

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE LAS FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO  
COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN Y COMO  
TRANSDUCTORES DE LOS SENSORES ÓPTICOS**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

ELÉCTRICA-TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A :

**SELENE PÉREZ GARCÍA**



DIRECTOR DE TESIS: DR. SERGEI KHOTIAINTSEV

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., AGOSTO 2010

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Gómez Castellanos Javier

**Secretario:** Dr. Moctezuma Flores Miguel

**Vocal:** Dr. Khotiaintsev Serguei

**1er. Suplente:** Dr. Avendaño Alejo Maximino

**2do. Suplente:** Dr. García Garduño Víctor

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR SERGUEI KHOTIAINTSEV

---

FIRMA

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis queridos padres por su apoyo incondicional en todos los proyectos que he emprendido, todos mis logros son fruto del esfuerzo y dedicación que han entregado a nuestra familia.

A Orlando y a mis hermanos, Vero, Angel y Gerardo por su compañía, apoyo y cariño.

A los miembros del jurado, Dr. Javier Gómez Castellanos, Dr. Miguel Moctezuma Flores, Dr. Maximino Avendaño Alejo y Dr. Víctor García Garduño por sus revisiones y sugerencias a esta tesis.

A mi profesor y tutor el Dr. Serguei Khotiaintsev por su confianza, motivación, crítica y enseñanza durante todo el proceso de esta tesis.

A la UNAM por recibirme nuevamente como miembro universitario y a la CEP (Coordinación de Estudios de Posgrado) por la beca otorgada.

A Jordi, Enrique, Alberto y Alfredo, por su colaboración con los experimentos y la redacción de la tesis.

A mis compañeros de maestría por su amistad.

# Índice

1.	Introducción.....	1
1.1.	Antecedentes.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.3.	Metas.....	3
1.4.	Metodología.....	3
1.5.	Referencias.....	4
2.	Las Fibras Ópticas de Plástico (POF) y Sus Aplicaciones.....	5
2.1	Singularidades de las POF.....	5
2.2	Aplicaciones de las POF.....	12
2.2.1	Iluminación.....	12
2.2.2	Transmisión de datos.....	13
2.3	Sensores Ópticos.....	15
2.3.1	Categorías de los sensores ópticos.....	15
2.3.2	Avance de los sensores ópticos de plástico.....	16
2.4	Métodos de Análisis de las características de las fibras ópticas y sensores ópticos.....	17
2.5	Conclusiones.....	19
2.6	Referencias.....	19
3.	Diseño Conceptual de un Nuevo Tipo de Sensor Óptico Refractométrico de Plástico y Análisis de sus Características.....	20
3.1	Propuesta de un nuevo sensor refractométrico de geometría semi-cilíndrica.....	20
3.2	Diseño conceptual de un sensor de nivel de líquidos.....	22
3.3	Evaluación teórica de las propiedades refractométricas de un elemento transductor óptico semicilíndrico utilizando la óptica geométrica.....	23
3.4	Investigación teórica de las características refractométricas de un elemento transductor óptico semicilíndrico mediante el trazado de rayos.....	24
3.4.1.	Modelo matemático del elemento transductor.....	24
3.4.2.	Resultados del modelado matemático del elemento transductor.....	24
3.5	Conclusiones.....	27
3.6	Referencias.....	28
4.	Resultados del Experimento.....	29
4.1	Descripción de la instalación experimental.....	29
4.2	Metodología de los estudios experimentales.....	37
4.3	Resultados del experimento.....	37
4.3.1.	Características refractométricas del elemento transductor.....	37
4.3.2.	Características del sensor de nivel de líquidos basado en un elemento transductor óptico semicilíndrico.....	44
4.4	Conclusiones.....	44
4.5	Referencias.....	45
5.	Discusión.....	46
6.	Conclusiones Generales.....	47
7.	Anexos: Copias de las Publicaciones Resultado de esta Tesis	

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

Los avances recientes significativos en la calidad de las fibras ópticas de plástico (POF) han generado el desarrollo de nuevas aplicaciones para transmisión óptica y sensado [1]-[3]. Las POFs son atractivas en el mercado porque son dispositivos multimodo de un núcleo relativamente amplio las cuales son fáciles de manejar e instalar. Los sistemas de transmisión basados en POF usan componentes simples y baratos como diodos emisores de luz (LEDs) en el intervalo de la luz visible o cerca del infrarrojo, conectores de enchufe simple, dispositivos divisores etc., el costo del sistema es bajo y su mantenimiento simple [1]. Actualmente las POFs permiten tasas de transmisión por encima de 10 Gbit/s sobre distancias de 300 metros [4]. Del mismo modo que las fibras ópticas de sílice las POFs son inmunes a interferencias electromagnéticas y ruido.

Las aplicaciones de POFs incluyen principalmente redes de área local (LAN) en distancias cortas en oficinas, edificios, campus pequeños. Otra aplicación emergente es la transmisión óptica de datos (análoga y digital) a bordo de vehículos, camiones, trenes, etc. Una característica distintiva de los vehículos de transporte es la necesidad de monitorear diferentes cantidades relacionadas a la operación del vehículo (temperatura, presión, nivel de diferentes líquidos en depósitos y tanques, etc.). Por lo tanto, es de gran interés práctico complementar las comunicaciones ópticas con sensado óptico a bordo del vehículo. Para una mejor compatibilidad, los sensores ópticos deberían operar vía las mismas POFs de la red que se encuentra a bordo del vehículo.

Algunos estándares hechos para redes LAN a bordo de los vehículos ya existen. En particular, el Domestic Digital Bus System (DB2) [5] especifica un sistema de anillo el cual conecta diferentes dispositivos como radio, televisión, CD, cargadores y sistemas navegadores en vehículos. La especificación Media Oriented Systems Transport Multimedia and Control Networking Technology (MOST) [6] es una recomendación para redes multimedia en automóviles, mientras que el sistema Byteflight [7] especifica los sistemas de conexión de bolsas de aire con otros componentes de control.

El sensado del nivel de líquidos es importante en todas las aplicaciones automotrices. Existe una amplia variedad de métodos de sensado apropiados para determinar el nivel de líquidos. Entre estos se incluyen los métodos mecánicos, eléctricos, ópticos y sus combinaciones.

Los sensores eléctricos de nivel de líquidos son empleados para medir el nivel de combustible en los tanques en el presente. En estos sensores, el nivel de combustible es medido con una señal eléctrica generada por una resistencia variable controlada por un flotador dentro del tanque. Estos sensores son simples y baratos, pero su resolución es relativamente baja. También los cables eléctricos en un ambiente flamable presentan un potencial peligro. Los sensores de fibra óptica ofrecen diversas ventajas para estas aplicaciones debido a la naturaleza dieléctrica de las fibras ópticas. Las ventajas de los

sensores ópticos no están limitadas a la ausencia de la conductividad eléctrica. También ofrecen inmunidad a los campos electromagnéticos, alta resistencia a la corrosión química y ausencia de peligros por chispazos. Estas características hacen a los sensores ópticos candidatos ideales para el uso en tanques con combustibles.

Entre los diferentes tipos de sensores ópticos, los sensores de fibra óptica de tipo intensidad (amplitud) son los más simples de implementar debido a la facilidad de la medición de la intensidad, en contraste a las mediciones de fase y polarización; éstos son completamente compatibles con las POFs. Por consiguiente, los sensores de intensidad óptica son los candidatos más prometedores para aplicaciones automotrices. En particular, los sensores refractométricos de tipo intensidad son adecuados para la medición de nivel de líquidos, las investigaciones y desarrollos recientes en trabajos similares se enfocan principalmente en sensores de sílice-vidrio, no son basados en POFs. De acuerdo a nuestra investigación hay solo dos publicaciones científicas las cuales tratan sensores refractométricos de plástico [8]-[9]. En la referencia [8] se describe un sensor para medir el índice de refracción el cual emplea una sección cónica de la POF de índice gradual. En [9] se demuestra la posibilidad de medición de líquido con el sensor refractométrico compuesto de múltiples curvaturas en una POF (o en un arreglo de POFs). Este sensor presenta importantes desventajas: su resolución vertical está limitada por el tamaño finito de las fibras curvadas, y debido a que a los múltiples lazos de fibras el sensor es voluminoso y difícil de acomodar y fijar en un tanque.

Por consiguiente, es de gran interés investigar el potencial de los sensores ópticos refractométricos de materiales plásticos los cuales pueden ser usados para medir el nivel de líquido en aplicaciones automotrices y la industria en general. En el presente trabajo se investiga un nuevo sensor óptico refractométrico con un elemento transductor de forma semicilíndrica. Este puede ser usado como un sensor puntual o en un arreglo de forma vertical en cuyo caso puede medir el nivel de un líquido como gasolina o diesel de una manera discreta en un tanque o recipiente. Dichos elementos transductores no son descritos en literatura existente y sus propiedades como sensores refractométricos y sensores de nivel de líquidos son desconocidos.

## 1.2 Objetivos

### *Objetivo General*

- Obtención de nuevos conocimientos sobre las propiedades de los elementos ópticos de plástico en forma de un semicilindro como transductores refractométricos y sensores de nivel de líquidos.

### *Objetivos Particulares*

- Desarrollo de una propuesta conceptual de un sensor refractométrico con elemento transductor de una forma semicilíndrica.
- Investigación teórica de las propiedades refractométricas del elemento transductor de plástico de una forma semicilíndrica.
- Diseño de los elementos transductores de plástico y fabricación de las muestras de estos elementos.

- Investigación experimental de las características refractométricas de los elementos transductores de plástico de una forma semicilíndrica.
- Comparación de las predicciones teóricas y datos experimentales; desarrollo de las conclusiones generales del presente tema.

### **1.3 Metas**

- Revisión bibliográfica de la información sobre el presente tema, con enfoque sobre las tendencias de desarrollo de las fibras ópticas y sensores ópticos de plástico, materiales plásticos para fibras y sensores ópticos, sistemas de comunicación óptica vía POF y arreglos de redes de sensores basados en POF.
- Evaluación teórica de las propiedades refractométricas de un elemento óptico semicilíndrico.
- Fabricación de algunas muestras de los elementos ópticos semicilíndricos de plástico.
- Modificaciones a la instalación experimental existente para los propósitos del presente trabajo.
- Investigación experimental de los elementos ópticos semicilíndricos: estudio de la transmisión óptica en función de los parámetros de los elementos y las fibras ópticas que en conjunto constituyen un sensor refractométrico.
- Investigación teórica y experimental de la posibilidad de distinguir entre diferentes líquidos tales como agua, gasolina, y diesel con el mismo elemento transductor.
- Diseño y fabricación de una maqueta funcional de un sensor de nivel de líquidos con elemento transductor semicilíndrico de plástico.
- Investigación experimental de las características de la maqueta funcional del sensor de nivel de líquidos.
- Análisis de los resultados obtenidos y elaboración de las recomendaciones sobre el trabajo futuro.
- Desarrollo de las conclusiones sobre el potencial del presente sensor.

### **1.4 Metodología**

- La metodología incluye tanto métodos teóricos como experimentales.
- En la parte teórica se planea el uso de métodos matemáticos, métodos numéricos en general, procesamiento estadístico de los datos y teoría de optimización.
- En la parte experimental está prevista la fabricación de muestras de los elementos ópticos transductores refractométricos de plástico y su caracterización utilizando diferentes métodos experimentales.

## 1.5. Referencias

- [1] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, and W. Daum, *POF Handbook Optical Short Range Transmission Systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [2] W. Andreas, *Plastic Optical Fiber: Principles, Components, Installation*, Publicis MCD Verlag, Alemania 1999.
- [3] P. Polishuk, “POF Markets and Applications a Worldwide View”, in *The 18<sup>th</sup> International Conference in Plastic Optical Fiber 2009*.
- [4] F. Breyer, J. Lee, S. Randel, and N. Hanik, “Comparison of OOK- and PAM-4 Modulation for 10 Gbit/s Transmission over up to 300 m Polymer Optical Fiber”, in *Optical Fiber Communications/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008*, pp. 1–3.
- [5] C. Ciocan, “The Domestic Digital Bus System (DB2). A Maximum of Control Convenience in Audio Video”, in *International Conference on Consumer Electronics 1990*, pp. 170 – 171.
- [6] L. Guglielmetti, “Standardizing Automotive Multimedia Interfaces,” *IEEE Multimedia*, vol. 10, no. 2, pp. 76–78, Apr.-Jun. 2003.
- [7] G. Cena, and A. Valenzano, “Performance Analysis of Byteflight Networks”, in *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, 2004, pp. 157–166.
- [8] H. Poisel, H. Meedt, M. Luber, J. Niewisch, “Fiberoptic Liquid Level Sensor-FOLLS”, in *16th International Conference on Plastic Optical Fibers*, 2007, pp. 178-181.
- [9] J. Arrue, F. Jimenez, G. Aldabaldetrek, “Analysis of the Parameters of Tapers in Graded-Index POF for the Design of a Refractive-Index Sensor and Other Applications”, in *16th International Conference on Plastic Optical Fibers*, 2007, pp. 238-241.

## 2. LAS FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO (POF) Y SUS APLICACIONES

### 2.1. Singularidades de las POF

Las fibras ópticas de plástico son una guía de onda óptica fabricada de dos (o más) polímeros altamente transparentes. El núcleo es rodeado por un revestimiento de un material de índice de refracción menor para que se produzca el fenómeno de la reflexión total interna en la interface de núcleo – revestimiento (o recubrimiento). Diferentes materiales usados en el núcleo y revestimiento dan como resultado diferentes intervalos de temperatura de trabajo, longitud de onda y de atenuación. La diferencia entre índices de refracción del revestimiento y núcleo definen el máximo ángulo con el que pueden entrar los rayos (apertura angular de la fibra óptica) provocando un diferente retardo entre los rayos (el que determina el ancho de banda de la fibra óptica). Perfiles de índice de refracción de formas complejas permiten un incremento en el ancho de banda y reducen pérdidas por curvatura, en comparación con el perfil sencillo escalonado.

Algunos beneficios que tienen las fibras ópticas de plástico comparándolas con las fibras de cuarzo son:

- Componentes simples y menos costosos.
- Operan en el rango de la luz visible.
- Gran flexibilidad y resistencia a curvaturas, golpes y vibraciones.
- Fácil manejo y conexión debido a que sus núcleos son relativamente grandes comparados con las fibras de vidrio.
- Equipo de pruebas de uso simple y económico.
- Es más segura que las fibras de vidrio debido a las astillas y a que no utiliza láseres como fuentes.
- Fácil fabricación.

En comparación con los cables de cobre, las fibras ópticas de plástico tienen las siguientes ventajas (comunes a todos los tipos de fibras ópticas):

- Inmunidad a interferencias electromagnéticas.
- Mayor ancho de banda.
- Menor peso.
- Los transceptores requieren menor potencia.

Una de las desventajas de las fibras ópticas plásticas es la alta atenuación que tienen con respecto a las fibras de vidrio (cuarzo), por lo cual sus aplicaciones están limitadas a los sistemas locales, de corto alcance (hasta unos cientos de metros, típicamente). Sin embargo, a esta categoría corresponde un gran sector de mercado de telecomunicaciones: los sistemas de comunicaciones en oficinas y varios medios de transporte, como automóviles, camiones, trenes, etc.

Las fibras ópticas de plástico tienen su origen en los años 1960's - década en que lo reportó una empresa estadounidense (Pilot Chemical of Boston), a finales de esa década la empresa

Du Pont realizó mas investigaciones. Después de varios años de desarrollo Du Pont vendió la división de POF a Mitsubishi Rayon de Japón (1978).

Las POF de PMMA (polimetil metacrilato) tenían pérdidas de 1000 dB/km pero los siguientes desarrollos de Mitsubishi tuvieron pérdidas de 150 dB/km a una longitud de onda de 650 nm, esta fibra era de índice escalonado con un ancho de banda de 50 Mb/s sobre 100 metros de longitud. El siguiente gran desarrollo fue hecho por el profesor Koike y sus colegas de la universidad de Keio en 1990. Ellos desarrollaron un proceso de manufactura de la fibra óptica plástica de índice gradual (GI-POF) usando el PMMA y obtuvieron en esta fibra un ancho de banda de 3 GHz-km con pérdidas de 150 dB/km a una longitud de onda de 650 nm. Luego en 1995 el profesor Koike y sus colegas desarrollaron una fibra de índice gradual con polímero perfluorado con una pérdida de 50 dB/km en un rango de longitudes de onda de 650nm-1300nm. Los laboratorios Bell reportaron en 1999 que alcanzaron una velocidad de transmisión de 10 Gb/s sobre 100 metros de la fibra óptica comercial modelo Lucina.

En el año 2001 se comenzaron a reportar los desarrollos de fibras ópticas plásticas microestructuradas (mPOF) por diferentes grupos en Australia y Corea.

En el 2003 investigadores de la universidad de Taiwán realizaron un estudio sobre la fabricación y caracterización de fibras ópticas micro estructuradas plásticas en el cual presentan diferentes opciones en cuanto a flexibilidad y material, dicho estudio fue realizado para el rango de longitudes de onda de 633 a 1550 nm.

En el año 2005 la empresa Fuji Photo Film anuncio el primer enlace comercial disponible con fibras ópticas plásticas de índice gradual, dicho enlace era de 30 metros operando a una velocidad de 1 Gbit/s usando un láser de tipo VCSEL (*vertical-cavity surface-emitting laser*) que operaba a una longitud de onda de 780 nm.

En el año 2006 miembros del Instituto de óptica y mecánica de precisión Xi'an en China, reportaron la fabricación de un láser con base en una fibra óptica microestructurada dopada con tierras raras, de una gran apertura numérica, generando más de 200 mW de salida de potencia óptica a una longitud de onda de 578 nm. También en el año 2006 en la universidad de Sydney reportaron resultados sobre los experimentos con una fibra óptica plástica con núcleo rectangular “suspendido” en aire por pequeños y delgados puentes. La aplicación principal de esta fibra óptica es el acoplamiento entre diodos láser y las fibras ópticas.

En el 2007 los investigadores de la universidad VSB-Tecnica Ostrava publicaron un estudio sobre la caracterización de una fibra con 5 núcleos suspendidos en un arreglo circular, en particular caracterizaron la transmisión, atenuación y la influencia de curvaturas y presión en la fibra.

A continuación se presenta un resumen de los trabajos más importantes en el desarrollo de fibras ópticas plásticas:

Tabla 2.1. Las etapas de desarrollo de las fibras ópticas de plástico.

1965	Desarrollo de fibra PS/PMMA (Hyman y Walker)
1968	Dupont desarrolló la fibra de PMMA
1990	El profesor Koike de la Universidad de Keio anunció el desarrollo de GI-POF con un ancho de banda de 3 GHz/km.
1990	Se formó el grupo en USA POFIG Grupo de interés en POF
1992	Se realiza la primera conferencia sobre POF (Boston, Ma, EU).
1992	El profesor Koike reportó una transmisión de 2.5 Gbps sobre 100 m. usando un laser rojo.
1992	Primera conferencia en Paris sobre POF en conjunto con EFOC/LAN
1993	El profesor Sasaki de la Universidad de Keio reportó un amplificador óptico para POF
1994	DARPA anunció el premio para una alta velocidad en una red plástica (HSPN)
1994	Se realizó la transmisión de 2.5 Gbps sobre 100m con GI-POF usando un LED de 650 nm
1995	La universidad de Keio y KAST desarrollaron la fibra de fluoro-polimero
1997	El foro ATM aprobó POF PDM para 155 Mbps sobre 50m.
1997	Yamazaki de NEC reportó un enlace de 400 Mbps para 1394 sobre 70m.
1997	Asahi Glass reportó una fibra perfluorinatada GI-POF con una tercera parte de pérdidas convencionales sobre la fibra de PMMA.
1997	DARPA consolidó PAVNET, en la HSPN con Lucen Technologies agregada al consorcio.
1997	Imai de Fujitsu reportó 2.5 Gbps sobre 200m usando un FP-LD de 1.4 nm y una fibra GI-POF.
1998	Se desarrolló el estándar MOST para automóviles.
1999	Lucent reportó 11 Gbps sobre 100m de fibra Lucina (GI PF POF)
2000	La comisión europea comenzó con el programa POF bajo el nombre de Optomist
2001	El primer centro de aplicaciones POF se estableció en Nuremberg
2001.	La universidad de Sydney anunció el desarrollo de un cristal fotónico POF (mPOF)
2001	Se introdujo MOST en automóviles.
2001	Inició la comisión europea I/O Project and Home planet.
2001	Introducción del conector SMI
2002	Se ratificó el estándar IEEE 1394B y se completó el estándar para automóviles IDB-1394
2002	Fuji Film anunció disponibilidad de GI-POF
2004	Se introdujo el primer enlace DVI por Fuji Photo usando GI-POF
2004	Se comercializó la primer fibra GI-POF hecha de PMMA
2005	Se comercializó la fibra PF GI-POF anunciada por Chromics Fiberoptics
2006	Comenzó POF-ALL
2008	Comenzó POF-PLUS
2008	Se reportó una transmisión de 40 Gbps sobre 100 m de PF GI-POF
2009	Se comercializó la primer fibra microestructurada Mpof
2009	Se alcanzó una transmisión de 10.7 Gbps sobre 220m de PF GI-POF

Actualmente se siguen investigando y desarrollando las fibras ópticas plásticas, así como diversos componentes para los sistemas basados en estas fibras tales como las fuentes de luz (principalmente, los LEDs), fotodiodos, acopladores, transceptores, concentradores de rayos, conectores, multiplexores, demultiplexores, etc. Otro campo de especial interés son los enlaces de datos buscando alcanzar las mayores tasas de transmisión con las menores pérdidas. Uno de los desarrollos que ha alcanzado mayores tasas de transmisión a una mayor distancia es el de 10 Gbit/s sobre distancias de 300 m [7]. Otro campo de aplicación y en el cual se están realizando diversos desarrollos es en los sensores, debido a que el uso de estas fibras hace de los mismos que sean económicos y que tengan un procesamiento relativamente sencillo.

A diferencia de las fibras de vidrio, las fibras ópticas de plástico presentan diferentes ventanas de transmisión estas se encuentran en la parte del espectro electromagnético de la luz visible ya que es donde presentan menor atenuación y específicamente las ventanas tienen menor atenuación en 520 nm, 570 nm y 660 nm como se muestra en la figura 2.1.

