiento se atribuye los valores cercanos de n de analito en el rango señalado ($1,41 < n < 1,43$) y el índice de refracción de material de SC-MOF – sílice ($n=1.46$).

Conclusiones

El sensor refractométrico intrínseco basado en SC-MOF (con un diámetro de núcleo igual a 2.7 μm) exhibió una sensibilidad similar al sensor refractométrico con el transductor externo semielipsoidal A (cerca de 180 dB/RIU) en el rango de índice de refracción externo de $1,33 < n < 1,40$ (un rango que corresponde a agua contaminada).

En el rango de $1,41 < n < 1,43$ el sensor basado en SC-MOF demostró la sensibilidad ligeramente superior a 500 dB/RIU. Dicha diferencia en rendimiento se atribuye los valores cercanos de n del analito en el rango señalado ($1,41 < n < 1,43$) y el índice de refracción de material de SC-MOF – sílice ($n = 1.46$). Es un rendimiento mejor en

comparación con el sensor con el elemento externo semielipsoidal A (cuya sensibilidad máxima en el modo de reflexión es alrededor de 250 dB/RIU).

El sensor refractométrico basado en SC-MOF puede ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones para análisis de líquidos, principalmente en donde se requiere que la muestra de líquido sea muy pequeña; es un método de medición fácil de implementar en comparación con otros métodos que utilizan SC-MOF, por ejemplo, sensores basados en fluorescencia. Por otro lado, debido al principio de operación, este sensor tiene como limitante el rango de índice de refracción, el cual está marcado por el índice de refracción del material de la SC-MOF.

Referencias del Capítulo 6

[1] A. S. Webb, F. Poletti, D. J. Richardson and J. K. Sahu, "Suspended core holey fiber for evanescent-field sensing," *Optical Engineering* Vol. 46(1), 010503-010503, 2007.

[2] T. Nemecek, M. Komanec, M. Martan, R. Ahmad, and S. Zvanovec, "Suspended-core microstructured fiber for refractometric detection of liquids," *Applied Optics*, Vol. 54(30), 8899-8903, 2015.

CAPÍTULO 7. Conclusiones Generales

Los sensores de fibra óptica, en particular, los sensores refractométricos tienen varios campos de aplicación extensos debido a las ventajas competitivas con respecto a los sensores mecánicos, eléctricos y de otros tipos. Sus principales ventajas consisten en la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, seguridad en ambientes inflamables y explosivos, alta resistencia a agentes químicos, un rango de temperaturas superior al rango que soportan los sensores de competencia y numerosas otras ventajas.

Los sensores refractométricos de fibras ópticas con transductores ópticos (elementos de detección) externos a la fibra presentan un gran interés práctico, dado que son relativamente fáciles de implementar y por esto tienen un costo menor en comparación con otros sensores de competencia.

Al inicio de este trabajo existían problemas no resueltos en el desarrollo e implementación de los sensores refractométricos con elementos de detección externos, en particular, los siguientes:

1. Las características de los sensores refractométricos de fibras ópticas con transductores externos en el modo de reflexión. En particular, la posibilidad de obtener una mayor sensibilidad en la medición de índice de refracción externo en este modo, en comparación con el modo de transmisión.
2. El efecto de la forma de superficie de trabajo de los transductores sobre la respuesta del sensor al índice de refracción externo: el rango de índice de refracción que mide el sensor, y la sensibilidad al índice de refracción externo. En particular, el efecto de superficies de trabajo de segundo orden: elipsoides de rotación sobre eje vertical z (esferoides alargados y achatados).
3. La situación de competencia de dichos sensores con respecto a los sensores refractométricos intrínsecos basados en fibras microestructuradas.