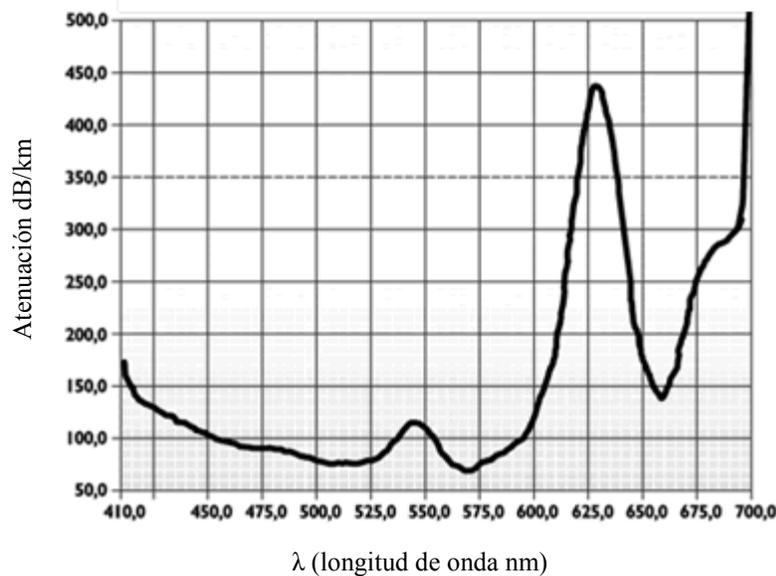


Figura 2.1 Ventanas de transmisión de una POF típica de PMMA

Un sistema en fibras ópticas consta principalmente de los siguientes componentes:

1. Transmisor. Usualmente una fuente semiconductor que convierte la señal eléctrica en óptica.
2. Enlace. Fibra óptica plástica con conectores, divisores, atenuadores, amplificadores, etc.
3. Receptor óptico. Componente semiconductor el cual convierte la señal óptica en eléctrica para su posterior procesamiento.

## **Transmisores para los sistemas con POF**

Actualmente los diodos semiconductores son usados para comunicaciones ópticas debido a su pequeño tamaño, rápidos tiempos de conmutación (menores a 1/10 ns), alta eficiencia (mayor al 50%), gran rango de longitudes de onda (200 nm a 10,000 nm), emisión espectral limitada, pequeño ángulo de radiación, pequeña superficie de emisión (resultando en un eficiente acoplamiento con las fibras ópticas), gran periodo de vida y confiabilidad, rangos de temperatura amplios y económicos, algunos de los transmisores que se utilizan con fibras ópticas plásticas son los siguientes:

- LED rojo y SLED: son las fuentes comerciales más usadas para fibras ópticas plásticas de PMMA, la longitud de onda de emisiones de 655 nm, la tasa de datos modulada alcanza los 156 Mbit/s, la potencia de salida es de 1.7 mW con una corriente de 100 mA.
- Diodo Láser Rojo. Trabajan alrededor de los 650 nm, con una corriente de 9 mA, el láser puede ser usado a temperaturas hasta de 90°C, la máxima eficiencia del láser es de 0.83 mW/mA y tienen un promedio de vida de más de 3000 horas, aunque se han hecho desarrollos de los mismos que trabajan en diferentes longitudes de onda con diferentes temperaturas e intervalos de potencia.
- LEDS Azules y verdes: En los últimos años se han desarrollado LEDS basados en GaN, estos se encuentran en el rango azul, pero agregándole Aluminio la longitud de onda de emisión puede ser ampliada a 560 nm, estos mismos pueden ser modulados alrededor de 100 Mbit/s tienen alta eficiencia y buena confiabilidad.
- Diodos Láser Verdes: Ya que los intervalos en donde presenta menor atenuación los sistemas POF son en la luz verde los diodos en el rango de 520nm a 560 nm son ideales para los mismos, se han desarrollado láseres de ZnSe, pero su vida de servicio aún no es suficiente.

## **Receptores para los sistemas con POF**

En la mayoría de las publicaciones sobre POF se utilizan receptores o por lo menos amplificadores comerciales. Los amplificadores con transimpedancia de bajo ruido están disponibles para casi cada rango de bits, la gran desventaja de usar estos componentes comerciales es que han sido diseñados para una capacidad para casi unos pocos pF. Si se acoplan fotodiodos con una capacidad considerablemente grande el ancho de banda y la sensibilidad disminuyen dramáticamente.

Debido a que existen muchos diodos y receptores comerciales no se mencionaran todos en este trabajo, sólo se mencionarán algunos:

En los pasados 10 años Siemens (ahora Infineon) desarrollo el tipo SHF250, este fotodiodo tiene alrededor de 1mm de diámetro, tiene una tasa de datos de 250 Mbit/s.

Otro de los diodos que se utilizan es el S5052 de Hamamatsu, es un chip encapsulado de 800  $\mu\text{m}$  con lentes de 3 mm de largo que garantiza un acoplamiento óptimo con las fibras de 1mm. El diodo funciona con tasas de 2,500 Mbit/s.

### Características del Polimetilmetacrilato (PMMA)

El Polimetilmetacrilato (PMMA) es un termoplástico amorfo, transparente e incoloro, duro, rígido, tiene una buena resistencia a la tracción y al impacto, a los rayos UV y una excelente claridad pero una resistencia débil a las temperaturas, a la fatiga y a los solventes. Es el material plástico transparente más resistente a la acción del intemperismo (sol, lluvia, niebla salina, contaminación). Resiste a la radiación solar ultravioleta sin amarillear y sin presentar fisuras superficiales, comunes a muchos otros materiales plásticos. El intervalo de temperatura de trabajo es de  $-40^{\circ}\text{C}$  y dependiendo de si es trabajo continuo o no su temperatura máxima puede variar entre 50 y  $90^{\circ}\text{C}$ . Transmite hasta el 93% de la luz visible (transmitancia superior a la del vidrio y muy superior a todos los plásticos transparentes).

- *Propiedades mecánicas de PMMA:*

- Alargamiento a la rotura oscila entre 2.5 y 5 %
- Dureza Rockwell, medida en escala M: 92
- Valor de su módulo de tracción entre los 2400 y 3300  $\text{N}/\text{mm}^2$
- Resistencia a la tracción hasta la rotura es de aproximadamente  $80 \text{ N}/\text{mm}^2$
- La resistencia al impacto Izod es de entre 16 y  $32 \text{ J m}^{-1}$

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas del PMMA.

Característica	Unidades	Valor
Birrefringencia ( $\alpha_1-\alpha_2$ )	$\text{cm}^3$	$2 \times 10^{-25}$
Temperatura Cielo	$^{\circ}\text{K}$	478
Coefficiente de expansión térmica volumétrica	$^{\circ}\text{K}^{-1} \times 10^{-4}$	2.60 t < Tg 5.80 t > Tg
Densidad	$\text{g}/\text{cm}^3$	1.190 a $20^{\circ}\text{C}$ 1.188 a $25^{\circ}\text{C}$ 1.150 a $110^{\circ}\text{C}$
Difusión de $\text{O}_2$ en PMMA	$\text{cm}^2/\text{s} \times 10^8$	1.4 a $25^{\circ}\text{C}$ 3.8 a $20^{\circ}\text{C}$
Permeabilidad al $\text{H}_2\text{O}$	$\text{g cm}/\text{cm}^2/\text{h}$	5.2
Constante dieléctrica a $25^{\circ}\text{C}$	$\mu$	3.6 a 50 Hz 3.0 a 1 kHz 2.6 a 1 MHz 1.57 a 30 GHz
Factor de disipación a $25^{\circ}\text{C}$	$\tan \delta$	0.062 a 50 Hz 0.055 a 1 kHz 0.014 a 1 MHz 0.007 a 30 GHz

Peso molecular enredo		7000
Entropía de polimerización	kJ/mol/°K	-117
Temperatura de transición vítrea	Tg(°K)	378
Capacidad calorífica	kJ/kg/°K	1.42 a 25°C 1.72 a 100°C 2.05 a 120°C 2.38 a 180°C 2.50 a 300°C
Conductividad Térmica	W/m°K	0.193 a 50°C 0.250 a 100°C
Calor de combustión	kJ/kg	-26.2
Calor de polimerización	kJ/mol	-57.8
Índice de refracción		1.492 para $\lambda=589\text{nm}$
Resistividad	Ohm cm	

- *Propiedades químicas de PMMA:*

Posee una excelente resistencia a ácidos minerales y orgánicos (aunque existen excepciones como el Ácido Acético), soluciones alcalinas diluidas y concentradas, soluciones de sales inorgánicas, hidrocarburos alifáticos, grasas, aceites y a la mayoría de los gases comunes. Su resistencia química se ve limitada frente a solventes orgánicos (disolventes y cetonas), y algunos alcoholes como el metanol, el etanol o el butanol.

Tabla 2.3 Resistencia del PMMA a diferentes materiales.

Producto químico	Comportamiento		
	Resistente	Relativamente resistente	No resistente
Ácidos minerales y orgánicos	X		
Ácido acético			X
Ácido sulfúrico bicromático			X
Acetato de etilo			X
Agua	X		
Aguarrás		X	
Alcohol		X	
Álcalis	X		
Amoniaco		X	
Benzol			X
Butanol			X
Cetonas			X
Cloruros	X		
Disolventes Orgánicos			X
Detergentes y productos de limpieza.		X	
Esteres		X	

Etanol			X
Gasolina	X		
Glicerina	X		
Halógenos			X
Hidrocarburos Alifáticos	X		
Hidrocarburos Aromáticos			X
Lubricantes y Aceites (vegetales o minerales)	X		
Metanol			X
Siliconas		X	

## 2.2. APLICACIONES DE LAS POF

### 2.2.1. Iluminación

La iluminación es una de las aplicaciones que lleva más tiempo en el mercado, ya que hasta hace pocos años se comenzaron a utilizar estas fibras para transmisión de datos, las fibras que se utilizan para iluminación tienen grandes núcleos, gran capacidad para acopio de luz y son altamente flexibles.

La decoración e iluminación con fibras ópticas de plástico se encuentra entre los sistemas de iluminación de última generación, con gran tecnología ofreciendo las mejores ventajas en el mercado con respecto a la tecnología tradicional, entre sus ventajas están:

1. Bajo consumo de energía, ilumina áreas amplias con una fuente simple.
2. Seguridad. Las POFs no transmiten electricidad sino únicamente luz, un sistema de iluminación de POF es ideal para ambientes húmedos o explosivos, una fuente de luz remota mantiene los componentes eléctricos a una distancia segura.
3. Luz fría. Las fibras ópticas emiten luz fría (sin luz infrarroja o violeta) por lo tanto la iluminación no afecta la actual temperatura del cuarto o espacio a iluminar ni los objetos en el mismo. Esta característica la hace ideal para la iluminación de fotografías u obras de arte donde otro tipo de iluminación puede alterar los colores originales.
4. Visualmente atractivo: Se puede obtener un efecto de color suave y puro con la tecnología POF, esta tecnología permite también tener cambios de color, regular la intensidad, destellos de luz, sombras, etc. con ciertos filtros.
5. Mantenimiento no especializado. Excepto por el reemplazamiento de la fuente de luz, es un producto libre de mantenimiento.
6. Fácil instalación: Es flexible a torceduras y es adaptable a diferentes tipos de instalación.

Las fibras ópticas de plástico en iluminación y decoración son usadas en muchas aplicaciones diferentes entre ellas: decoración interior de casas, iluminación de objetos delicados en museos, iluminación para efectos especiales en la industria del

espectáculo, señalización, iluminación en fuentes de agua, salidas de emergencia e iluminación de corredores, iluminación bajo el agua (albercas), iluminación de bloques de vidrio, vitrinas de alimentos, iluminación de ropa, jardinería, en condiciones flamables o explosivas, con el uso de energía solar, etc.



Figura 2.2. Base de palanca de velocidades y ropa iluminada con POF.

### 2.2.2. Transmisión de datos

Los estudios en esta aplicación se han desarrollado en los últimos años, siendo su principal aplicación en redes LAN a altas tasas de transmisión, esto se debe a que en los últimos años se ha incrementado la demanda de ancho de banda como es en automóviles, electrónica, fibra a la casa, redes de área local, etc. La demanda de ancho de banda se está incrementando principalmente en los hogares debido a que se transmite por un solo medio diferentes servicios como es telefonía, internet y televisión, en automóviles se conectan diferentes dispositivos como es el estéreo, DVD, televisión, sensores, etc.

En los últimos 10 años, ha habido un gran número de desarrollos en la tecnología de componentes POF, incluyendo fibras, fuentes ópticas, esquemas de modulación y conectores.

**Fibras:** Las fibras POF originales para transmisión de datos eran de índice escalonado (SI) hechas de PMMA, posteriores desarrollos de fibras del mismo material de índice gradual incrementaron las capacidades de ancho de banda pero las limitaciones de distancia eran las mismas. Los desarrollos más recientes incluyen el desarrollo de Asahi Chemical con una fibra de índice gradual de PMMA perfluorinado, ésta tiene menores pérdidas que el PMMA de 10-50 dB/km y una ventana de 650 nm a 1300 nm. La limitación de temperatura de estas fibras es de 105°C, cuando los fabricantes de automóviles quisieran tener limitaciones de 125°. Los últimos desarrollos de estas fibras son en fibras microestructuradas por la universidad de Sydney con potencial para transmisión de datos y sensado.

**Fuentes ópticas.** Las fuentes tradicionales para SI-POF han sido LEDs, los cuales están limitados a una velocidad de 50-100 Mbps. Usando esquemas de modulación avanzados la velocidad de los LEDs se ha incrementado a 1 Gbps. Un LED más avanzado de cavidad resonante (RCLED) se ha desarrollado con velocidades de hasta 400 Mbps. Los láseres de cavidad vertical (VCSELs) se han desarrollado para trabajar en el rango de la luz visible, estos desarrollos deberían permitir tasas de datos mayores a 1 Gbps.

**Conectores Ópticos.** Varios conectores han sido desarrollados principalmente para aplicaciones para los consumidores y también en aplicaciones de control industrial, estos son los Molex SMI y los de HP (ahora Avago Technologies). Debido al gran diámetro de las fibras POF diversos fabricantes han desarrollado componentes como transceptores y conversores que no requieren un conector.

**Esquemas de modulación.** Se han reportado diversos esquemas de modulación para incrementar la velocidad de los enlaces POF. Estos esquemas toman ventajas de la tecnología desarrollada para la industria RF de tecnología celular móvil y por lo tanto son de bajo costo.

Algunos desarrollos importantes en transmisión de datos, conectores, fuentes, etc. en los años 2008-2009 son: 100Gbps sobre 100m de GI-POF (OFDM), 40Gbps sobre 100m de PF GI-POF a 1550nm, 30Gbps sobre 500m a 28Gbps sobre 1km de MMF usando VCSELs a 950nm, 10.7Gbps sobre 220m PF GI-POF, 1Gbps sobre 50m con fibra de 1mm SI-POF usando LEDs, 1.5Gbps sobre 50m con fibra de 1mm SI-POF usando VCSELs, POF sin conectores, transceptores fast ethernet usando tecnología MOST, variedad de esquemas de modulación: 10Mbps sobre 400m con una fibra de 1mm SI-POF (4-PAM, 8-PAM), 100Mbps sobre 200m con fibra de 1mm SI-POF (4-PAM, 8-PAM) y 1Gbps sobre 100m con fibra de 1mm SI-POF (formatos de modulación cuadráticos como [QPSK, QAM-X]).

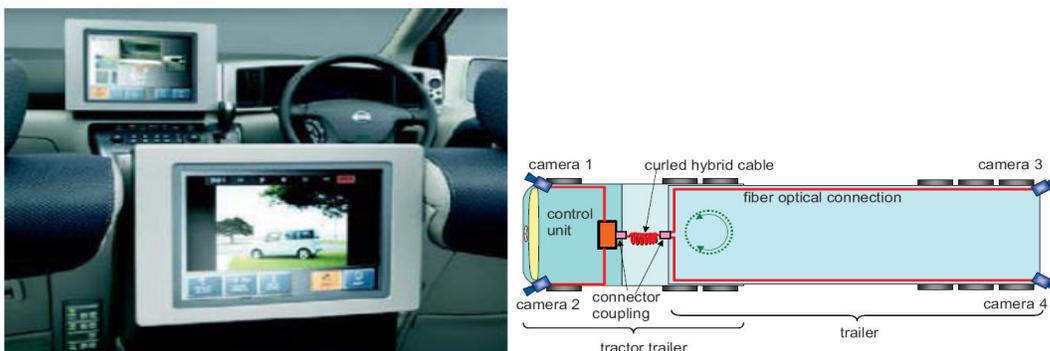


Figura 2.3. Redes de datos en automóviles.

La POF es una alternativa única para poder tener disponible los servicios de Triple Play en todas las habitaciones de una casa, es muy fácil de instalar por vías existentes posterior a la construcción de la vivienda ya que la fibra no es conductora de electricidad y puede ser introducida en conductos eléctricos sin ningún peligro. Es puramente una transmisión óptica.

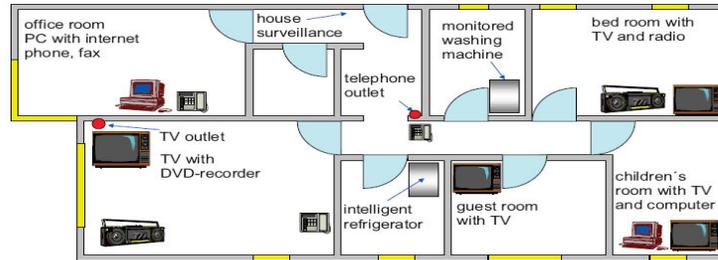


Figura 2.4. Triple Play en casa.

## 2.3. Sensores ópticos

### 2.3.1. Categorías de los sensores ópticos

Hay cuatro principales clases de sensores ópticos: intensidad, fase, polarización y sensores de frecuencia. La clasificación de los sensores en cada tipo, diferencia significativamente su desempeño y costo, el cual casi siempre está relacionado a la complejidad del principio de medición empleado.

Entre los cuatro tipos de sensores que mencionamos, el tipo de intensidad (amplitud) es el más simple de implementar debido a la facilidad de la medición de la intensidad, en contraste con las mediciones de fase y polarización. También los sensores ópticos basados en la medición de intensidad son compatibles con POFs, por consiguiente, los sensores de intensidad óptica son los candidatos más prometedores para muchas aplicaciones y para las aplicaciones automotrices en particular. Los sensores del tipo intensidad están basados en muchos principios. Uno de ellos es la refractometría óptica, la cual se basa en la determinación del índice de refracción de las sustancias,  $n$ . El índice de refracción  $n$  está relacionado con muchas características cuantitativas de las sustancias. En el caso de líquidos estas características cuantitativas como la temperatura, presión, la concentración de sustancias solubles (como ejemplo, sal, azúcar, etc.) pueden ser obtenidas indirectamente midiendo el índice de refracción. Además, la refractometría permite discriminar entre diferentes sustancias, debido a que cada sustancia o material tienen diferentes índices de refracción.

Para medir el índice de refracción de las sustancias, generalmente líquidos, se usa un refractómetro. La mayoría de los refractómetros se basan en el efecto del ángulo crítico, que define el punto de equilibrio, el punto de sombra o límite, entre la refracción y el reflejo interno total de la luz en una interfaz.

Cuando la composición de una sustancia cambia, también lo hace su índice de refracción. Así pues, una medida del índice de refracción puede dar información sobre la composición de una sustancia. Por ejemplo, cuando una sustancia se disuelve en un líquido, el índice de refracción aumenta. Así, para determinar la concentración de la solución, puede emplearse una medida del índice de refracción de una solución de azúcar en agua.

Anteriormente, académicos de la UNAM desarrollaron un sensor refractométrico de fibras ópticas con un elemento transductor de una forma semiesférica de vidrio. Este sensor tiene la ventaja de que está constituido con transductores de tamaño pequeño los cuales son usados como detectores puntuales de líquidos, estos transductores tienen una sensibilidad que puede discriminar entre nitrógeno líquido y gas o aire, los transductores trabajan inclusive si tienen una pequeña capa residual en su superficie. Un arreglo vertical de los transductores de este tipo fue utilizado en un sensor refractométrico para detectar el nivel de nitrógeno líquido (figura 2.5) [5]. Sin embargo, este sensor tiene algunas desventajas importantes, tales como la complejidad y dificultad de su fabricación y un rango relativamente grande de variación de las características de los sensores (por pequeñas variaciones de su forma geométrica); esto dificulta su uso en los arreglos de muchos elementos.

Por otro lado, este tipo de sensor no fue implementado en materiales plásticos y el potencial de este tipo de sensor en el caso de su fabricación de plásticos es desconocido.

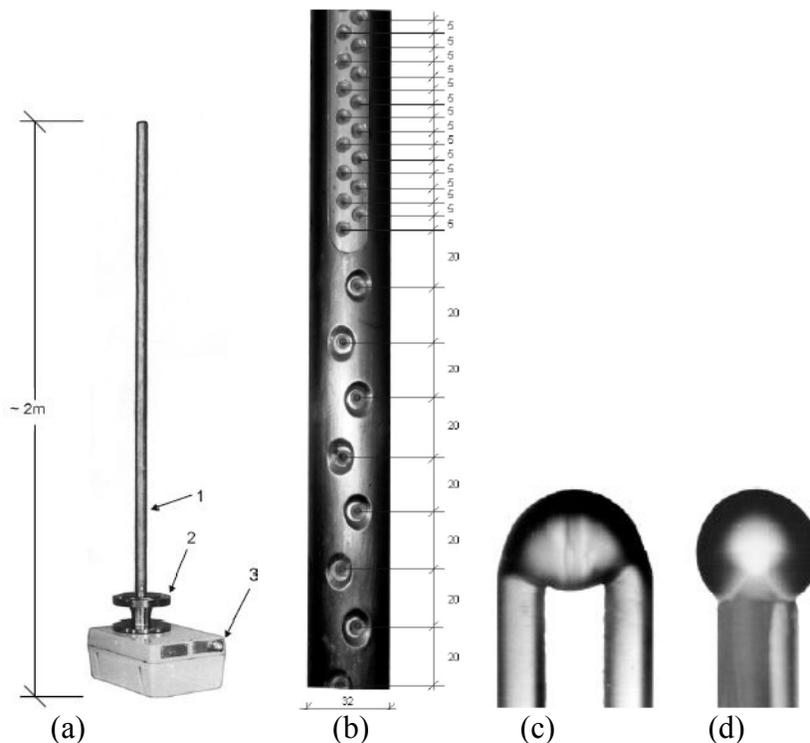


Figura 2.5 a). Prototipo de sensor para medir el nivel de líquidos (nitrógeno líquido). b) Parte central de sensor tubular mostrando las regiones con diferentes incrementos entre los transductores de fibra óptica. c) Vista frontal de transductor refractométrico para nitrógeno líquido d) Vista lateral de transductor refractométrico para nitrógeno líquido.

### 2.3.2. Avance en los sensores ópticos de plástico

En la bibliografía están descritos algunos sensores ópticos que utilizan fibras ópticas plásticas, incluyendo algunos que utilizan estrés y deformación mecánica, algunas de sus aplicaciones son medición de temperatura, humedad y presencia de ozono entre otros. Los sensores de fibras ópticas plásticas han incrementado sus desarrollos, siendo la industria

automotriz el mayor consumidor de los mismos, ejemplos de los mismos son sistemas de protección al peatón, reconocimiento de ocupación de asientos, sensores en tanque de gasolina, entre otros.

En muchas aplicaciones de sensores los puntos a sensor y los elementos electrónicos están relativamente cercanos por lo cual las POFs son el candidato ideal para transmitir la información, además de que tiene las ventajas de bajo costo, gran flexibilidad y fácil procesamiento. El uso de POF en la tecnología de sensores ópticos puede ser dividido en diferentes áreas.

1. Se utiliza un sensor eléctrico en el punto a medir y se transmite la información vía POF.
2. La POF transmite y recibe luz. El principio de medición se basa en el cambio en la transmisión entre la fibra transmisora y la receptora.
3. La fibra por si misma sirve como un elemento de sensado y de transporte.
4. Los cambios en el final de la fibra o en la superficie de la misma sirven como elemento de sensado, esto puede ser haciendo diversos hoyos en el revestimiento o recubrimiento el cual reacciona a diferentes materiales químicos, en este caso se miden los cambios en la transmisión para ciertas longitudes de onda.

Sin embargo, en comparación con los sensores basados en las fibras ópticas convencionales de sílice, los desarrollos de los sensores ópticos de plástico son muy escasos.

#### **2.4. Métodos de análisis de las características de las fibras ópticas y sensores ópticos**

*Enfoques convencionales.*

*Óptica geométrica.* La óptica geométrica permite el análisis de las estructuras grandes al respecto de la longitud de onda de operación mediante el trazado de rayos. En óptica existen un gran número de fenómenos que pueden estudiarse sin hacer ninguna hipótesis acerca de la naturaleza de la luz. Tomando la base experimental como fundamento, se pueden enunciar tres principios que permiten desarrollar este estudio de forma geométrica, estos principios son:

1. Propagación rectilínea de la luz en un medio homogéneo e isótropo.
2. Independencia de los rayos.
3. Principio de Fermat.

Puesto que estamos interesados en la propagación de la luz, usaremos la imagen ondulatoria. Para ello, es preciso definir el frente de onda como el lugar geométrico de los puntos del espacio que se encuentran en igual fase. Cuando la fuente luminosa es puntual, los frentes son superficies esféricas centradas en la fuente. A grandes distancias de la fuente, los frentes de onda se pueden considerar como planos. A veces es útil utilizar el concepto de rayo luminoso. En una teoría corpuscular, un rayo sería la trayectoria de un fotón. Desde el punto de vista ondulatorio, un rayo es una línea imaginaria en la dirección de propagación de las ondas. Desde el punto de vista de la teoría electromagnética, un rayo

sería la dirección y el sentido del vector de Poynting. En un medio homogéneo e isótropo, los rayos son líneas rectas perpendiculares a los frentes de onda; en la superficie de separación de dos medios, la dirección del rayo puede cambiar, pero se conserva recta en cada medio.

*Diferencia finita y elementos finitos.* Discretizan en el dominio computacional. Los métodos de diferencia finita reemplazan todos los operadores diferenciales con diferencias aproximadas discretas, mientras que los métodos de elemento finito dividen el dominio en subregiones que son suficientemente pequeñas de manera que las propiedades son uniformes dentro de cada elemento, entonces las ecuaciones de Maxwell son aplicadas a cada elemento con condiciones de continuidad aplicadas a cada frontera.

*Métodos de expansión.* Utiliza el enfoque de descomposición de la onda plana, esta técnica expresa las ecuaciones de Maxwell como una superposición de funciones conocidas, este método es más apropiado para estructuras periódicas aunque puede ser usado para estructuras arbitrarias.

*Método de propagación de rayos.* Simula la propagación a lo largo de guías de onda y sus elementos. La estructura es dividida en delgadas capas discretas transversales a la dirección de propagación, entonces los efectos de difracción y refracción son considerados.

*Diferencia finita en el dominio del tiempo.* Mientras que los métodos anteriores calculan las propiedades de la fibra en algunas longitudes de onda fijas, este método discretiza el tiempo con ayuda de las ecuaciones de Maxwell. Este método es principalmente utilizado para simular propagación de pulsos y problemas en los cuales interviene la reflexión.

#### *Enfoques no-convencionales*

*Método multipolo.* Este método está basado en la idea en que cuando el campo en la vecindad de un objeto de dispersión es separado en dos partes, una parte se propaga hacia el exterior y la otra hacia el interior en el origen de la dispersión. Computacionalmente este puede ser un método extremadamente eficiente y analíticamente riguroso, sus desventajas es que es adecuado para hoyos circulares y requiere mucha intervención humana.

*Método de condiciones ajustables de la frontera.* Este método está basado en la idea de hacer iteraciones de estimaciones más precisas del índice efectivo. Este método comienza por escoger un radio  $R$  en el cual todas las estructuras están localizadas dentro y se considera un único revestimiento uniforme.

#### *Limitaciones de los métodos existentes*

Los métodos mencionados y los respectivos algoritmos de cálculo consideran propiedades de las fibras ideales, las cuales no presentan cambios en la dirección de propagación, sin embargo las fibras reales tienen imperfecciones como impurezas, superficies ásperas o bordes microscópicos. Son escasos los trabajos que toman en cuenta la asimetría y defectos

de las fibras ópticas y evalúen el rol de estos efectos sobre las características de propagación de la luz en fibras ópticas y estructuras sensoras [6].

## 2.5. Conclusiones

Los avances en los desarrollos de fibras ópticas plásticas, han creado un gran desarrollo y crecimiento en muy diversas aplicaciones y componentes a muy bajo costo, por estas razones la investigación de sensores basados en fibras ópticas plásticas es un tema de interés.

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de un sensor refractométrico basado en fibras ópticas con un elemento de detección semicilíndrico plástico. Anteriormente se han realizado investigaciones sobre elementos transductores semiesféricos y algunas otras superficies de segundo orden, pero aún se desconoce sobre el comportamiento de un elemento transductor semicilíndrico por lo que se pretende realizar una investigación más detallada sobre la propagación de la luz en este tipo de forma específica.

## 2.6. Referencias

- [1] Jiangxi Dasheng Plastic Optical Fiber Co., Ltd. “Using POF to illuminate and decorate the world,” 2008. [Online]. Available: [http://www.dspof.com/New\\_Info\\_Issuance.asp?/330.html](http://www.dspof.com/New_Info_Issuance.asp?/330.html).
- [2] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, and W. Daum, *POF Handbook Optical Short Range Transmission Systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [3] P. Polishuk, “POF Markets and Applications a Worldwide View”, in *The 18<sup>th</sup> International Conference in Plastic Optical Fiber*, 2009.
- [4] Emac®, “Manual Técnico de Perfiles”, 2009. [Online]. Available: [www.emac.es](http://www.emac.es)
- [5] K. E. Romo-Medrano and S. N. Khotiaintsev, “An optical-fiber refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen,” *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 998–1004, May 2006.
- [6] M. Large, L. Poladian, G. Barton, and M.A. Eijkelenborg. *Microstructured Polymer Optical Fibres*, Springer, 2008.
- [7] F. Breyer, J. Lee, S. Randel, and N. Hanik, “Comparison of OOK- and PAM-4 Modulation for 10 Gbit/s Transmission over up to 300 m Polymer Optical Fiber”, in *Optical Fiber Communications/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008*. pp. 1–3.

### 3. DISEÑO CONCEPTUAL DE UN NUEVO TIPO DE SENSOR ÓPTICO REFRACTOMÉTRICO DE PLÁSTICO Y ANÁLISIS DE SUS CARACTERÍSTICAS

#### 3.1. Propuesta de un nuevo sensor refractométrico de geometría semi-cilíndrica

El nuevo sensor consiste de un elemento óptico de detección semicilíndrico el cual está conectado a un par de fibras ópticas como se muestra en la figura 3.1. El elemento de detección óptico está hecho de un material transparente dieléctrico plástico, polimetil metacrilato (PMMA).

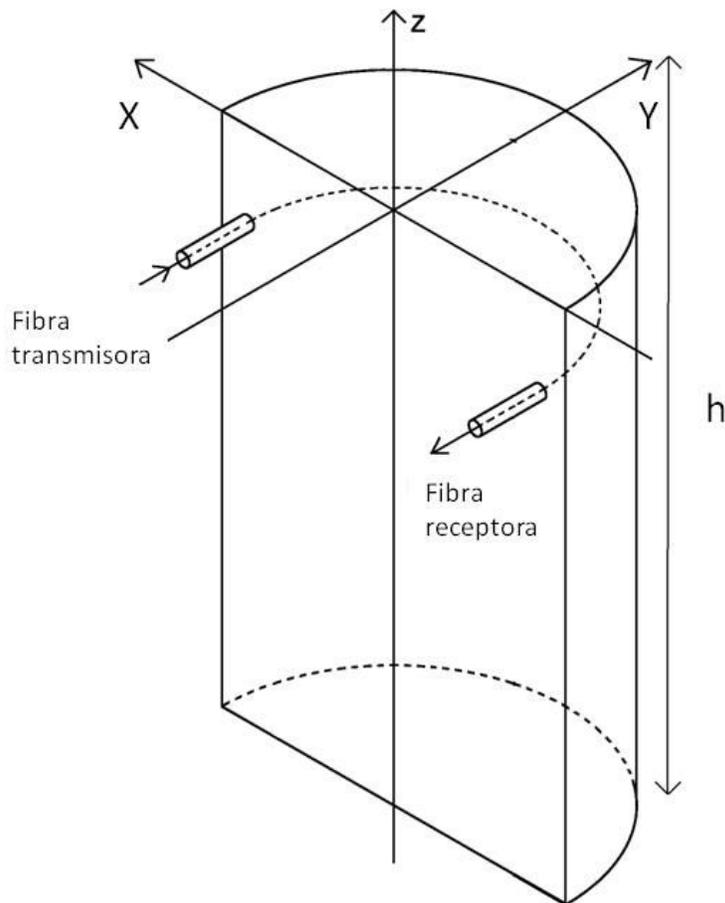


Figura 3.1. Sensor refractométrico con elemento transductor semicilíndrico.

El principio de operación del sensor consiste en lo siguiente. La luz de una fuente remota (LED no mostrado en la figuras 3.1 y 3.2) es acoplada vía la fibra de entrada, figura 3.2 (2) al interior del elemento de detección (1). La luz se propaga por medio de reflexiones totales internas hasta que llega al plano de salida del elemento de detección. En este plano una parte de la luz es acoplada al núcleo de la fibra de salida (3) y llega a través de esa fibra a un fotómetro remoto (no mostrado en las figuras 3.1 y 3.2).

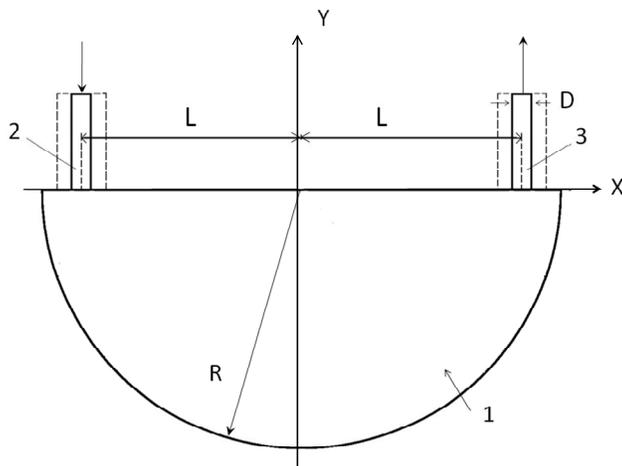


Figura 3.2. Sensor refractométrico (vista aérea). 1 - Elemento semicilíndrico de dieléctrico transparente; 2, 3 - fibra óptica de entrada y salida, respectivamente.

Cuando el elemento está en el aire la reflexión es un poco más potente (bajo cierta posición relativa de las fibras en el elemento de detección), cuando el elemento está inmerso en un líquido la reflexión en la superficie del cilindro disminuye o se desvanece por completo debido a una menor diferencia en los índices de refracción en los dos medios.

En este sensor óptico la señal de salida que se registra es la magnitud de la corriente del fotodetector, de acuerdo a lo anterior la función de transmisión se representa por medio de la proporción entre la corriente del fotodetector y la influencia del medio exterior.

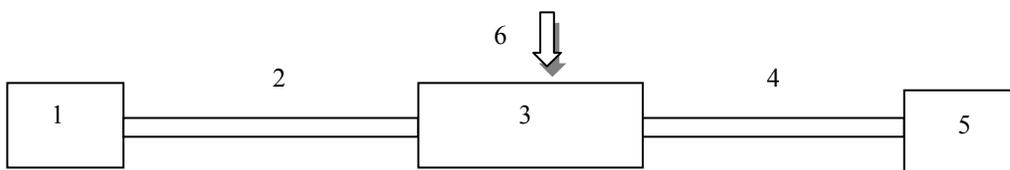


Figura 3.3. Esquema del sensor: 1 - Fuente óptica, 2 - Fibra óptica de transmisión, 3 - Elemento de sensibilidad, 4 - Fibra óptica receptora, 5 - Fotodetector, 6 - Influencia del índice de refracción externo sobre la transmisión óptica de elemento de sensibilidad.

De acuerdo al esquema del sensor (figura 3.3) en forma de un diagrama de bloques. La función de transferencia dependerá entonces de la transmisión óptica en la fuente, el coeficiente de transmisión en la fibra óptica transmisora, el coeficiente de transmisión en el elemento de sensibilidad, el coeficiente de transmisión en la fibra óptica receptora hasta el fotodetector, pero si consideramos que la potencia de la fuente óptica es estable, la característica de fotocorriente del fotodetector en todo su intervalo de trabajo en la entrada sea lineal y la corriente del fotodetector sea proporcional al coeficiente de transmisión de la vía óptica, adicional a esto si consideramos que los coeficientes de transmisión de la fibra óptica transmisora y receptora son constantes, entonces el coeficiente de transmisión de la

vía óptica se puede determinar cómo función únicamente de la vía externa por el coeficiente de transmisión en el elemento de sensibilidad.

Por consiguiente la transmisión óptica en el elemento de detección es  $T=I_{out}/I_{in}$ , donde  $I_{out}$  e  $I_{in}$  son la intensidad de la luz de salida y entrada respectivamente, las cuales son una medida del índice de refracción externo,  $n$ .

La transmisión óptica  $T$  es una función de los parámetros ópticos y geométricos del elemento de detección y las fibras ópticas.

En la práctica, es conveniente caracterizar el funcionamiento del sensor en términos de la transmisión relativa  $T^*= I_{out}(n)/I_{out\ air}$ , debido a que esta cantidad no incluye la intensidad de la luz de entrada  $I_{in}$  la cual no puede ser medida experimentalmente [1].

### 3.2. Diseño conceptual de un sensor de nivel de líquidos.

La diferencia en la transmisión óptica en el elemento de detección en el aire y en un líquido en particular,  $T$ , ó la transmisión relativa,  $T^*$ , sirve como discriminación entre los dos medios y es un fundamento para la medición de nivel de líquido con un arreglo vertical de estos sensores (en cuyo caso, la salida del sensor es interpretada de una manera binaria) como se muestra la Figura 3.4.

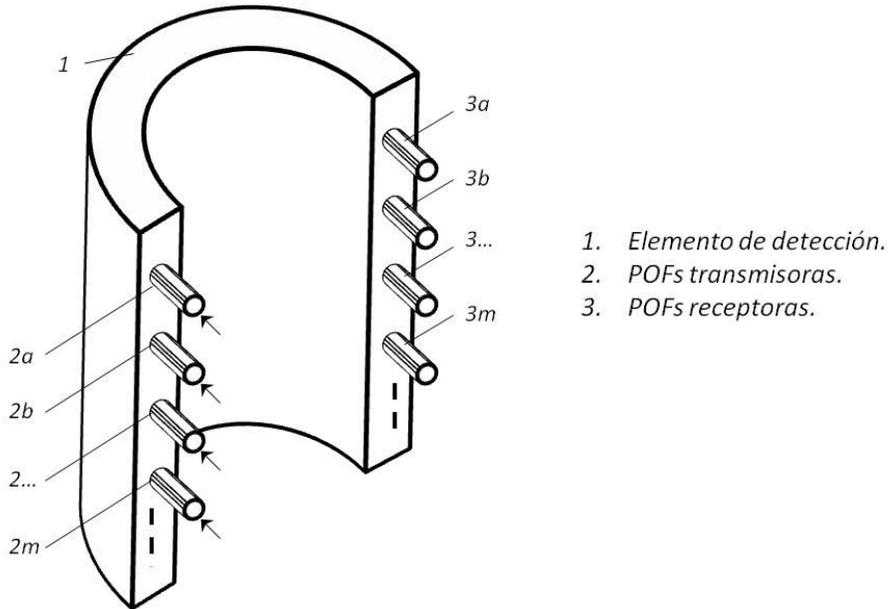


Figura 3.4. Diseño conceptual de un sensor de nivel de líquidos, de tipo discreto multipunto.

Para medir el nivel de líquido en un tanque de cualquier combustible, requeriríamos un arreglo vertical de transductores, para evitar utilizar muchos elementos de detección se propone utilizar un solo semicilindro que sea tan largo como el tanque de gasolina y poner

cierto número de fibras transmisoras y por cada fibra transmisora una receptora a lo largo del cilindro como se muestra la figura 3.4.

Cada par de fibras (transmisora y receptora) con un segmento respectivo del semicilindro constituyen un sensor refractométrico (transductor); cada fibra transmisora estará conectada a un LED y cada receptora a un fotodetector, de otra manera se podría pensar en poner un circuito conmutador que pueda enviar información cada cierto tiempo a las fibras transmisoras y otro circuito conmutador que pueda estar interrogando las fibras receptoras.

Se pondrán tantos pares de fibras como requiera la resolución de la medición de nivel en el tanque de gasolina.

### 3.3. Evaluación teórica de las propiedades refractométricas de un elemento óptico semicilíndrico utilizando la óptica geométrica

Para poder discriminar entre diferentes medios (gasolina-aire-agua o diesel-aire-agua) el sensor debe de detectar cambios en el índice de refracción externo desde  $n=1$  (aire) hasta  $n= 1.461$  (diesel) y viceversa. La máxima sensibilidad alcanzada por los sensores refractométricos de tipo intensidad al índice de refracción externo es alcanzada cuando el ángulo de incidencia de los rayos ópticos en la superficie de trabajo del elemento de detección  $\vartheta_i$  es mayor que el ángulo crítico para la interfase PMMA-aire  $\vartheta_{Caire}$  pero no excede el ángulo crítico para la interface PMMA-liquido  $\vartheta_{Cliquido}$ .

Utilizando la ley de Snell:

$$\begin{aligned} n_{PMMA} &= 1.4828, \text{ para } \lambda = 940 \text{ nm} \\ n_{aire} &= 1, \text{ para } \lambda = 940 \text{ nm} \\ n_{agua} &= 1.333, \text{ para } \lambda = 940 \text{ nm} \\ n_{gasolina} &= 1.442, \text{ para } \lambda = 940 \text{ nm} \\ n_{diesel} &= 1.461, \text{ para } \lambda = 940 \text{ nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_{Caire} &= \sin^{-1} \frac{1}{1.4828} = 42.4^\circ \\ \theta_{Cagua} &= \sin^{-1} \frac{1.333}{1.4828} = 64.02^\circ \\ \theta_{Cgasolina} &= \sin^{-1} \frac{1.442}{1.4828} = 76.52^\circ \\ \theta_{Cdiesel} &= \sin^{-1} \frac{1.461}{1.4828} = 80.16^\circ \end{aligned}$$

Considerando lo anterior tendríamos que para poder discriminar entre aire y agua el ángulo de incidencia tendría que estar en el rango de  $\theta_{Caire} < \theta_i < \theta_{Cagua}$  ( $42.4^\circ < \theta_i < 64^\circ$ ), mientras que si queremos discriminar entre aire y/o agua y gasolina se tiene que el ángulo de incidencia debe estar entre  $\theta_{Cagua} < \theta_i < \theta_{Cgasolina}$  ( $64^\circ < \theta_i < 76.5^\circ$ ) y para el caso del diesel tenemos:  $\theta_{Cagua} < \theta_i < \theta_{Cdiesel}$  ( $64^\circ < \theta_i < 80.16^\circ$ ).

### 3.4. Investigación teórica de las características refractométricas de un elemento óptico semicilíndrico mediante el método de trazado de rayos.

#### 3.4.1 Modelo matemático del elemento transductor

En vista de obtener una relación entre la transmisión óptica y los parámetros del sensor, se empleó un procedimiento iterativo con el propósito de encontrar la combinación de valores óptimos de los parámetros del sensor. Este procedimiento incluye el análisis de la transmisión del sensor contra el índice de refracción externo con constantes de materiales y geometría de los elementos como parámetros. En base a dicho análisis se seleccionan los valores óptimos para el diseño del sensor.