Se encontró, por medio de un estudio comparativo de diferentes paquetes de software, que ningún paquete de software comercial de trazado de rayos (OSLO, FRED, ZEMAX y ASAP) cumple con requisitos necesarios para el análisis de las características de los sensores refractométricos de fibras ópticas con transductores ópticos (elementos de detección) externos a la fibra. Esto debido a que la mayoría de éstos son desarrollados para analizar los sistemas ópticos tradicionales de imagen, tales como lentes, prismas, espejos y sistemas de imagen con base en estos elementos.

El estudio mencionado reveló también que el software no comercial SRFO desarrollado en la UNAM específicamente para el análisis de sensores refractométricos con elemento de detección externo, es eficaz y útil para los propósitos del presente trabajo, aunque tiene algunas limitaciones, la obtención de funciones de transmisión contra el índice de refracción externa y parámetros del sensor es laboriosa, y este software no permite mostrar las imágenes de transductores ópticos y trayectorias de los haces en tres dimensiones (3D).

Adicionalmente a la selección y prueba de la herramienta de simulación numérica, se desarrolló la metodología de estudios experimentales y se diseñó e implementó una instalación experimental para la caracterización de los sensores refractométricos bajo una variación de parámetros (variables del estudio):

1. La distancia adimensional de las fibras ópticas (o la fibra óptica única) del eje de simetría del transductor refractométrico, Λ ;
2. La forma de superficie de trabajo del transductor (este por medio de un fácil cambio de las muestras de transductores en la presente instalación).

Con la herramienta teórica de simulación numérica y mediante estudios experimentales se obtuvieron datos nuevos sobre el sensor objeto del presente trabajo, en particular, los datos siguientes:

- Para las formas de superficie del transductor semielipsoidales de rotación sobre eje vertical z (esferoides alargados y achatados) y semiesférica, y para los dos modos de operación (transmisión y reflexión) se obtuvo las siguientes cuatro tipos de características teóricas y experimentales de funcionamiento de sensores:
 - A. La transmitancia relativa T^* contra el índice de refracción externo n , con la distancia adimensional Λ como parámetro,
 - B. La transmitancia relativa T^* contra la distancia adimensional Λ con el índice de refracción externo n como parámetro,
 - C. La reflectancia relativa R^* contra el índice de refracción externo n , con la distancia adimensional Λ como parámetro,
 - D. La reflectancia relativa R^* contra la distancia adimensional Λ con el índice de refracción externo n como parámetro.

Se encontró que el sensor con el elemento semielipsoidal A

Para el sensor semielipsoidal A se obtuvieron la sensibilidad en el rango de 120 a 200 dB/RIU aproximadamente en el modo de transmisión. En el modo de reflexión se obtuvieron un notable aumento de la sensibilidad hasta 160-260 dB/RIU aproximadamente. En ambos modos de trabajo, la sensibilidad y el rango de índice externo de refracción depende del parámetro Λ . La pérdida intrínseca óptica en los tres tipos de elementos se encuentra entre 2 y 7 dB en el modo de transmisión y entre 7 y 15 dB en el modo de reflexión.

En este sensor el rango de índice externo de refracción se puede cambiar por medio de la selección del parámetro Λ y la selección de modo de operación – transmisión o reflexión.

Una ventaja principal del modo de reflexión consiste en una sensibilidad notablemente mayor que el sensor tiene en este modo en comparación con el modo de transmisión. Además, en el modo de reflexión la cantidad total de las fibras ópticas necesarias para el funcionamiento del sensor se reduce por un factor de dos, lo que se traduce en menor masa y costo del sensor.

El sensor refractométrico intrínseco basado en SC-MOF exhibió una sensibilidad similar al sensor refractométrico extrínseco con el transductor semielipsoidal A (cerca de 180 dB/RIU) en el rango de índice de refracción externo de $1.33 < n < 1.40$ (un rango que corresponde a agua contaminada).