Para propósitos de análisis, todos los parámetros geométricos del sensor están relacionados al radio del elemento de detección  $R$ , se usaron las siguientes cantidades adimensionales para describir la geometría del sensor: el diámetro adimensional del núcleo de las fibras  $\Phi=D/R$ , la distancia adimensional de las fibras ópticas desde el plano de simetría del elemento  $A=L/R$ .

#### 3.4.2. Resultados del modelado matemático del elemento transductor

Se simuló la propagación de luz por medio de trazado de rayos, un algoritmo respectivo computacional y un programa de computación en Visual Basic descrito en [3]. El análisis fue realizado para rayos en el plano  $x$ - $y$  del elemento de detección. Los resultados obtenidos en el caso en que el medio externo es aire se muestra en la figura 3.5.

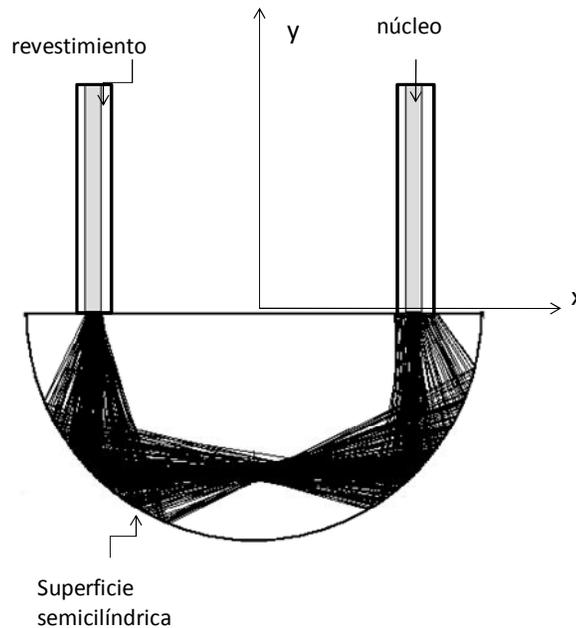


Figura 3.5. Simulación de trayectorias de rayos en el elemento transductor bajo  $\Phi=0.049$ ,  $\Lambda=0.7$ ,  $NA_{entrada}=NA_{salida}=0.5$

Con la simulación realizada anteriormente en el plano  $y$ - $z$  pudimos observar también que los rayos no se propagan en un plano, es decir no se concentran, sino que estos viajan a lo largo del eje  $z$  como se muestra en la figura 3.6:

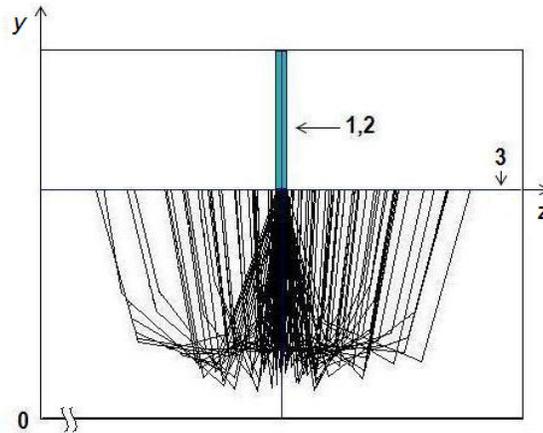


Figura 3.6 Simulación de trayectorias de rayos en el plano  $y$ - $z$ , bajo  $\Phi=0.049$ ,  $\Lambda=0.7$ ,  $NA_{entrada}=NA_{salida}=0.5$  (1) y (2) fibra transmisora y receptora POF respectivamente y (3) elemento de detección.

Al aumentar la distancia relativa como se muestra en la figura 3.7 podemos observar que el número de reflexiones en la superficie del elemento aumenta, por lo que la sensibilidad del sensor al medio externo también aumentará.

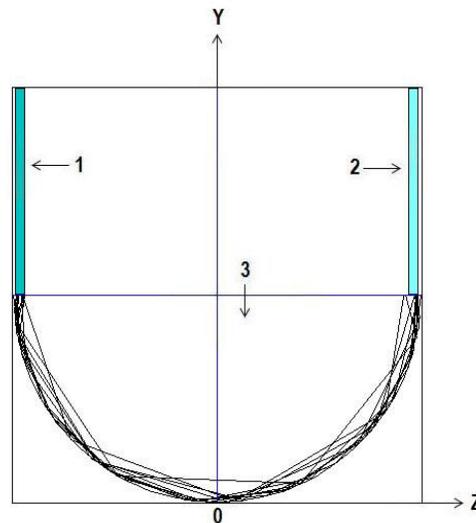


Figura 3.7. Simulación de trayectorias de rayos en el elemento transductor bajo  $\Phi=0.049$ ,  $\Lambda=0.965$ ,  $NA_{entrada}=NA_{salida}=0.5$ , (1) y (2) fibra transmisora y receptora POF respectivamente y (3) elemento de detección.

Con el análisis numérico mediante trazado de rayos se obtuvo también la transmisión óptica contra el índice de refracción externo bajo varias combinaciones de los parámetros: la geometría del sensor y las constantes del material.

Las gráficas de la transmisión relativa  $T^*$  contra el índice de refracción externo  $n$  obtenidas bajo la combinación casi-óptima de los parámetros del sensor para varias distancias adimensionales relativas  $\Lambda$  son mostradas en la figura 3.8.

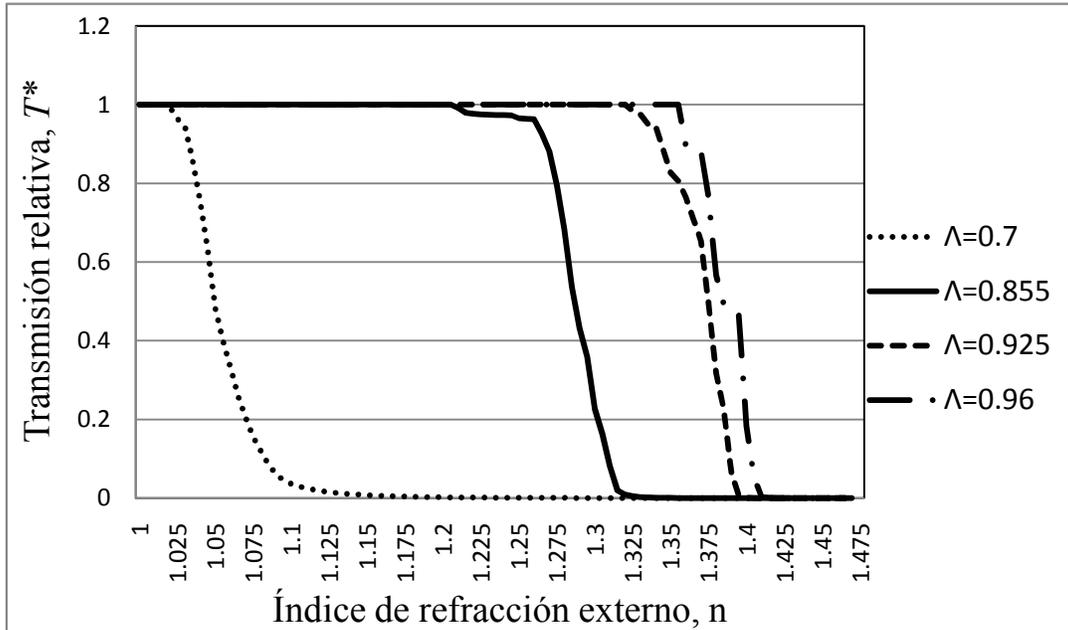


Figura 3.8. Transmisión relativa teórica  $T^*$  vs. índice de refracción externo,  $n$  bajo  $\Phi=0.049$ ,  $NA_{entrada}=NA_{salida}=0.5$

Los datos en la figura 3.8 muestran el efecto de la distancia relativa (adimensional) en la respuesta del sensor a diferentes índices de refracción externos.

El índice de refracción de la gasolina es alrededor de 1.442 y el del diesel es de 1.461 para una longitud de onda  $\lambda = 940$  nm. Para una confiable discriminación entre aire y gasolina o entre aire y diesel es la característica escalonada  $T^*$  entre  $n=1.3...1.4$  es apropiada. Por tanto, cualquiera de las tres distancias relativas  $\Lambda$  (0.86, 0.925, 0.95) pueden ser empleadas en el sensor, debido a que entregan una función de la transmisión relativa en el rango específico de índices de refracción externos  $n$ .

Un análisis similar se realizó para conocer si es factible utilizar en el sensor algunas otras fibras ópticas plásticas comerciales, las cuales son mostradas en la Tabla 3.1 [10], todas son fibras comercializadas por Mitsubishi, fabricadas con un núcleo de PMMA, con índice de refracción de 1.49. La única característica que cambia entre las mismas es el diámetro del núcleo. El fabricante las recomienda para el uso de sensado de temperatura, velocidad, niveles de líquidos y posicionamiento.

Tabla 3.1. Características de algunas POFs comerciales

Modelo	Perfil	NA	Diámetro del núcleo [μm]	Diámetro adimensional Φ
SK10	SI	0.5	240	0.012
SK30	SI	0.5	735	0.03675
SK40	SI	0.5	980	0.049
SK60	SI	0.5	1470	0.0735

En la gráfica de la figura 3.9 se muestra la transmisión relativa  $T^*$  calculada contra el índice de refracción con un posicionamiento de las fibras a una distancia relativa  $\Lambda=0.925$  para las fibras mencionadas en la tabla 1. Realizando un análisis de esta gráfica se concluye que el modelo más adecuado para la fabricación del sensor es el SK10 ya que presenta una respuesta escalonada, mientras que el menos adecuado es el SK60.

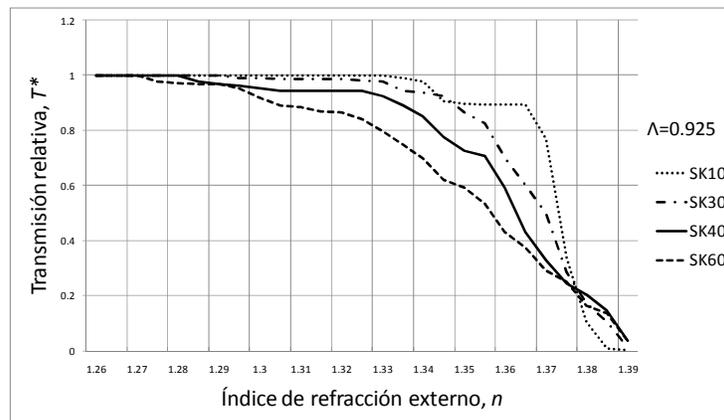


Figura 3.9. Transmisión relativa calculada  $T^*$  vs. Índice de refracción externo,  $n$  para algunas fibras POF comerciales de Tabla 3.1.

### 3.5. Conclusiones

El sensor refractométrico con elemento de detección óptico semicilíndrico puede discriminar entre diferentes medios externos, aunque esto dependerá de diferentes factores como el ángulo de incidencia, la distancia relativa de las fibras y el tipo de fibras.

Los factores mencionados anteriormente permiten obtener características de transmisión relativa diferentes, al aumentar la distancia relativa obtenemos una respuesta plana.

### 3.6. Referencias

- [1] V. Svyryd, S. Khotiaintsev, and P. Swart, “Linear and steplike characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element,” *Optical Engineering*, vol. 42 no. 5, pp. 1383-1389, 2003.
- [2] V. Svyryd, S. Khotiaintsev, and P. Swart, “Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element,” *Optical Engineering*, vol. 41 no. 4, pp. 779-787, 2002.
- [3] K. Khotiaintsev, “Desarrollo de una aplicación de simulación numérica de sensores refractométricos en fibras ópticas,” Tesis para obtener el grado de licenciatura, Universidad Autónoma de Puebla, México, 2005.
- [4] S. Khotiaintsev, E. Llanito Caudillo, S. Pérez García, and J. Morales Farah, “Optical-fiber refractometric sensor with semi-cylindrical optical detection element for measuring the level of gasoline,” in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA 2009), IEEE*, pp. 468-473, September 2009.
- [5] S. Khotiaintsev, E. Llanito Caudillo, S. Pérez García, and J. Morales Farah “Discrete POF liquid-level sensor for measuring the level of gasoline and detecting water in automobile tanks”, in *The 18th International Conference on Plastic Optical Fibers*, 2009.
- [6] S. Khotiaintsev, y S. Pérez García, “Estudio de las fibras ópticas de plástico como medio de transmisión y como transductores de los sensores ópticos”, en *Primer Congreso Estudiantil del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (campo de conocimiento: Ingeniería Eléctrica)*, Ciudad Universitaria, México, 11 septiembre 2009.
- [7] S. Khotiaintsev, E. Llanito Caudillo, S. Pérez García, y J. Morales Farah “Sensor refractométrico de fibras ópticas con elemento de detección semicilíndrico plástico, para medir el nivel en un tanque de gasolina o diesel,” en *V Semana Nacional de Ingeniería Electrónica (SENIE 09)*, 2009, pp. 245-253.
- [8] S. Pérez García, A. Beltrán Hernández, y S. Khotiaintsev, “Características refractométricas de un elemento de detección óptico semicilíndrico plástico” en *VII encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia*, 2010.
- [9] S. Khotiaintsev, S. Pérez-García, A. Beltrán-Hernández, and E. Llanito-Caudillo, “Plastic optical fiber multipoint liquid-level sensor with single semi-cylindrical detection element” *2nd Workshop on speciality optical fibers and their applications*, “submitted for publication”
- [10] Mitsubishi International Corporation (MIC) “Plastic Fiber Optics & Cables - ESKA™”, 2009, [Online]. Available: <http://www.mitsubishicorp.com/us/en/bg/ps/fo.html>

## 4. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

### 4.1. Descripción de la instalación experimental

El diseño esquemático de la instalación experimental se muestra en la figura 4.1. La instalación consta principalmente de dos subsistemas: el mecánico y el óptico. Además, contempla un tercer subsistema de instrumentos de medición y equipo de cómputo.

El subsistema óptico está conformado por una fuente eléctrica de la señal modulante de entrada (1), la cual alimenta una fuente de radiación óptica (LED) (2). La radiación óptica que emite este LED se acopla a una fibra óptica plástica (fibra óptica transmisora o de entrada) (3), se transmite a través de esta fibra y se acopla a través del elemento transductor óptico semicilíndrico (6) hacia la fibra óptica de salida o receptora (7). Luego la radiación óptica que sale de la fibra receptora es convertida en una señal eléctrica por medio del foto detector (fotodiodo) (8). La forma de onda de la señal eléctrica que sale del foto detector se observa en la pantalla de un osciloscopio, se digitaliza y se almacena en la memoria de una computadora (no mostrada en la figura 4.1).

El subsistema mecánico consta de una base (mesa óptica) metálica sobre la cual se encuentran dos unidades de desplazamiento(4) en las cuales están montadas la fibra óptica transmisora y receptora, con la facilidad de desplazamiento respecto al elemento transductor. El LED y el elemento transductor óptico fueron montados en unidades montables para lentes y un pedestal (no mostrados en la figura).

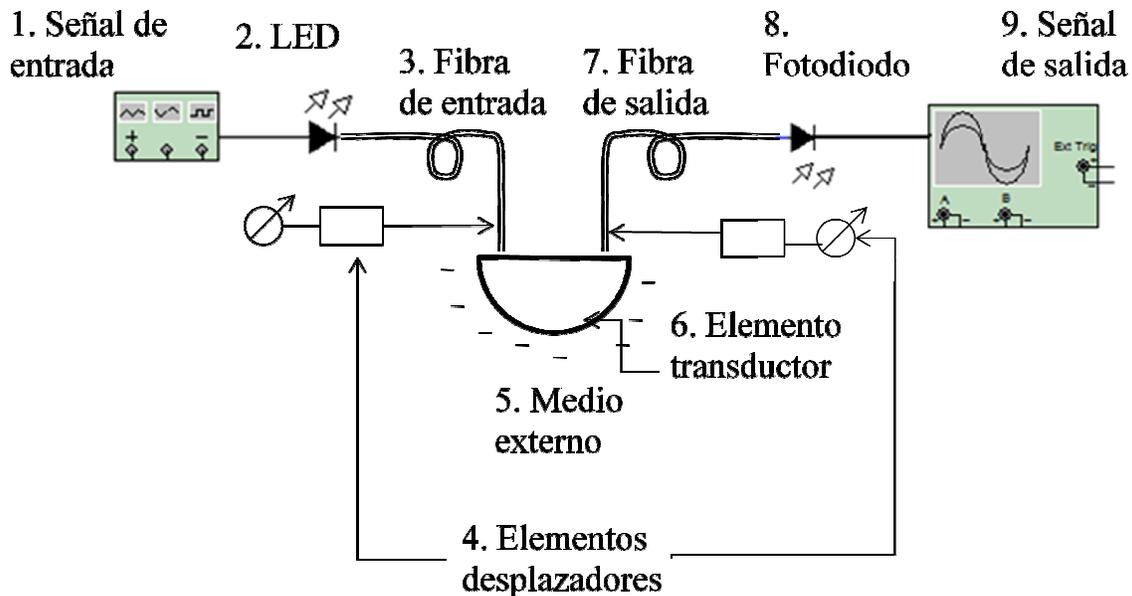


Figura 4.1. Diagrama esquemático del experimento.

## Elementos de subsistema óptico:

- **Fuente óptica**

Se utilizó como fuente de radiación óptica un LED infrarrojo de alta intensidad de radiación, con una salida espectral centrada en 940 nm. Este LED marca Everlight modelo IR333/H0/L10 (Tabla 4.1 y 4.2) está compuesto de heteroestructuras (HS) en un sustrato de GaAlAs. El diodo está encapsulado en una cubierta redonda de plástico transparente de 5 mm de diámetro.

Tabla 4.1 Especificaciones eléctricas de LED marca Everlight modelo IR333/H0/L10.

	Valores máximos
Voltaje inverso	5.0 V
Corriente de polarización DC	100 mA
Voltaje de polarización 20 mA	1.5V...1.7V
Corriente de pulso (pulso de 1 ms con ciclo de trabajo 10%)	100 mA
Temperatura de operación	-40...+85°C

Tabla 4.2. Especificaciones ópticas de LED marca Everlight modelo IR333/H0/L10.

	Valores típicos
Longitud de onda central	940 nm
Ancho espectral	45 nm
Ancho del haz (-3dB)	40°

El espectro de emisión que presenta el LED marca Everlight modelo IR333/H0/L10 se muestra en la figura 4.2.

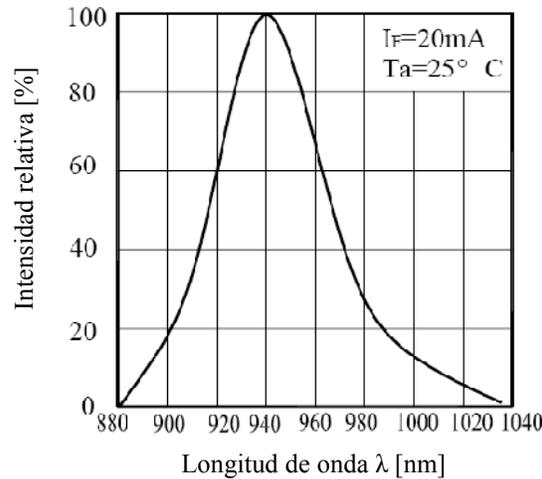


Figura 4.2 Espectro de emisión de LED marca Everlight modelo IR333/H0/L10.

El patrón de radiación LED marca Everlight modelo IR333/H0/L10 se presenta en la figura 4.3.

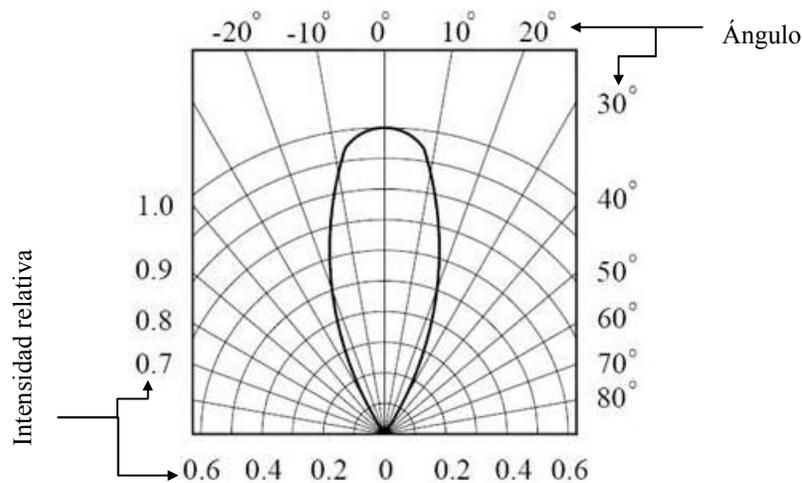


Figura 4.3 Patrón de radiación de LED marca Everlight modelo IR333/H0/L10.

El LED fue excitado por una onda de corriente triangular mediante un generador de señales marca Stanford Research Systems modelo DS345, dicha onda tuvo una amplitud de 14 mA a una frecuencia de 100 Hz; se escogió una onda triangular para identificar una posible saturación en el receptor óptico a la salida del sensor. El generador fue conectado en serie al LED y a una resistencia de 330  $\Omega$ , la fuente de luz fue acoplada a la fibra óptica de entrada.

- **Fotodetector**

Se utilizó un fotodiodo de la marca Thorlabs modelo FGA10, el cual es recomendado para medición de luz pulsada o fuentes de luz continua, este convierte la potencia óptica en corriente eléctrica. El fotodiodo produce una corriente la cual es función de la potencia y la longitud de onda de la luz incidente.

Tabla 4.3 Especificaciones de fotodiodo marca Thorlabs modelo FGA10.

Especificación	Valor
Rango de longitudes de onda	700...1800 nm
Área activa	$\varnothing$ 1.0 mm
Ancho de banda ( $R_L=50 \Omega$ , -3 dB, 5 V)	50 MHz
Capacitancia típica	80 pF a 0 V 40 pF a -5 V
Material y tipo de estructura	InGaAs, <i>p-i-n</i>
Voltaje máximo permitido inverso	5V
Temperatura de operación	-40...+75°C
Corriente inversa	1 mA
Corriente de polarización	10 mA

La responsividad de un fotodiodo es una medida de su sensibilidad a la luz y está definida como la razón entre la fotocorriente,  $I_p$  y la potencia de luz incidente,  $P$ , para una longitud dada, es decir es una medida de la efectividad de la conversión de la potencia de la luz en corriente eléctrica

$$R(\lambda) = \frac{I_p}{P}$$

La gráfica de la responsividad  $R$  vs. longitud de onda  $\lambda$  del fotodiodo marca Thorlabs modelo FGA10 se muestra en la siguiente figura, conjuntamente con las graficas de responsividad de algunos otros fotodiodos de la misma marca (Thorlabs).

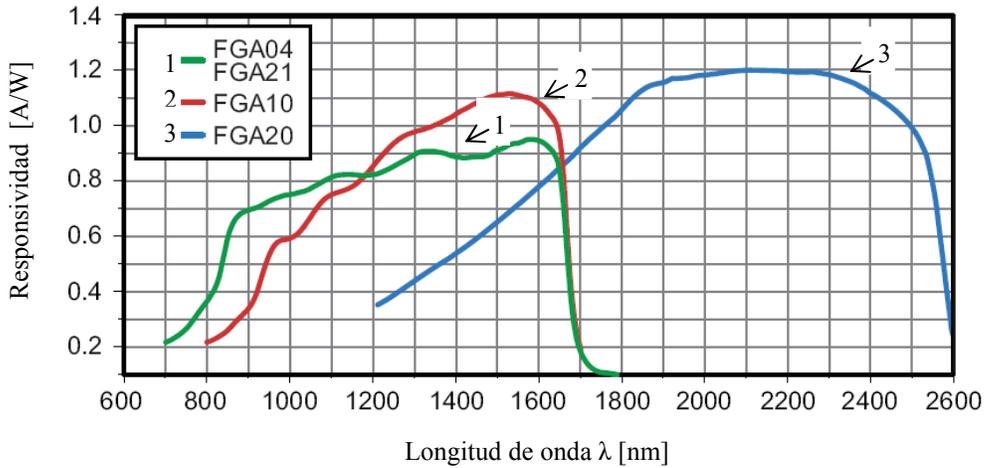


Figura 4.4. Responsividad ( $R$ ) vs. longitud de onda ( $\lambda$ ) para diferentes fotodiodos de la marca Thorlabs: (1) - FGA04 y FGA21, (2) - FGA10, (3) - FGA20.

El fotodetector se acopló a un amplificador de transimpedancia, el cual se conectó a un fotómetro. Los datos obtenidos de cada medición fueron guardados en una computadora vía una interfaz RS232 para después ser procesados.

- **Fibra óptica**

Para la realización del experimento se utilizaron 2 tramos de fibra óptica plástica de PMMA cada uno de 50 cm de largo modelo CD-1000-1 de la compañía Shenzhen Dasheng OptoElectronic Technology Co. Ltd, las características de las mismas se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Especificaciones de la fibra óptica plástica marca Shenzhen Dasheng OptoElectronic Technology modelo CD-1000-1.

Especificación	Valores
Atenuación (dB/m)	<0.2
Diámetro exterior (incluyendo capa protectora o recubrimiento) (mm)	2.2±0.07

Apertura numérica	0.5
Diámetro del núcleo (mm)	0.98
Rango de temperaturas (°C)	-50...+70° C

### ***Manejo y preparación de la fibra óptica***

Para poder montar las fibras en la instalación se cortaron con un equipo especial, figura 4.5(a), con el cual se puede cortar la fibra o quitar el recubrimiento; se corto una capa del recubrimiento o capa protectora y se colocó el conector. El conector utilizado es un conector V-Pin de Hewlett-Packard para fibras ópticas plásticas mostrado en la figura 4.5 (b).



Figura 4.5 (a) - Cortadora para POF; (b) - Conector para POF.

Posteriormente se corta nuevamente la fibra a quedar al ras del conector y posteriormente se pulieron manualmente cada uno de los extremos inicialmente con una lija. Posteriormente se utilizó un solvente que no opacara el material para dejar el extremo perfectamente pulido y así evitar reflexiones.

El solvente se eligió considerando el parámetro de solubilidad ( $\delta$ ) (dicho parámetro se define como la raíz cuadrada de la densidad de la energía cohesiva, (energía cohesiva: cantidad de energía requerida para vaporizar un centímetro cúbico de un líquido)); los parámetros de solubilidad de solventes y polímeros se pueden encontrar en literatura especializada, los materiales plásticos se disuelven mejor en un solvente donde sus parámetros de solubilidad sean lo más cercanos entre sí. Así pues el parámetro de solubilidad de PMMA es de 9.5; los solventes que tienen un factor de solubilidad cercano son: Tricloroetileno (9.4), Acetato de metilo (9.6) y Diclorometano (Cloruro de Metileno) (9.7).

El material utilizado para pulir las fibras fue el cloruro de metileno, este se colocó sobre una hoja de papel que se encontraba sobre una superficie plana y se procedió a frotar el extremo de la fibra ya montada en el conector hasta que se secase el cloruro, este procedimiento se repitió por 3 veces hasta obtener una superficie óptica.

- **Elemento transductor óptico semicilíndrico de plástico**

Para la fabricación del elemento se utilizó un tubo de acrílico fabricado por PLASTIMUNDO el cual es un tubo de acrílico cristal sin costura, fabricación “CAST”, el cual no presenta uniones y tiene una alta transparencia lo que permite que se utilice en nuestra aplicación. Las dimensiones del tubo se muestran en la figura 4.6.

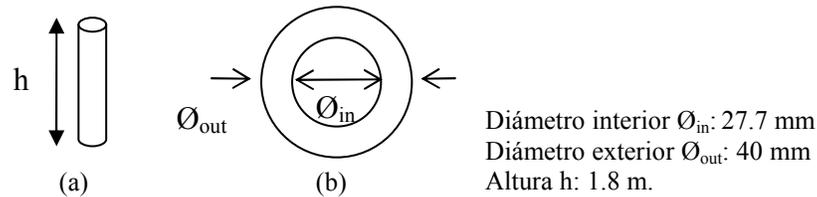


Figura 4.6 Tubo de acrílico: (a) Vista lateral; (b) Vista frontal.

### ***Fabricación del elemento transductor***

Inicialmente se corto con una sierra manual un tubo de 20 cm de altura, posteriormente se colocó el tubo en un soporte metálico con una ranura en el centro del tubo en el cual se insertó una sierra manual para cortar el tubo en dos partes iguales.

Posterior a los cortes se colocaron en una superficie plana lijas de agua de diferentes graduaciones para lijar el elemento plano del semicilindro y obtener una superficie óptica y evitar pérdidas por reflexión en la superficie plana. Se comenzó con lijas de graduaciones más grandes y se prosiguió con lijas de graduaciones más pequeñas.

### **Elementos de subsistema mecánico**

Todos los elementos que conforman el subsistema mecánico fueron montados en una mesa óptica para evitar el movimiento de cualquier parte de la instalación y facilitar la reproducción de la operación las veces que se requiriera. La figura 4.7 muestra la instalación completa experimental.

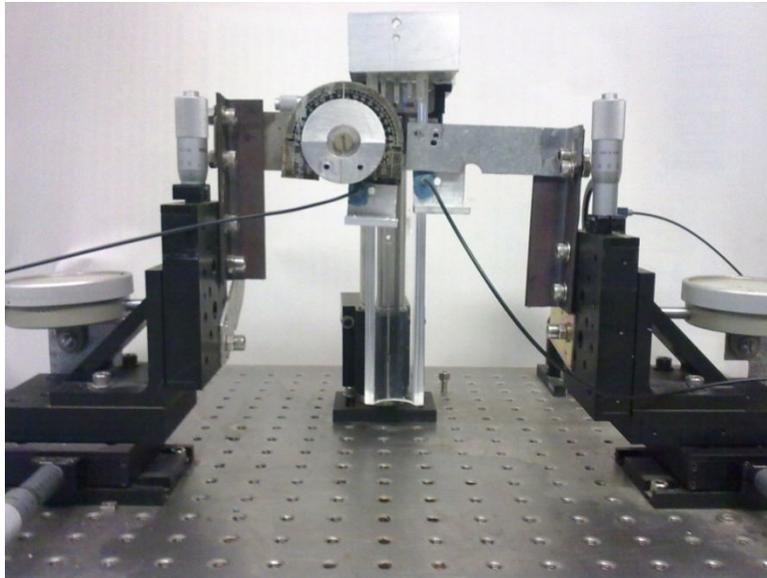


Figura 4.7 Instalación experimental (fotografía).

Las terminaciones de las fibras ópticas en contacto con el elemento transductor óptico fueron montadas en dos unidades de desplazamiento (marca ThorLabs, modelo PT3) sobre los ejes  $X$ - $Y$ - $Z$  de alta precisión las cuales permitieron el movimiento de las fibras relativo al plano de simetría del sensor. Estas unidades de desplazamiento permiten el movimiento de las fibras ópticas con una resolución de  $10\ \mu\text{m}$ . Una vez montadas las fibras ópticas en estas unidades fue posible controlar su posición con respecto a la superficie del elemento transductor de una forma semicilíndrica. El control de la posición en la dirección  $Z$  permite colocar las fibras a la misma altura, el control  $Y$  permite colocarlas en el plano ecuatorial del semicilindro y el control  $X$  hace posible modificar la posición relativa de las fibras  $\Lambda$ .



Figura 4.8 Unidad de desplazamiento de tres ejes marca Thorlabs modelo PT3.

El LED y uno de los conectores de la fibra transmisora se montaron sobre dos unidades montables ajustables para lentes marca Thorlabs modelo LH2 las cuales se pueden ajustar para sostener lentes de diámetros de  $19.6\ \text{mm}$  a  $57.9\ \text{mm}$ . Esto se realizó para poder alinear la fibra con el LED y evitar el movimiento de los mismos causando un desacoplamiento. Estas unidades montables se encuentra fijas sobre un poste marca Thorlabs modelo TR3 el cual está montado sobre un soporte tipo pedestal marca Thorlabs modelo PH1.5E ajustado a una base de montaje marca Thorlabs modelo BA1; todos los elementos están posicionados

de tal manera que el centro de emisión del LED apunta a la cara de la fibra óptica plástica como se muestra en la figura 4.9.

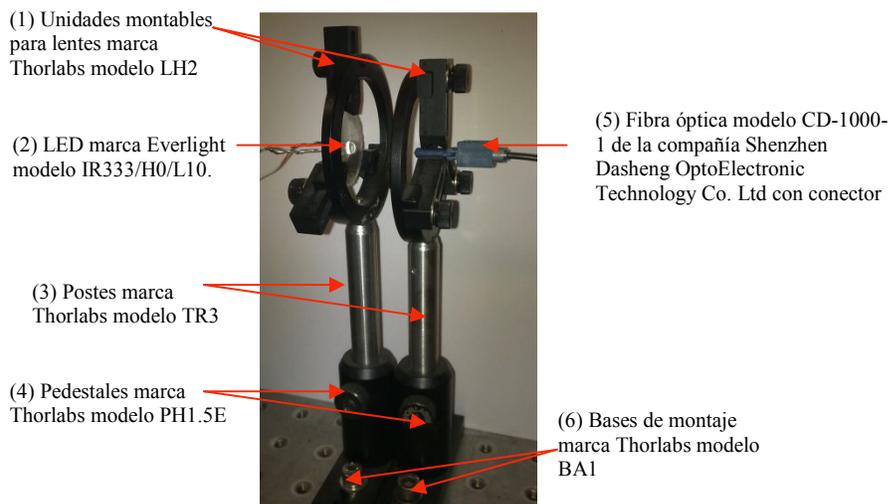


Figura 4.9 Sistema mecánico para acoplar la fuente de luz al extremo de la fibra óptica transmisora.

El elemento transductor óptico semicilíndrico fue atornillado a una placa metálica de manera que el plano del elemento es perpendicular al plano de dicha placa, esta placa a su vez se fija a un elemento de desplazamiento en el eje X marca Thorlabs modelo PT1 para ajustar (en caso de ser necesario) un correcto posicionamiento del elemento transductor óptico con respecto a las fibras ópticas. Este elemento de desplazamiento a su vez se fijó a una base cinemática marca Thorlabs modelo KB3X3 fija a un pedestal marca Thorlabs modelo RS4P para que este alcance la altura del elemento transductor. La figura 4.10 muestra el posicionamiento del elemento óptico en la instalación experimental.

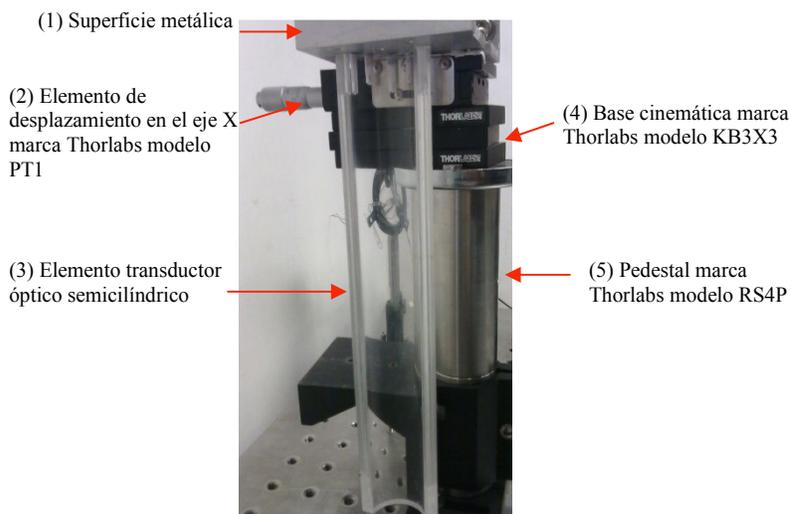


Figura 4.10 Sistema mecánico para el posicionamiento del elemento óptico.

## 4.2. Metodología de los estudios experimentales

Para realizar la investigación experimental del sensor refractométrico con elemento de detección semicilíndrico y hacer una comparación con los cálculos, se diseñó una instalación de laboratorio que permitió medir las características de transmisión del sensor refractométrico de tipo intensidad. Se realizaron una serie de experimentos los cuales se dividen en 4 partes; 1. caracterización del sensor en aire, 2. caracterización del sensor con agua, gasolina y diesel como medios externos, 3. medición del tamaño del haz en el eje vertical y 4. medición de nivel de líquidos.

## 4.3. Resultados del experimento

### 4.3.1. Características refractométricas del elemento transductor

- Experimento 1. Caracterización del sensor cuando el medio externo es el aire.

*Objetivo:* Obtener datos sobre el comportamiento del sensor cuando el medio externo es el aire. Calibrar el sensor en base a su comportamiento cuando el medio externo es aire. Obtener la transmisión óptica del sensor para poder compararla posteriormente con la transmisión cuando cambie el medio externo al sensor.

*Desarrollo Experimental:*

1. Se prepara la conexión mostrada en la figura 4.11 para la medición: el generador de señales genera una señal triangular de 100 Hz de 4 Vpp la cual alimenta al LED (se eligió la señal triangular con el fin de observar cualquier saturación de la señal en el osciloscopio).
2. Se limpian todos los conectores de fibra óptica existentes y la superficie del sensor con un trozo pequeño de algodón mojado en alcohol y se esperan un poco hasta que se evaporan los restos de alcohol. Se posicionan las fibras sobre el plano del elemento transductor óptico.
3. Se conectan el amplificador y el fotodiodo con la fuente de poder y estos a su vez con el osciloscopio.
4. El par de fibras ópticas se posicionan originalmente a la mínima distancia posible alrededor de  $\Lambda = 0.64$  ( $\Lambda=L/R$ ). Así, se incrementan la distancia de las fibras desde el plano de simetría del sensor discretamente con incrementos de  $\Lambda=0.01$  hasta el borde del elemento semicilíndrico ( $\Lambda = 0.99$ ). Para cada posición de las fibras la intensidad de la luz se mide a la salida del transductor. Enseguida la transmisión es procesada estadísticamente (se toma el promedio de los resultados de 10 mediciones individuales) y graficada.

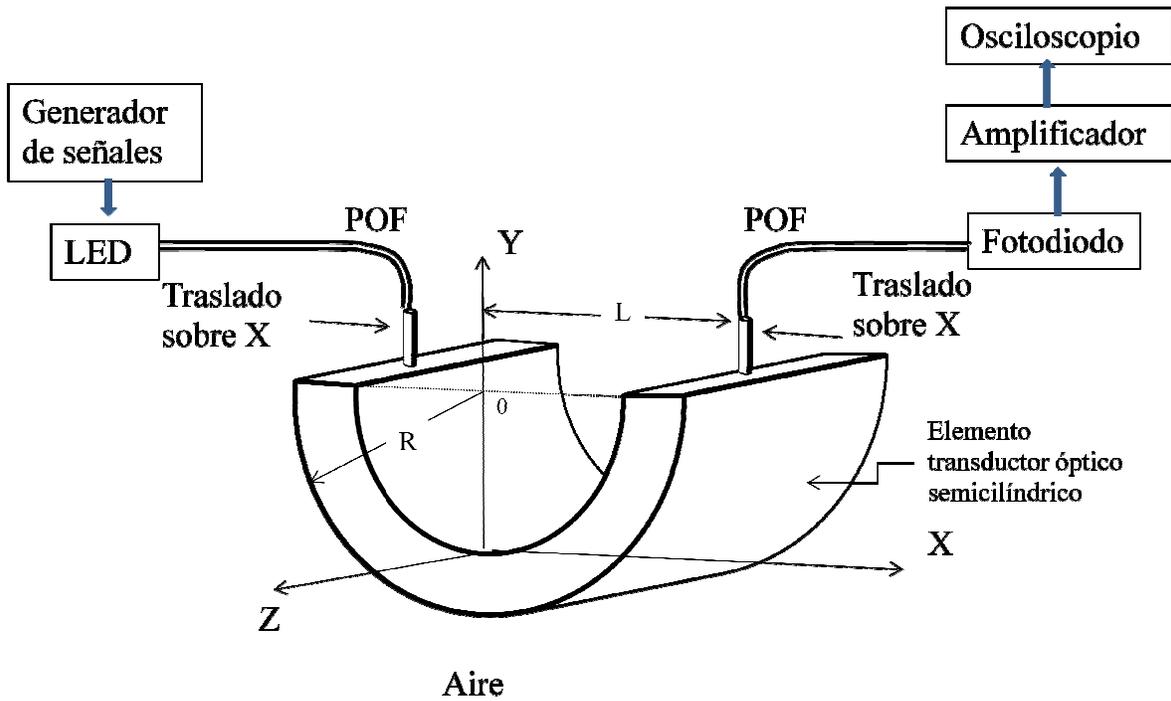


Figura 4.11 Esquema de conexiones utilizadas en el experimento 1.

Resultados:

Los datos experimentales de la transmisión del sensor en el aire contra la distancia relativa  $\Lambda$  se presentan en forma grafica en la figura 4.12.

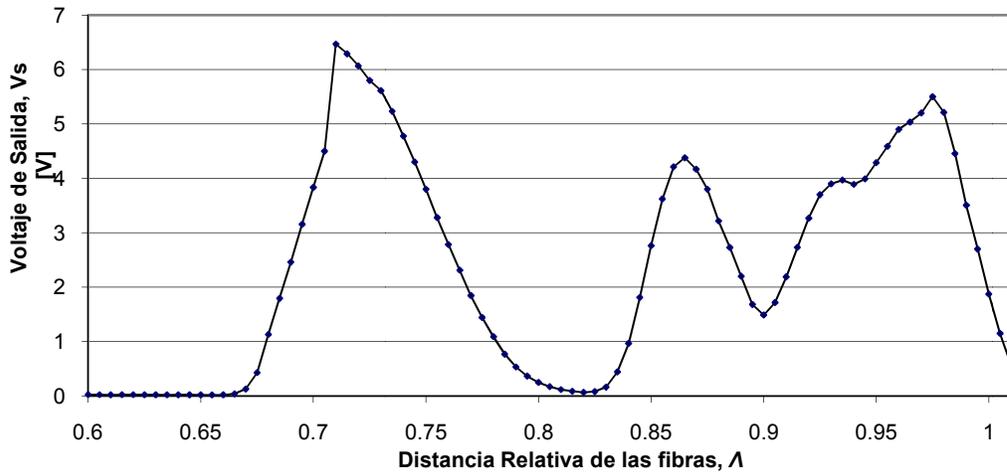


Figura 4.12 Voltaje de salida del sensor  $V_s$  al variar la posición relativa de las fibras  $\Lambda$  cuando el sensor está en el aire.

Las distancias adimensionales  $\Lambda$  las cuales corresponden a los picos observados en la transmisión óptica en el aire están dadas en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Picos de transmisión y respectiva distancia adimensional  $\Lambda$ .

Picos de transmisión	Distancia Adimensional, $\Lambda$
1 °	0.70
2 °	0.86
3 °	0.925
4 °	0.95
5 °	0.975

*Discusión y conclusiones:*

Los picos observados en la grafica son debidos al acoplamiento de las dos fibras ópticas por dos, tres, cuatro o más reflexiones secuenciales de la luz en la superficie del elemento de detección cilíndrico. Esto corresponde a algunas distancias discretas adimensionales  $\Lambda$ , mientras que para las distancias intermedias no existe ningún acoplamiento o es muy reducido.

- Experimento 2. Caracterización del sensor con agua, gasolina y diesel como medios externos.

*Objetivo:* Obtener datos sobre el comportamiento del sensor cuando el medio externo es agua, gasolina y diesel. Comprobar si hay diferencia en la transmisión con respecto al aire para que este funcione como un sensor de nivel.

*Desarrollo Experimental:*

1. Se prepara la conexión como en la figura 4.11.
2. Se limpian todos los conectores de fibra óptica existentes y la superficie del sensor con un trozo pequeño de algodón mojado en alcohol y esperar un poco hasta que se evaporen los restos de alcohol. Se posicionan las fibras sobre el plano del elemento transductor óptico.
3. Se conecta el amplificador y el fotodiodo con la fuente de poder y estos a su vez con el osciloscopio.
4. Se sumerge el elemento transductor óptico en agua.
5. El par de fibras ópticas son posicionadas originalmente a la mínima distancia posible alrededor de  $\Lambda= 0.64$  ( $\Lambda=L/R$ ). Así, se incrementa la distancia de las fibras desde el plano de simetría del sensor discretamente con incrementos de  $\Lambda=0.01$

hasta el borde del elemento semicilíndrico ( $\lambda = 0.99$ ). Para cada posición de las fibras la intensidad de la luz se mide a la salida del transductor.