En el rango de $1.41 < n < 1.43$ el sensor basado en SC-MOF presenta una sensibilidad ligeramente superior a 500 dB/RIU. Dicha diferencia en rendimiento se atribuye los valores cercanos de índice de refracción de analito en el rango señalado ($1.41 < n < 1.43$) y el índice de refracción de material de SC-MOF: sílice ($n=1.46$). Es un rendimiento mejor en comparación con el sensor con el elemento externo semi-elipsoidal A (cuya sensibilidad máxima es alrededor de 250 dB/RIU en el modo de reflexión).

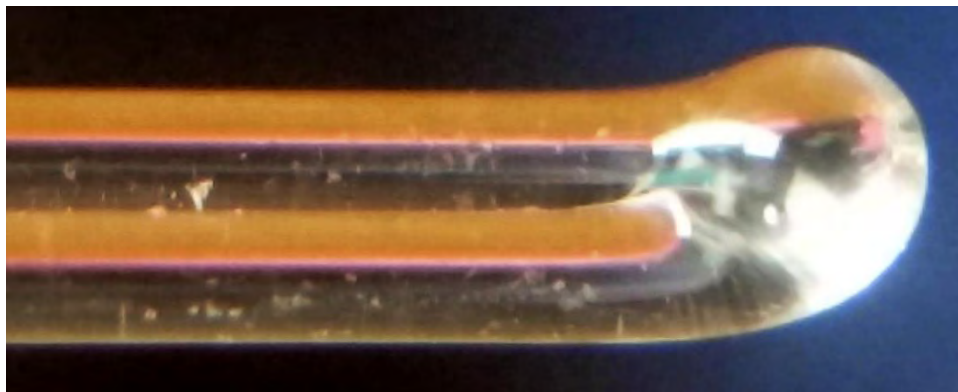
El sensor refractométrico| basado en SC-MOF puede ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones para análisis de líquidos, principalmente en donde se requiere que la muestra de líquido sea muy pequeña. Por otro lado, debido al principio de operación,

este sensor tiene como limitante el rango de índice de refracción, el cual está marcado por el índice de refracción del material de la SC-MOF.

Con base en todo el nuevo conocimiento obtenido en el presente trabajo se puede resumir que los sensores refractométricos de fibras ópticas con transductores ópticos externos pueden trabajar de forma eficiente en el modo de reflexión y presentan características atractivas al utilizar las superficies de trabajo elipsoidales de los transductores ópticos. En comparación con sensores existentes de competencia, dichos sensores tienen características mejores o similares. Pero, a diferencia de sensores de otros tipos dichos sensores permiten una fácil modificación de rango de medición del índice de refracción externo y la sensibilidad del sensor al dicho índice. Además, potencialmente su costo es menor en comparación con otros sensores de competencia, lo que es de gran importancia en el mundo real de ingeniería.

Trabajo a futuro

Los sensores refractométricos en fibras ópticas con elemento de detección externo son una opción atractiva en aplicaciones donde sea necesaria la discriminación de sustancias o la medición de nivel de líquido, por mencionar algunas. A pesar de tener una alta eficiencia en diversas aplicaciones, un punto débil del diseño existente es la unión entre las fibras ópticas y el elemento de detección; esta unión en diseños existentes se hace con un pegamento que no es tan resistente a los factores ambientales mecánicos y temperatura como el material de la fibra óptica y elemento transductor. Por tanto, es importante e interesante encontrar las vías para la integración de todos los elementos del sensor en una estructura monolítica hecha del mismo material. En la realización de este trabajo se hicieron pruebas para fabricar sensores refractométricos con elemento de detección externo mediante la fusión de dos fibras ópticas de sílice con ayuda del haz de un láser de CO₂.



Muestra del sensor fabricada mediante tecnología láser CO₂ (Fotografía).

La información obtenida de las pruebas realizadas nos confirma que es posible la fabricación de este tipo de sensores mediante tecnología láser, sin embargo, estos sensores son sensibles a la forma geométrica del elemento transductor y en el proceso de fabricación es muy difícil controlar la forma de dicho elemento.