6. Se calcula la transmisión relativa (se puede referir la transmisión obtenida para algún medio a la transmisión en el aire), se procesa estadísticamente (promediar los resultados de 10 mediciones individuales) y graficar.
7. Repetir los mismos pasos del 1 al 6 pero en el caso del paso 4 se sumergir el sensor en gasolina y nuevamente se repetir los pasos sumergir al sensor en diesel.

*Resultados:*

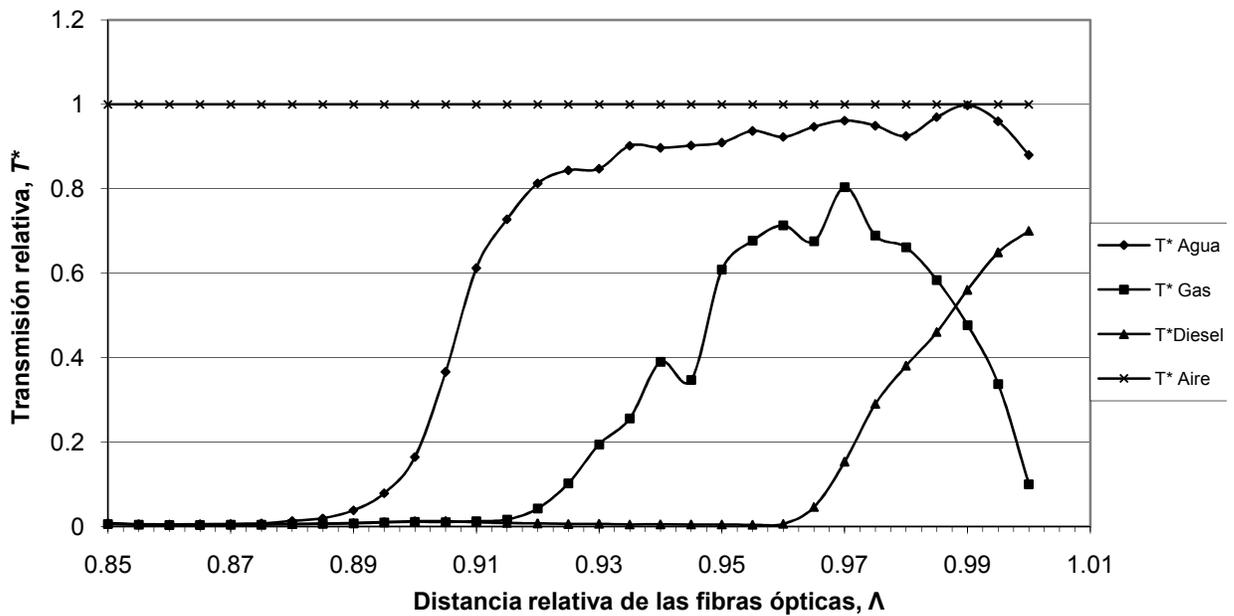


Figura 4.13 Transmisión relativa  $T^*$  del sensor contra distancia relativa de las fibras ópticas  $\lambda$  con aire, agua, gasolina y diesel como medio externo.

*Discusión y conclusiones:*

La transmisión en líquidos es siempre menor que la transmisión en el aire, debido a la reflectividad de la superficie del sensor cuando está inmerso en un medio más denso ópticamente. Como se puede observar en la figura 4.13 hay una diferencia en la transmisión entre los líquidos y el aire, por lo tanto el sensor sirve para la medición de nivel de líquidos.

- Experimento 3. Medición del tamaño del haz.

*Objetivo:* Obtener datos sobre el comportamiento en el plano y-z del sensor cuando el medio externo es aire.

*Desarrollo Experimental:*

5. Se prepara la conexión mostrada en la figura 4.14 para la medición: el generador de señales genera una señal triangular de 100 Hz de 4 V<sub>pp</sub> la cual alimenta al LED (se eligió la señal triangular con el fin de observar cualquier saturación de la señal en el osciloscopio).
6. Se limpian todos los conectores de fibra óptica existentes y la superficie del sensor con un trozo pequeño de algodón mojado en alcohol y se esperan un poco hasta que se evaporan los restos de alcohol. Se posicionan las fibras sobre el plano del elemento transductor óptico.
7. Se conectan el amplificador y el fotodiodo con la fuente de poder y estos a su vez con el osciloscopio.
8. El par de fibras ópticas se posicionan originalmente a una distancia relativa de  $\Lambda = 0.7$  ( $\Lambda=L/R$ ). Así, se incrementa la distancia sobre el eje z de la fibra óptica receptora desde el plano de simetría del sensor discretamente con incrementos de  $\Gamma=L_2/R=0.01$  hasta que la intensidad de la señal sea menor que el 10% de la intensidad máxima ( $\Gamma=0$ ). Para cada posición de la fibra la intensidad de la luz se mide a la salida del transductor. Enseguida la transmisión es procesada estadísticamente (se toma el promedio de los resultados de 10 mediciones individuales) y graficada.

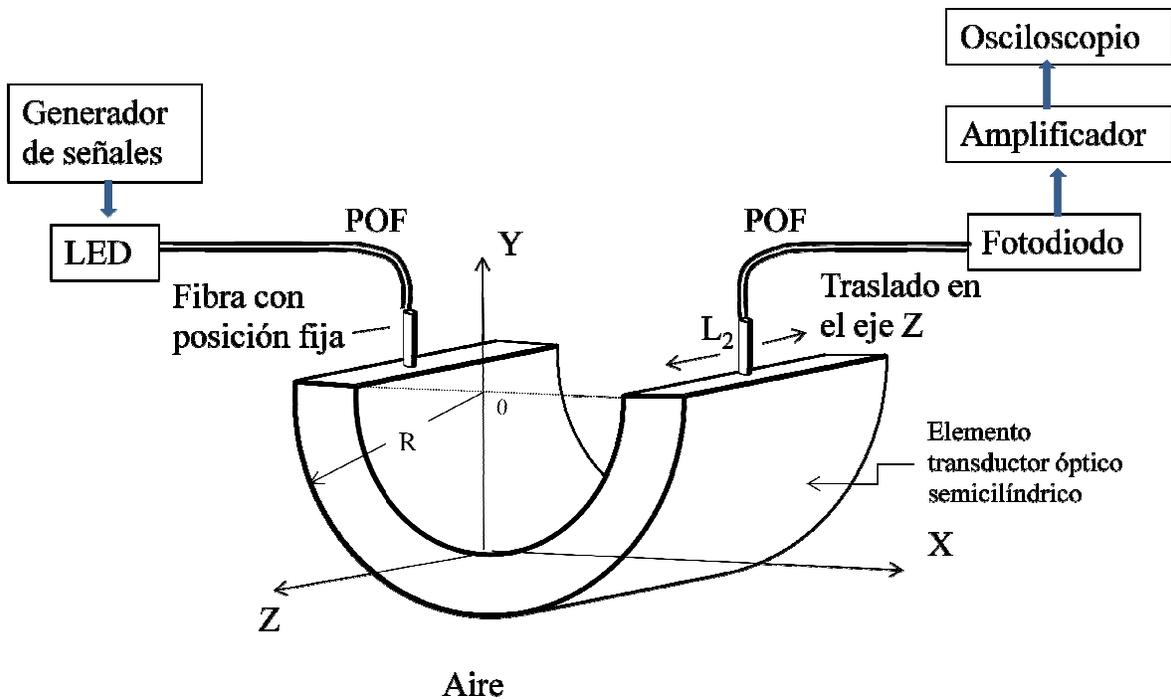


Figura 4.14 Esquema de conexiones utilizadas en el experimento.

*Resultados:*

Los datos experimentales de la transmisión del sensor en el aire contra la distancia relativa  $\Gamma$  se presentan en la forma grafica en la figura 4.15.

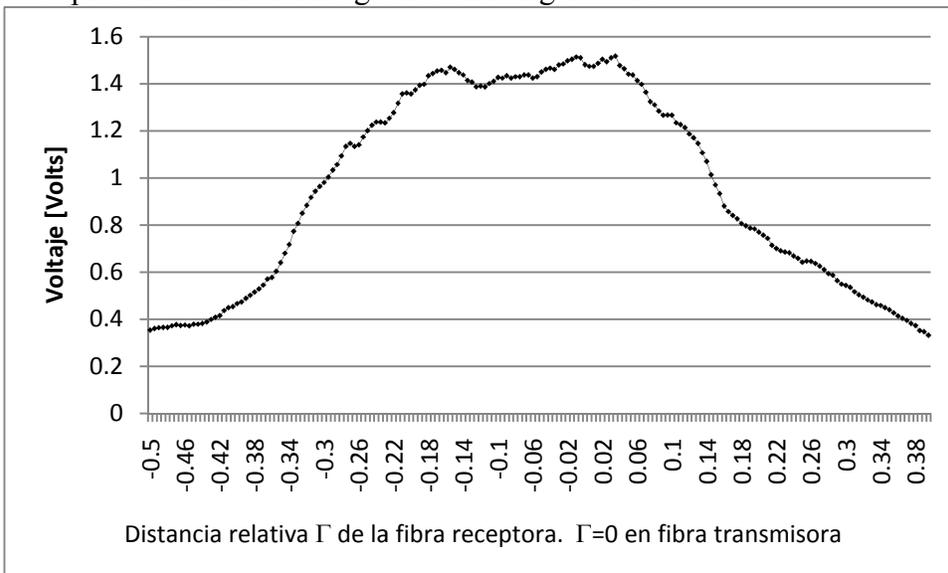


Figura 4.15 Voltaje de salida del sensor  $V_s$  al variar la posición relativa de la fibra receptora  $\Gamma$  cuando el sensor está en el aire.

*Discusión y conclusiones:*

Las fibras mantienen el acoplamiento aún cuando no están alineadas en un mismo plano, este comportamiento se observó al realizar la simulación numérica (figura 3.6) y se debe a la forma semicilíndrica del sensor, ya que los rayos no se concentran y viajan a lo largo del elemento.

- Experimento 4. Discriminación entre diferentes líquidos.

*Objetivo:* Obtener el comportamiento del sensor como sensor para discriminar entre diferentes líquidos para una distancia relativa de la fibra óptica  $\Lambda=0.925$ .

*Desarrollo Experimental:*

1. Con el diagrama de conexiones mostrado en la figura 4.11 posicionar las fibras a una distancia relativa fija  $\Lambda=0.925$ .
2. Sumergir el sensor en agua y se medir la intensidad de la luz, promediar las mediciones (realizar 10 mediciones) y calcular la intensidad relativa.
3. Limpiar el sensor y las fibras, sumergir el sensor en gasolina y medir la intensidad de la luz. Promediar las mediciones (realizar 10 mediciones) y calcular la intensidad relativa.
4. Limpiar el sensor y las fibras, sumergir el sensor en diesel y medir la intensidad de la luz. Promediar las mediciones (realizar 10 mediciones) y calcular la intensidad relativa.
5. Graficar la transmisión relativa  $T^*$  vs. el índice de refracción externo  $n$ .

*Resultados:*

Los datos experimentales en la transmisión relativa del sensor para agua destilada, gasolina y diesel están graficados en la figura 4.14 para una distancia relativa de  $\Lambda=0.925$  y para un diámetro adimensional de las fibras de  $\Phi=0.049$ .

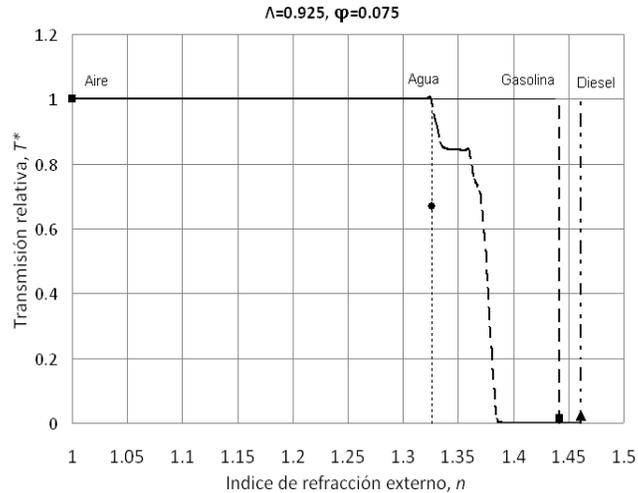


Figura 4.16 Resultados experimentales conjuntamente con las predicciones teoricas (---) vs. el Índice de refracción  $n$ . Los puntos experimentales corresponden a agua destilada (●) gasolina (■) y diesel (▲).

#### *Discusión y conclusiones:*

Se puede discriminar claramente entre aire-gasolina, aire-diesel, agua-gasolina y agua-diesel bajo las condiciones previamente descritas.

#### **4.3.2. Características del sensor de nivel de líquidos basado en un elemento transductor refractométrico semicilíndrico**

Para utilizar el sensor como un sensor de nivel de líquidos se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones, el sensor será discreto y tendrá una resolución mínima de acuerdo al experimento 3 de  $0.35\Gamma$ , esto para que no interfiera con el siguiente par de fibras ópticas, la posición relativa en el plano x-y de la fibra será de  $0.92\Lambda$  de acuerdo al experimento 4, ya que esto nos asegurará la discriminación entre aire-agua-gasolina o aire-agua-diesel.

#### **4.4. Conclusiones**

Los datos experimentales coinciden con las predicciones teóricas en el caso de gasolina y diesel como medios externos. En el caso cuando el medio externo es el agua, la transmisión relativa obtenida experimentalmente es menor (1/3 aproximadamente) que la predicción teórica. La probable causa de esta diferencia es el carácter aproximado del modelo matemático del sensor que produce resultados menos precisos para medios externos de un índice de refracción relativamente pequeño. Sin embargo, se puede observar que el sensor puede distinguir entre diversos fluidos: la gasolina, agua, diesel y aire, el comportamiento obtenido al realizar el experimento con fibras ópticas de cuarzo y de plástico fue muy

similar por lo que se puede fabricar el sensor tanto con elementos plásticos como con elementos de cuarzo. Sin embargo, los elementos de plástico son más fáciles para fabricar, por lo que los sensores hechos totalmente de plásticos tendrán una ventaja competitiva.

#### 4.5. Referencias

- [1] Arcos M., Chana, D., Contreras, K. et al., “Design and Fabrication of a Novel Plastic Optical Sensor for Temperature Measurement Using a Chemical Transducer,” in *The 16<sup>th</sup> International Conference in Plastic Optical Fiber*, 2007, pp. 189.
- [2] Arrue, J., Jimenez, F., Aldabaldetrekú G. et al., “Analysis of the Parameters of Tapers in Graded-Index POF for the Design of a Refractive-Index Sensor and Other Applications,” in *The 16<sup>th</sup> International Conference in Plastic Optical Fiber*, 2007 pp. 238-241.
- [3] Poisel, H., Meedt, H., and Niewisch, J., “Fiberoptic Liquid-Level Sensor – FOLLS,” in *The 16<sup>th</sup> International Conference in Plastic Optical Fiber*, 2007, pp. 178-181.
- [4] N. G. Sultanova, S. N. Kasarova, C. D. Ivanov, and I. D. Nikolov, “Refractive data of optical plastics for laser applications,” *International Conference on Holography, Optical Recording, and Processing of Information*, vol. 6252, pp. 1–5, Varna, May 2006.
- [5] Khotiaintsev, K. “Desarrollo de una aplicación de simulación numérica para sensores refractométricos ópticos,” Tesis para obtener el grado de licenciatura, Universidad Autónoma de Puebla, México, 2005.
- [6] V. Svyryd, S. Khotiaintsev, and P. Swart, “Linear and steplike characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element,” *Optical Engineering*, vol. 42 no. 5, pp. 1383-1389, 2003.

## 5. DISCUSIÓN.

En la realización de la presente tesis se analizó un nuevo tipo de sensor refractométrico con estructura semicilíndrica. La selección de una forma semicilíndrica se debió a que de esta manera se puede utilizar un elemento lo suficientemente largo y con este tener un arreglo de sensores discretos para medir el nivel en un tanque de gasolina o diesel.

Los análisis teóricos, simulaciones numéricas y resultados experimentales demuestran que este diseño es factible para poder discriminar entre diferentes líquidos y se puede fabricar un sensor de nivel de estas sustancias.

Se obtuvieron teórica y experimentalmente el comportamiento del sensor con diferentes medios externos y se obtuvo el diseño óptimo del mismo para poder discriminar entre diferentes sustancias, se observó que sólo bajo ciertas posiciones relativas simétricas de las fibras con respecto al centro del elemento este funciona como sensor, bajo parámetros diferentes no se podría detectar el cambio de índice de refracción del medio externo.

Al sumergir el elemento en diferentes medios externos observamos que la transmisión de la luz disminuye con respecto a la transmisión cuando el elemento externo es el aire por lo que al medir este nivel de transmisión podemos relacionar la sustancia que rodea al elemento.

Para el diseño del sensor de nivel en un tanque observamos que la luz no viaja en un solo plano, así que para determinar la resolución mínima del sensor se realizaron mediciones a lo largo del elemento y se observó que la resolución mínima es de 10.7 mm para un elemento de 20 mm de radio, pero debido a que los parámetros de diseño dependen del radio del elemento, del diámetro de las fibras y de la apertura numérica de las mismas al reducir alguno de los elementos de diseño o todos se puede reducir la resolución del sensor de nivel.

## 6. CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ Se investigaron teórica y experimentalmente las características de un nuevo sensor refractométrico basado en fibras ópticas y un elemento de detección semicilíndrico de plástico que mide el índice de refracción de un medio circundante.
- ✓ Se mostró la posibilidad de discriminación entre algunos medios externos, en particular entre aire, gasolina, diesel y agua. Esto, en particular, permite la medición de niveles de combustibles en tanques y, simultáneamente, la detección de la presencia del agua en el tanque (que a veces se encuentra por debajo del combustible) así como la medición de nivel de esta agua.
- ✓ Se obtuvieron los parámetros del sensor con los cuales la discriminación entre aire y gasolina o diesel y entre gasolina o diesel y agua es confiable.
- ✓ Se mostro la posibilidad de utilizar el elemento semicilíndrico en forma de un arreglo vertical de sensores elementales para medir los niveles de líquidos mencionados de una manera discreta; se investigó la resolución vertical de este arreglo en función de sus parámetros.
- ✓ Los nuevos conocimientos obtenidos en el presente trabajo forman una base para el diseño de los sensores de fibras ópticas plásticas para diversas aplicaciones prácticas.
- ✓ Algunos resultados científicos y aplicados obtenidos en el marco del presente trabajo fueron publicados en forma de ponencias en foros nacionales e internacionales y fueron impresos en las memorias en extenso de estos foros (Anexos).

## Optical-Fiber Refractometric Sensor with Semi-Cylindrical Optical Detection Element for Measuring the level of Gasoline

Sergei Khotiaintsev, Enrique Llanito-Caudillo, Selene Perez-Garcia, Jordi Morales-Farah  
*Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, National Autonomous University of Mexico, Av. Universidad 3000, Mexico, D. F., Mexico.*  
*sergeik@hotmail.com*

### Abstract

*We present a novel optical fiber refractometric sensor with semi-cylindrical optical detection element. A pair of the multimode optical fibers is attached symmetrically to the element's flat plane. The optical coupling of the two fibers due to internal reflection of light from the element's cylindrical surface is sensitive to the refractive index of the surrounding medium. We exploit several internal reflections in series and partial focusing of the optical beam by the element's cylindrical surface to achieve enhanced sensitivity to the refractive index of the surrounding medium and reduced intrinsic optical loss in the transducer. We show theoretically that the transducer, in particular, can discriminate between the air and gasoline. We also present experimental data obtained with plastic detection element, which confirm our theoretical results. A vertical array of such transducers employing a relatively long single semi-cylindrical detection element can access the level of gasoline in automobile tanks.*

### 1. Introduction

Fiber optic sensors offer many advantages over traditional mechanic, electric and other sensors. Previously, it was mainly the silica-based optical fiber that was used in sensors. Recently, the significant advance in quality of plastic optical fibers (POF) opened many new applications for optical transmission and optical sensing. The POFs are attractive for the market because they are multimode devices of a relatively large core diameter, which are easy to handle and install. The POF-based transmission systems use simple and non-expensive components such as visible or near-infrared light-emitting diodes (LEDs), simple plug connectors, branching devices etc., the overall system cost is low and its maintenance is simple. Currently, POFs allow the rates of data transmission of up to 10 Gbit/s over distances of about 300 m [1].

Similarly to silica optical fibers, POFs are immune to electromagnetic interference and noise and have many other advantages common to optical fibers of other types.

POF applications include relatively short-haul local area networks (LANs) in offices, buildings, small campuses. Another emerging application is optical data transmission (analog and digital) on board of cars, trucks, trains etc. A distinctive feature of the transportation vehicles is a need in monitoring of different physical quantities relating to the operation of the vehicle (temperature, pressure, level of different liquids in reservoirs and tanks etc.). Therefore, it is of great practical interest to compliment the optical communications with optical sensing on board a vehicle. For the sake of compatibility, the optical sensors should operate via same POFs as the rest of the on-board optical network.

Some de-facto standards for on-board automotive optical LANs exist already. On particular, the Domestic Digital Bus System (DB2) specifies a ring system which connects different devices, such as radio, TV, CD changers, and navigations systems in vehicles [2]. The Media Oriented Systems Transport Multimedia and Control Networking Technology (MOST) specification is a recommendation for multimedia capable networks in automobiles [3], while the Byteflight system deals with the connection of airbag systems with other control components [4].

Liquid level sensing is important in all automotive applications. There exists a wide range of sensing methods suitable for determining the liquid level. They include mechanical, electrical and optical methods, and their combinations.

Electrical liquid level sensors are employed for accessing the level of fuel in automotive tanks at present. In these sensors, the level of the fuel is measured with an electrical signal generated by a variable resistor controlled by floater within the tank.

These sensors are simple and cheap, but their resolution is relatively low. Also, electrical wires in a flammable environment present a potential hazard.

Optical fiber sensors offer several advantages for these applications, due to the dielectric nature of the optical fibers. The advantages of optical sensors are not limited to the absence of electrical conductivity. They also feature absolute immunity to electromagnetic fields, high resistance to chemical corrosion and absence of a spark hazard. These features make the optical sensors ideal candidates for use in fuel tanks.

There are four principal classes of optical sensors: intensity, phase, polarization, and frequency sensors. The sensors belonging to each of these classes differ significantly in their performance and also cost, which almost directly relates to the complexity of the measurement principle employed. The existing optical sensors for liquid level sensing exploit a wide range of techniques. In the automotive applications, the most important factors in choosing a sensor are sensor simplicity, the ease of processing of signals, a low sensor cost, and simple maintenance. Among the four sensor classes which we mentioned, the intensity-type (amplitude) fiber sensors are the simplest to implement due to easiness of intensity measurement, in contrast to phase and polarization measurements. Also, the intensity-based optical sensors are fully compatible with POFs. Therefore, the intensity optical sensors are the most promising candidates for the automotive applications.

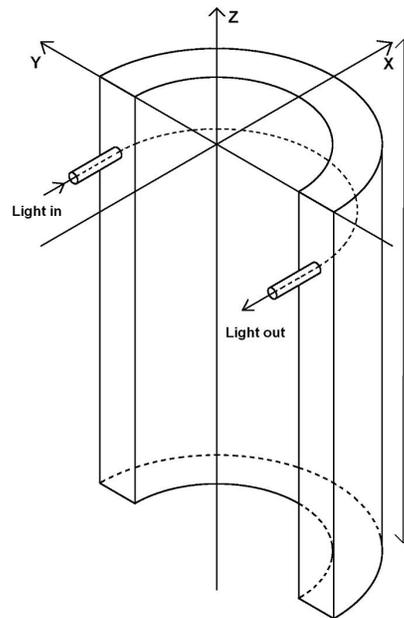
Intensity-type sensors can rely on many principles. One of them is the optical refractometry, which is based on the determination of the refractive index of substances,  $n$ . The refractive index  $n$  is related to many physical quantities of substances. In the case of liquids, quantities such as temperature, pressure, the concentration of soluble substances (for instance, salt, sugar etc.) can be found indirectly by measuring the refractive index. In addition, refractometry allows one to discriminate between different substances, since each substance or material has a different refractive index.

Some POF sensors suitable for automotive applications are already reported, such as a simple and effective plastic optical sensor for temperature measurement [5], and plastic refractometric sensor which employs a tapered section of graded-index POF [6]. The possibility of refractometric liquid-level measurement with the refractometric evanescent-field sensor composed of multiple sharp bends in an extended single POF or in an array of POFs has been successfully demonstrated in experiments with water [7]. But, the vertical resolution of such a sensor is limited by the finite size of employed fiber loops, and it might be difficult to accommodate many fiber loops in a tank. Here, we present a novel optical fiber

refractometric sensor which employs a semi-cylindrical optical detection element. It can be employed as a point sensor, or in a form of vertical array, in which case it can access the level of a liquid, such as gasoline, in a discrete manner in a tank or reservoir. Following is the description of the sensor and its performance characteristics.

## 2. Optical-fiber refractometric sensor

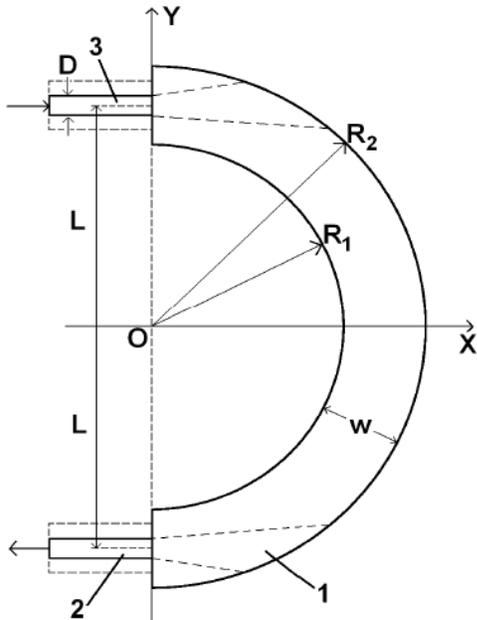
The sensor that we treat here consists of a semicylindrical optical detection element which is connected to a pair of optical fibers as shown in Figure 1. The optical detection element is of transparent dielectric material. In this work, we consider a detection element of polymethyl methacrylate (PMMA) of the refractive index  $n=1.48$  at  $\lambda=940$  nm. We employ a section of hollow plastic semi-cylinder in order to minimize the mass and cost of the material, but a solid semi-cylinder can be employed as well.



**Figure 1. Schematic view of the optical sensor.**

The operational principle of the sensor is illustrated in Figure 2, which shows a cross-section of the optical detection element and connecting optical fibers. One of them is a lead-in, and another a lead-out optical fiber. The light from a remote light source (a near-IR lightemitting diode not shown in the figure) is coupled via the lead-in optical fiber (2) to the interior of the detection element (1). The light propagates by means of serial internal reflections at the external cylindrical surface of the element until it reaches the output plane of the detection element. At this plane, some of the light is coupled to the core of the lead-out optical fiber

(3) and brought via this fiber to a remote photometer (not shown in the figure).



**Figure 2. Generic refractometric transducer consisting of semi-cylindrical transparent dielectric element (1) integrated with the lead-in (2) an leadout (3) optical fibers.**

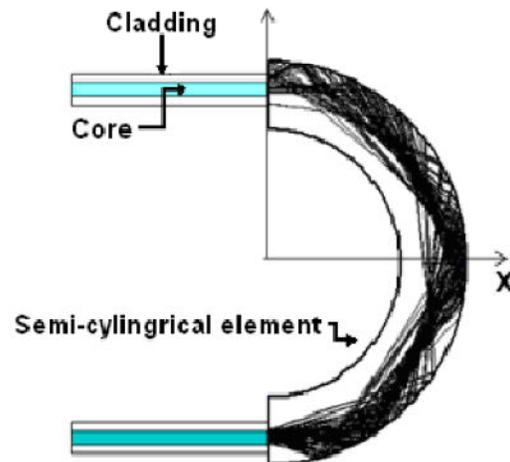
When the element is in the air, the internal reflection is rather strong (under a proper position of the optical fibers relatively to the detection element). When the element is in a liquid, the internal reflection at the external cylindrical surface diminishes or completely vanishes due to a smaller difference in refractive indices of the two media. Therefore, optical transmission of the detection element  $T=I_{out}/I_{in}$ ,  $I_{out}$  and  $I_{in}$  is the output and input light intensity, respectively, is a measure of the external refractive index  $n$ .

The difference in the optical transmission of the detection element in the air and in a liquid, in particular, serves for the discrimination between the two media and is a basis for liquid-level measurement with vertical arrays of such sensors (In such a case, the sensor output is interpreted in a binary manner).

We relate all geometrical parameters of the sensor to the external radius of the detection element  $R_2$  and use the following dimensionless quantities to describe the geometry of the sensor: the dimensionless core diameter of the optical fibers  $\Phi=D/R_2$ , the dimensionless distance of the optical fibers from the element plane of symmetry  $A=L/R_2$ , and the dimensionless internal radius of the detection element  $\rho=R_1/R_2$ .

The optical transmission  $T$  is a function of optical and geometrical parameters of the optical detection element and optical fibers. In view of complex relation between these parameters, we employed an iterative design procedure in order to find the optimum combination of sensor parameters. This procedure included the analysis of sensor transmission against the external refractive index, which was performed by means of numerical ray-tracing algorithm and also experimentally. The analysis provided data for corrections to the initial design. The procedure was repeated until a sufficiently large difference in response of the sensor to the air and the gasoline was achieved.

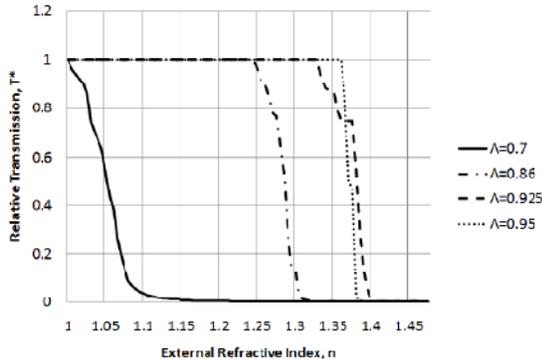
We performed the numerical ray-tracing by means of the mathematical model, computational algorithm and computer program in Visual Basic programming language described in [8]. The analysis was performed for the rays in the x-y plane only, due to limitations of the existing software. An example of calculated ray trajectories in the x-y plane of the detection element in the case when the external medium is the air is shown in Figure 3.



**Figure 3. Ray trajectories in the detection element under  $\Phi=0.075$ ,  $A=0.86$ ,  $NA_{in}=0.485$ ,  $NA_{out}=0.095$ .**

The numerical analysis yields also the optical transmission  $T$  against the external refractive index with sensor geometry and material constants as parameters. In practice, it is convenient to characterize the sensor performance in terms of its relative transmission  $T^*=I_{out}(n)/I_{out,air}$ , because this quantity does not include the input light intensity  $I_{in}$  which cannot be accessed experimentally [9]. The graphs of the calculated relative transmission  $T^*$  vs. the external refractive index  $n$  obtained under quasi-optimum

combination of sensor parameters for various dimensionless distance  $\Lambda$  are shown in Figure 4.



**Figure 4. Calculated relative transmission  $T^*$  vs. the external refractive index  $n$  under  $\phi=0.075$ ,  $NA_{in}=0.485$ ,  $NA_{out}=0.095$ .**

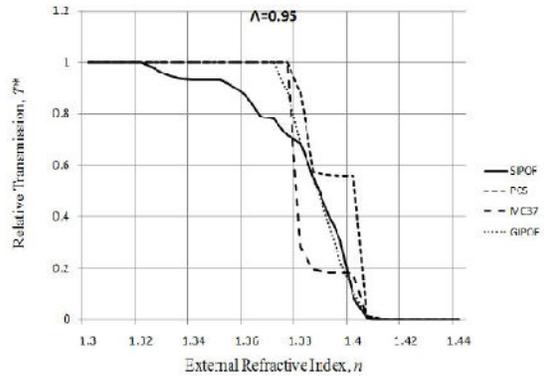
The data in Figure 4 show the effect of the dimensionless distance  $\Lambda$  on the response of the sensor to different external refractive index. The refractive index of the gasoline is about 1.442 at  $\lambda = 940$  nm. For the reliable discrimination between the air and gasoline the step-like relative transmission characteristic  $T^*$  in the range  $n=1.3\dots 1.4$  is appropriate. Therefore, any of the three dimensionless distances  $\Lambda$ , which yield the relative transmission function in the specified range of external refractive index  $n$ :  $\Lambda=0.86$ ,  $0.925$  and  $0.95$  can be employed in the sensor.

We have also checked the suitability of some commercially available POFs shown in Table 1 for the

**Table 1. Some commercial POFs.**

Fiber Type	Profile	$NA$	Core Radius [ $\mu\text{m}$ ]	$\lambda_{opt\text{tx}}$ [nm]
Standard-POF	SI	0.5	490	650
PCS	SI	0.37	100	850
MC37-POF	SI	0.5	65	650
GI-POF	GI	0.39	450	650

basically the same sensor. The calculated relative transmission  $T^*$  against the external refractive index under the dimensionless distance  $\Lambda=0.95$  and identical characteristics of both optical fibers is plotted in Figure 5. From these data, it is possible to draw a conclusion that the standard SI POF is the less suitable fiber for this application, because of the sloping form of the respective relative transmission function  $T^*$ .



**Figure 5. Calculated relative transmission  $T^*$  vs. the external refractive index  $n$  for some commercial POF.**

The three other POFs are, generally speaking, suitable for the present application, although the optimum choice between them requires further investigation.

### 3. Experiment

The experiment was performed with a relatively large physical model of the sensor. The schematic of experiment layout is shown in Figure 6. The light source was a high radiance infrared GaAlAs LED with a peak emission at a wavelength of  $\lambda=940$  nm, spectral bandwidth of 45 nm and an angular beam full width of  $40^\circ$ . This LED was excited by a triangular current wave generated by a waveform generator, of amplitude of 14 mA at a frequency of 100Hz. The generator was connected in series to the LED and a resistor of 330  $\Omega$ . The LED was coupled to the lead-in optical fiber. The triangular wave form was chosen in order to identify a possible saturation of the optical receiver at the sensor output.

The optical fibers were bundle of thousands of optical fibers of very small diameter (about 20  $\mu\text{m}$  each one). The overall diameter of each of two bundles was of 3 mm. We used a diaphragm with circular aperture of various diameters in order to model physically the optical fibers of different core diameter. The effective angular aperture of the lead-in optical fiber (bundle) was controlled when necessary by the excitation angle of the optical fiber at its input. The two optical fibers were in optical contact with the optical detection element at symmetric points on its two side surfaces. An adequate index-matching liquid was employed at the optical contact area in order to avoid an excessive reflection at the contact interface. The fiber terminations that were in contact with the detection element were mounted on two micrometric-precision  $x$ - $y$ - $z$  translation stages which allowed us to adjust the position of the two fibers in any plane relatively to the

detection element. In particular, the translation stages allowed us to change the position of the fiber end faces relatively to the sensor plane of symmetry. The semi-cylindrical detection element had an external radius  $R_2=20$  mm, and internal radius  $R_1=14$  mm (In practical device, the external radius of the optical detection would be reduced many times, and common telecommunications-grade optical fibers would be used instead of optical fiber bundles).

The photo detector was Ge photo diode of a large sensitive area of 25 mm<sup>2</sup>, which was coupled to the transimpedance amplifier and then to a photometric unit. The data were stored in a computer via the RS232 interface and finally processed.

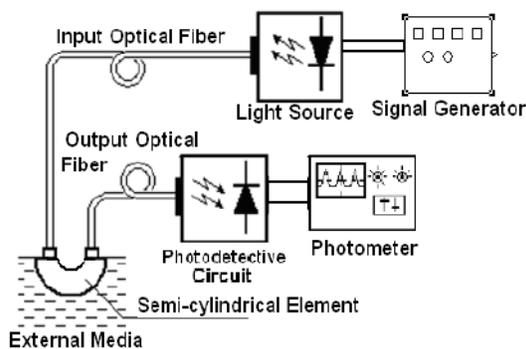


Figure 6. Schematic of experiment layout.

The transducer transmission characteristic was accessed in the following way. The two optical fibers were set initially at the minimum physically possible distance about  $0.5R$  ( $\Lambda=0.5$ ). Then, the distance of the two fibers from the sensor plane of symmetry was increased in a discrete manner with increments of  $\Delta=0.005$  until the edge of the optical detection element was reached at about  $\Lambda=0.99$ . At each discrete position of the optical fibers, the light intensity at the sensor output measured, and respective data stored in the computer. The measurements were performed first in the air and then with the cylindrical working surface of the sensor immersed in various liquids, such as distilled water and gasoline. The relative transmission was calculated, processed statistically, and the respective graphs plotted (we averaged results of ten individual measurements).

Alternatively, the optical transmission of the sensor was measured with various external media (the air and various liquids) under the fixed position of the two optical fibers. This excluded possible errors in optical fiber position when accessing optical transmission under different external media.

## 4. Results

The experimental data on the sensor transmission in the air against the dimensionless distance  $\Lambda$  is plotted in Figure 7. The peaks observed in the graph are due to the coupling of the two optical fibers by two, three, four or more sequential reflections of light at the cylindrical working surface of the detection element. This corresponds to some discrete dimensionless distances  $\Lambda$ , while intermediate distances do not provide for any optical coupling, or provide for a reduced one.

The transmission in liquids is always less than the transmission in the air, because of smaller reflectivity of the sensor working surface when immersed in a more optically dense medium. Therefore, the zero or near-to-zero transmission regions in the graph in Figure 7 are useless; it is the peak transmission regions which correspond to strong coupling between the two optical fibers that can be exploited for the discrimination between the air and the liquid, and, therefore, for liquid-level measurement.

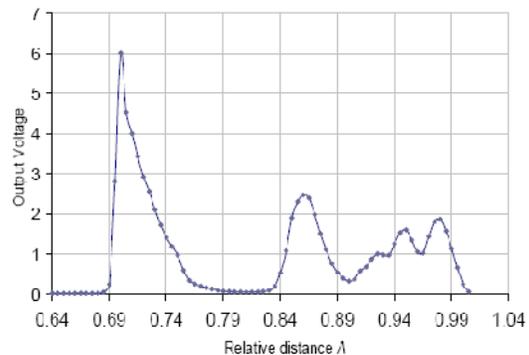


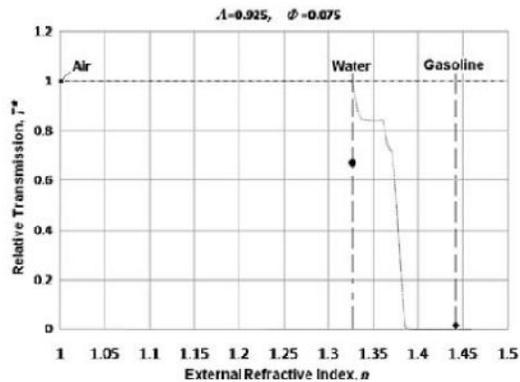
Figure 7. Sensor output voltage vs. optical fiber position  $\Lambda$  when the sensor is in the air.

The dimensionless distances  $\Lambda$  which correspond to the observed peaks in optical transmission in the air are given in Table 2.

The experimental data on the relative transmission of the sensor in distilled water and gasoline are plotted in Figure 8 for two different dimensionless distances  $\Lambda$  and the same optical fiber dimensionless diameter  $\Phi=0.033$ . The parameter  $\Lambda=0.925$  secures more reliable discrimination between the air and gasoline, and, therefore more reliable operation of the respective liquid-level sensor.

**Table 2. Transmission peaks in the air.**

Transmission Peak no.	Dimensionless Distance, $A$
1°	0.70
2°	0.86
3°	0.925
4°	0.95
5°	0.975



**Figure 8. The predicted (.....) and observed relative transmission under  $\Phi=0.075$ ,  $NA_{in}=0.485$ ,  $NA_{out}=0.095$ . The experimental points correspond to the distilled water (•) and gasoline (♦).**

## 5. Conclusions

We investigated theoretically and experimentally the response of a novel optical-fiber refractometric sensor with semi-cylindrical optical detection element to the external refractive index. In particular, we investigated the transmission of this sensor in the air and gasoline with the aim to establish the possibility of using this sensor for accessing the level of gasoline in automotive fuel tanks. We investigate the effect of various geometrical and optical parameters of the sensor on its performance characteristics and found the quasioptimum parameter combination which secures a reliable discrimination between the air and gasoline. The observed response of the sensor is sufficient for practical purposes. A vertical array of such transducers implemented in a single semi-cylindrical detection element of proper length can access the level of gasoline in automobile tanks.

## 6. Acknowledgment

The authors acknowledge the support of the General Directorate of the Academic Personnel (DGAPA) and the Faculty of Engineering of the National Autonomous University of Mexico in a form of the

project PAPIIT IN 114109 and the support of the National Science and Technology Council of Mexico (CONACYT) in a form of the research grant 026106.

## 7. References

- [1] Breyer, F., Lee, J., Randel S., and Hanik, N., "Comparison of OOK- and PAM-4 Modulation for 10 Gbit/s Transmission over up to 300 m Polymer Optical Fiber," *Optical Fiber Communications/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on*, 24-28 Feb. 2008, pp. 1–3.
- [2] Ciocan, C. "The Domestic Digital Bus System (DB2). A Maximum of Control Convenience in Audio Video," *Consumer Electronics, 1990. ICCE 90. IEEE 1990 International Conference on*, 6-8 Jun. 1990, pp. 170 – 171.
- [3] Guglielmetti, L., "Standardizing Automotive Multimedia Interfaces", *IEEE Spectrum*, Apr.-Jun. 2003, pp. 76–78. [4] Cena, G. and Valenzano, A., "Performance Analysis of Byteflight Networks," *Factory Communication Systems, 2004, Proceedings. 2004 IEEE International Workshop on*, 22-24 Sept. 2004, pp. 157–166.
- [5] Arcos M., Chana, D., Contreras, K. et al., "Design and Fabrication of a Novel Plastic Optical Sensor for Temperature Measurement Using a Chemical Transducer," *Plastic Optical Fibers, 2007, Proceedings. 16<sup>th</sup> International Conference on*, 10-12 Sept. 2007, p. 189.
- [6] Arrue, J., Jimenez, F., Aldabaldetrekú G. et al., "Analysis of the Parameters of Tapers in graded-Index POF for the Design of a Refractive-Index Sensor and Other Applications," *Plastic Optical Fibers, 2007, Proceedings. 16<sup>th</sup> International Conference on*, 10-12 Sept. 2007, pp. 238-241.
- [7] Poisel, H., et al., "Fiberoptic Liquid-Level Sensor – FOLLS," *Plastic Optical Fibers, 2007, Proceedings. 16<sup>th</sup> International Conference on*, 10-12 Sept. 2007, pp. 178-181.
- [8] Khotiaintsev, K. "Development of an Application of Numerical Simulation of Optical-Fiber Refractometric Sensors," Undergraduate Thesis, Puebla Autonomous University, Puebla, Pue., Mexico, 2005 (In Spanish).
- [9] Svirid V., Khotiaintsev S. and Swart, P., "Linear and Steplike Characteristics in an Optical Fiber Refractometric Transducer with Hemispherical Detection Element," *Optical Engineering*, vol. 42, no. 5, 2003, pp. 1383-1389.

# Discrete POF Liquid-level Sensor for Measuring the Level of Gasoline and Detecting Water in Automobile Tanks

S. Khotiaintsev, E. Llanito-Caudillo, S. Perez-García, J. E. Morales-Farah

National Autonomous University of Mexico, Mexico, D. F., Mexico,  
sergeikh@hotmail.com, icaro1986@gmail.com, mirek925@gmail.com, jordielias@yahoo.com

**Abstract:** This discrete multipoint sensor employs a single semi-cylindrical plastic refractometric detection element which is interrogated via an array of POFs. It measures the level of gasoline or diesel fuel and simultaneously detects the presence of water in fuel tanks.

**I. Introduction.** Plastic optical fibers (POF) are good candidates for on-board signal and data optical transmission systems. More specifically, cars, trucks, and trains present many opportunities for the introduction of POF-based short-range local area networks (LAN) operating at rates up to 10 Gbit/s.<sup>1</sup> While the prospects for the introduction of POF on board of airplanes and space vehicles are not quite clear because of severe environmental factors encountered in these applications.

A distinctive feature of on-board LAN is a need in sensing of various physical quantities relating to the operation of the vehicle and its safety, such as temperature, pressure, level of different liquids in reservoirs and tanks etc. Therefore, it is of great practical interest to complement the optical communications with optical sensing on board of a vehicle. In order to be compatible, the optical sensors should operate via the same POFs as the rest of the on-board LAN.

In the automotive industry there are already some standards for the on-board networks. One of them is the Domestic Digital Bus System (DB2) which specifies a ring system which interconnects different equipments such as radio, TV, CD players, and vehicle navigation systems at rates up to 20 Mbps over distances up to 10 m.<sup>2</sup> The de-facto automotive bus standard - the Media Oriented Systems Transport (MOST) is used in control, security, and multimedia applications with rates up to 150 Mbit/s,<sup>3</sup> while the Byteflight is an automotive data bus designed for the interconnection of automotive electronic components, such as the air bags, safety belts and various control elements at rates up to 10 Mbps.<sup>4</sup> Liquid-level sensing is important in all automotive applications. There is a large group of methods which can be used for sensing the level of liquids. This group includes mechanic, electric, and optical methods and their combinations. Currently, the float gauges are used for accessing the level of gasoline or diesel fuel in the automobile tanks. In these gauges, the electrical signal proportional to the level of the gasoline is generated by a variable resistor which is controlled by a float. These gauges are simple and cheap, but their precision and resolution are low. Another disadvantage is that electrical wires in the tank present a potential hazard.

The optical fiber sensors offer various advantages over electrical sensors in this application due to their dielectric nature. More specifically, they are non-conductive, immune to electromagnetic interference and noise, and do not produce sparks and fire. These properties make them almost ideal candidates for sensing the level of gasoline and diesel fuel. In recent years, several POF-based sensors were proposed for measuring different physical quantities in the automotive applications. One of them is a temperature sensor<sup>5</sup> and another one is a refractometric sensor which employs a conic section of the graded-index POF.<sup>6</sup> A possibility of accessing the level of liquids with a refractometric multipoint discrete sensor composed of multiple U-turns in a single POF (or in an array of POF loops) was successfully demonstrated in experiments with water.<sup>7</sup> But, the resolution of this sensor is limited by the finite size of the U-turns. Also, it is difficult to accommodate many POF loops in the tank.

Following is a description of a novel optical liquid-level sensor with a sensing element in a form of a semi-cylinder. It is a discrete multipoint intensity-type refractometric sensor. Both the semi-cylinder sensing element and the connecting optical fibers are made of transparent polymer materials.

**II. Sensor Description.** The liquid-level sensor that we treat here consists of a relatively long semicylindrical detection element of transparent plastic material, which is connected to a number of symmetrically placed POF as shown in Fig. 1. Each pair of POF together with the segment of the semicylinder which lies between them constitutes an individual refractometric sensor (transducer). One POF of each pair is connected to a remote light source and the other to a photometer (not shown in Fig 1). The two POF are optically coupled via several serial total or partial internal reflections of light at the cylindrical surface of the detection element. The reflectivity of the surface depends on the difference between the internal and external refractive index. Under proper geometrical and optical parameters, the optical transmission is high when the respective part of the semi-cylinder is in the air because of a large difference in the refractive indices of the air and plastic. That is, the plastic-air interface is highly reflective and the transducer output is high. When the respective part of the detection element is immersed in a liquid, the difference in the refractive indices of the two media is less than in the previous case, the reflectivity decreases and the transducer output is low. Therefore, a change in the optical transmission between the two POFs of each pair which forms a transducer allows us to discriminate between the air and the liquid. It is also possible to discriminate between different liquids but the sensor has to be specially designed for this purpose.

As it can be seen in Fig 1, there are a number of such individual transducers over the length of the semicylinder. All together, they constitute a vertical array which is interrogated in a sequential manner. The transition between the “dark” and “bright” transducers of the array indicates the level of liquid. More exactly, we relate that the top “dark” transducer to the level of the liquid.

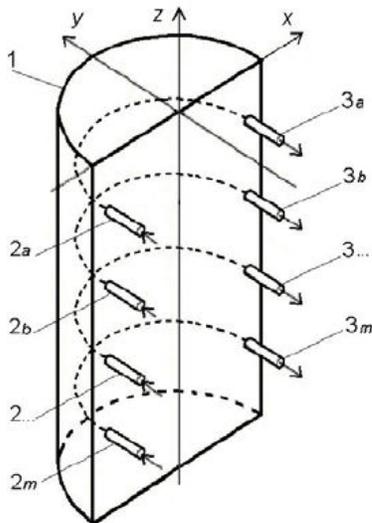


Fig 1: Schematic view of the liquid-level sensor.  
 1 - The detection element, 2 - The transmitting POFs, 3 -The receiving POFs.

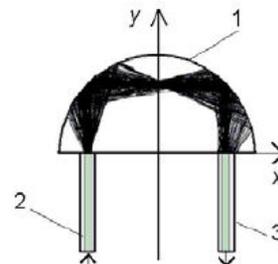


Fig 2: Optical ray trajectories in x-y plane of one of the individual sensing elements under  $\Phi=0.075$ ,  $A=0.7$ ,  $NA_1=0.485$ ,  $NA_2=0.095$ .

The required length of the array is defined by the height of the gasoline tank while the number of sensing elements (transducers) in the array is defined by the required liquid-level resolution. This number may range from tens to hundreds depending on particular application (For large arrays, the operation in the reflection mode and signal multiplexing allows to reduce the sensor complexity and cost).

In this work we considered the detection element and connecting POF of polymethylmethacrylate (PMMA) of the refractive index  $n=1.4828$  at a wavelength of  $\lambda=940$  nm.<sup>8</sup> We found the quasi-optimum combination of optical and geometrical parameters of the sensor by the iterative design procedure. The procedure employed the numerical modeling which was done using the geometrical optics approximation. We used the mathematical model, ray-tracing algorithm and computer program in Visual Basic programming language that were reported previously.<sup>9</sup> These were complimented by the modeling tools described in our previous work.<sup>10</sup>

Following the approach developed in<sup>9-11</sup>, we related all dimensional geometrical parameters of the sensor to the radius of the semi-cylindrical detection element  $R$  and used the following dimensionless quantities: the dimensionless diameter of the POF core  $\Phi=D/R$ , the dimensionless distance of the POF from the cylinder axis  $\Lambda=L/R$ . We considered the symmetrical position of the two POF of each pair (transducer) with regard to the cylinder axis and equal distances of all POF from the cylinder axis ( $\Lambda_1=\Lambda_2=\Lambda$ ), equal core diameters of all POF ( $\Phi_1=\Phi_2=\Phi$ ), and different numerical aperture of the transmitting and receiving POF,  $NA_1$  and  $NA_2$ , respectively. We calculated the relative transmission  $T^*=I_{out}(n)/I_{out\ air}$ ,  $I_{out}(n)$  is the output light intensity when the sensor is in the external medium of the refractive index  $n$  and  $I_{out\ air}$  is the output light intensity when the sensor is in the air.<sup>11</sup>

Fig 2 illustrates the light propagation in the sensing element under two serial internal reflections. The graphs showing the behavior of the relative transmission  $T^*$  against the external refractive index under the quasi-optimum combination of sensor parameters  $\Phi$ ,  $NA_1$  and  $NA_2$ , and various dimensionless distances  $\Lambda$  are plotted in Fig 3.

The data in Fig 3 illustrate the effect of dimensionless distance  $\Lambda$  on the response of the sensor to different external refractive index  $n$ . At the operational wavelength which we consider in this work ( $\lambda=940$  nm) the refractive index of the gasoline is about  $n=1.442$  and the refractive index of the diesel fuel is about  $n=1.461$ . Therefore, the graph  $T^*$  has to have a step in the range  $n=1.3\dots 1.4$  for the reliable discrimination between the air and the gasoline or diesel fuel. Any of the three dimensionless distances:  $\Lambda=0.86$ ,  $0.925$  and  $0.95$  can be used in the sensor for this purpose. But, if we want to discriminate also between the fuel (gasoline or diesel) and the water ( $n=1.333$ ) which can be beneath the gasoline or diesel fuel in the tank, then only the graphs for  $\Lambda=0.925$  and  $\Lambda=0.95$  show the required behavior.

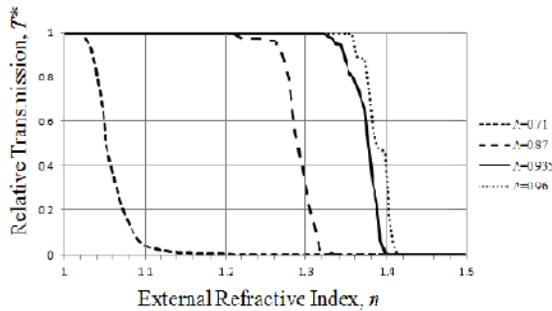


Fig 3: Calculated relative transmission  $T^*$  vs. the external refractive index  $n$  for  $\Phi=0.075$ ,  $NA_1=0.485$ ,  $NA_2=0.095$ , and  $\lambda=940$  nm.

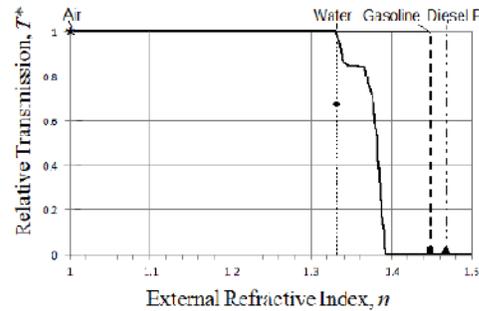


Fig 4: Predicted (—) and observed behavior of the sensor for  $\Phi=0.075$ ,  $NA_1=0.485$ ,  $NA_2=0.095$  and  $\Lambda=0.925$ . The experimental points relate to the air (\*), distilled water (\*), gasoline (■) and diesel fuel (▲).

**III. The Results of the Experiment.** The experiment was performed with the semi-cylindrical detection element of a radius  $R$  of 20 mm. We employed the POF of a core diameter of 1.470 mm. The light sources were the GaAlAs light emitting diodes (LED) of a beam half-width of  $40^\circ$ . The photo receivers employed the Ge photo diodes that were followed by the transimpedance amplifiers. The sensors of the array were interrogated in sequence in a cyclic manner. The relative transmission

$T^*$  of each sensor of the array was measured with sensor in the air, distilled water, gasoline, and diesel fuel. The respective quantities were stored in a computer, statistically processed, and plotted. The observed behavior of the sensor under the parameters which we considered in the previous section ( $\Phi=0.075$ ,  $NA_1=0.485$ ,  $NA_2=0.095$ , and  $\lambda=940$  nm) and the dimensionless distance  $\Lambda=0.925$  is illustrated by experimental points in Fig 4. The predicted behavior of the sensor is also shown in the same Fig 4.

The data in Fig 4 show that the sensor can reliably discriminate between the air and the gasoline, the air and the diesel fuel, the gasoline and the water, and the diesel fuel and the water. It cannot discriminate between the air and the water, but this feature does not affect its capability to detect the water in the tank because the water always stays beneath the gasoline (or diesel fuel) at the bottom of the tank due to larger specific density of water. That is, the air and water are always separated by the gasoline layer in practical conditions. If there is water in the tank, then some individual transducers would be “bright” at the bottom of the array while the transducers that are in the fuel (gasoline or diesel) would be “dark.” The air above the gasoline or diesel fuel would produce a number of bright transducers above the “dark” ones, at the top of the array.

**IV. Conclusions.** This optical sensor can measure the level of gasoline or diesel fuel in automobile tanks and simultaneously detect the presence of water at the bottom of the tank and measure its level. The sensor employs a detection element of transparent plastic in a form of semi-cylinder and an array of commercially available POF. A single detection element of plastic offers a competitive advantage over the existing arrays of point sensors of glass and plastic. This detection element can be used in the reflection mode which allows one to use only a half of POFs required in the transmission mode. Also, the sensitivity to the external refractive index can be increased by using larger than 180 segments of plastic cylinders, solid or hollow. We used the detection element of a relatively large radius of 20 mm, but the radius can be much less in a practical device. Our results show that this device has a large promise for the automotive applications.

**V. Acknowledgments.** The authors acknowledge the support of the Faculty of Engineering and the General Directorate for Academic Personnel Matters (DGAPA) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) in a form of Research grant IN114109 as well as the support of the National Science and Technology Council of Mexico (CONACYT) in a form of Research grant 26106. E. L. C. and S. P. G. acknowledge the scholarships provided to them by the DGAPA-UNAM.

## VI. References

- [1] F. Breyer *et al.*, *Optical Fiber Communications National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3 (2008).
- [2] C. Ciocan, *Consumer Electronics. IEEE 1990 International Conference on*, pp. 170 – 171 (1990).
- [3] L. Guglielmetti, *IEEE Spectrum*, Apr.-Jun., pp. 76–78 (2003).
- [4] G. Cena, A. Valenzano, *Factory Communication Systems*, Proceedings. *IEEE International Workshop on*, pp. 157–166 (2004).
- [5] M. Arcos *et al.*, *Plastic Optical Fibers. 16th International Conference on*, p. 189 (2007).
- [6] J. Arrue *et al.*, *Plastic Optical Fibers. 16th International Conference on*, pp. 238-241 (2007).
- [7] H. Poisel *et al.*, *Plastic Optical Fibers. 16th International Conference on*, pp. 178-181 (2007).
- [8] N. G. Sultanova *et al.*, *Proceedings of SPIE*, **6252**, pp. 1–5 (2006).
- [9] K. Khotiaintsev, *Undergraduate Thesis*, Universidad Autonoma de Puebla, México (2005).
- [10] S. Khotiaintsev *et al.*, *Plastic Optical Fibers. 16th International Conference on*, pp. 11-14 (2007).
- [11] V. Svirid *et al.*, *Optical Engineering*, **42**, pp. 1383-1389 (2003).

# Novedoso sensor refractométrico de fibras ópticas con elemento de detección semicilíndrico plástico, para medir el nivel en un tanque de gasolina o diesel.

Sergei Khotiaintsev, Enrique Llanito Caudillo, Selene Pérez García, Jordi Morales Farah

Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería.  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacan, México D. F. CP 04510.  
Correo electrónico: sergeik@hotmail.com

## RESUMEN

En este artículo se presenta un sensor refractométrico con un elemento óptico de detección semicilíndrico. Un par de fibras ópticas multimodo están acopladas simétricamente al plano del elemento. El acoplamiento de las fibras debido a la reflexión total interna en la superficie del elemento es susceptible al índice de refracción del medio que rodea al elemento. Para obtener un mejor acoplamiento entre las fibras, se realizaron diferentes experimentos cambiando la distancia entre las fibras, con el fin de alcanzar un mayor enfoque de los rayos en la superficie del elemento y así mejorar la sensibilidad al índice de refracción del medio externo al mismo y reducir las pérdidas ópticas intrínsecas en el transductor. Se muestran los resultados teóricos en donde se puede observar que el transductor en particular, puede discriminar entre aire, agua, gasolina y diesel. Al igual se presentan datos experimentales obtenidos con un elemento de detección de plástico, los cuales confirman los resultados teóricos. Un elemento de detección relativamente largo, con un arreglo vertical de fibras ópticas puede usarse como un sensor para medir el nivel de gasolina o diesel en los tanques de automóviles o camiones.

**Palabras clave:** sensor óptico, refractometría óptica, sensor de nivel para líquidos, gasolina, diesel.

## INTRODUCCIÓN

Los sensores de fibras ópticas ofrecen muchas ventajas sobre los sensores mecánicos, eléctricos y otros sensores. Anteriormente se usaban fibras ópticas de silicio en los sensores principalmente, recientemente, el avance significativo en la calidad de las fibras ópticas de plástico (POF) ha generado el desarrollo de muchas nuevas aplicaciones para la transmisión óptica y el sensado óptico. Las POFs son atractivas en el mercado debido a que son dispositivos multimodo de un diámetro relativamente grande el cual es fácil de manipular e instalar. Los sistemas de transmisión basados en POF usan componentes simples y baratos como son LEDs (diodos emisores de luz) en el rango de la luz visible o cerca del infrarrojo, conectores, divisores, acopladores simples, etc. Todo el costo del sistema es bajo y su mantenimiento es simple [1]. Actualmente las POFs permiten tasas de transmisión de hasta 10 Gbit/s sobre distancias de alrededor de los 300m [2] y al igual que las fibras de silicio son inmunes a interferencias electromagnéticas y ruido por lo que pueden instalarse junto a cables eléctricos de potencia y las pérdidas por curvatura son muy bajas, permiten un radio de curvatura de hasta 20 mm por lo que facilita su instalación en lugares estrechos y paredes.

Las aplicaciones de POF incluyen distancias relativamente cortas en redes de área local (LANs) en oficinas, edificios, campus pequeños. Otra aplicación emergente es transmisión de datos óptica (analógica y digital) a bordo de carros, camiones, trenes, barcos, aviones, etc. Una característica distintiva de los vehículos es que necesitan un monitoreo de diferentes cantidades físicas relacionadas a la operación del vehículo (velocidad, temperatura, presión, nivel de diferentes líquidos en depósitos y tanques, etc.). Por tanto, es de un gran interés agregar comunicaciones ópticas con sensado óptico a bordo del vehículo. Por motivos de compatibilidad los sensores deberían operar vía las mismas POFs que el resto de la red óptica a bordo del vehículo.

Como se mencionó anteriormente una de las aplicaciones de estas fibras es en la industria automotriz en la cual se han desarrollado estándares para las redes a bordo de los mismos. Uno de los estándares es el Domestic Digital Bus System (DB2) el cual especifica un sistema de anillo el cual interconecta diferentes dispositivos como es el radio, televisión, cambiadores de CD y sistemas de navegación en vehículos y alcanza unos 20 Mbps en 10 m [3]. La especificación Media Oriented Systems Transport (MOST) es uno de los sistemas más utilizados en aplicaciones de control, seguridad y multimedia con una tasa de hasta 150 Mbps [4], mientras que Byteflight es un sistema que trata con conexiones de sistemas de bolsas de aire y cinturones de seguridad con otros componentes de control a una tasa de 10 Mbps [5].

El sensado de nivel de líquidos es importante en todas las aplicaciones automotrices. Existen un amplio grupo de métodos de sensado disponibles para determinar el nivel de líquidos. Ellos incluyen métodos mecánicos, eléctricos y ópticos y sus combinaciones. Actualmente los sensores de nivel de líquidos eléctricos son empleados para conocer el nivel de gasolina en los tanques de los automóviles. En estos sensores el nivel de la gasolina es medido con un generador de señales eléctrico por una resistencia variable controlada por un flotador dentro del tanque. Estos sensores son simples y baratos, pero su resolución es relativamente baja. También, los cables eléctricos en un ambiente inflamable presentan un peligro potencial. Los sensores de fibra óptica ofrecen distintas ventajas para estas aplicaciones debido a la naturaleza dieléctrica de las fibras ópticas. Las ventajas de los sensores ópticos es que no están limitados a la ausencia de conductividad eléctrica, ofrecen absoluta inmunidad a campos electromagnéticos y alta resistencia a riesgo por chispas. Estas características hacen a los sensores ópticos ideales candidatos para su uso en tanques de gasolina y diesel.

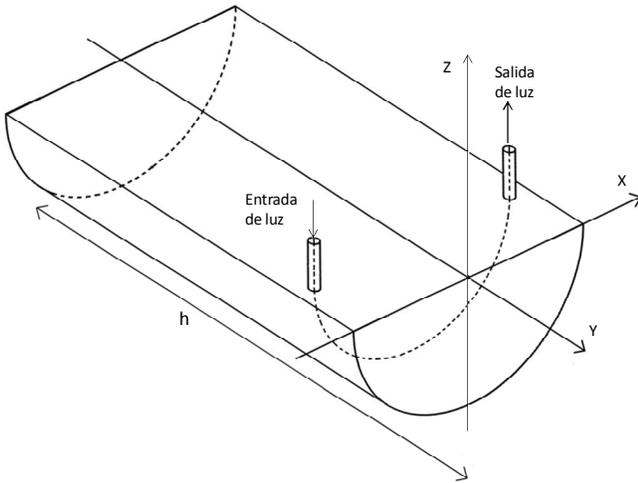
Hay cuatro principales clases de sensores ópticos: intensidad, fase, polarización y sensores de frecuencia. La clasificación de los sensores en cada tipo, diferencia significativamente su desempeño y costo, el cual casi siempre está relacionado a la complejidad del principio de medición empleado. En las aplicaciones automotrices, los factores más importantes para seleccionar un sensor son la simplicidad del sensor, el fácil procesamiento de las señales, el bajo costo del sensor y un simple mantenimiento. Entre los cuatro tipos de sensores que mencionamos, el tipo de intensidad (amplitud) es el más simple de implementar debido a la facilidad de la medición de la intensidad, en contraste con las mediciones de fase y polarización. También los sensores ópticos basados en la medición de intensidad son compatibles con POFs, por consiguiente, los sensores de intensidad óptica son los candidatos más prometedores para las aplicaciones automotrices. Los sensores del tipo intensidad están basados en muchos principios. Uno de ellos es la refractometría

óptica, la cual se basa en la determinación del índice de refracción de las sustancias,  $n$ . El índice de refracción  $n$  está relacionado con muchas características cuantitativas de las sustancias. En el caso de líquidos estas características cuantitativas como la temperatura, presión, la concentración de sustancias solubles (como ejemplo, sal, azúcar, etc.) pueden ser obtenidas indirectamente midiendo el índice de refracción. Además, la refractometría permite discriminar entre diferentes sustancias, debido a que cada sustancia o material tienen diferentes índices de refracción.

Anteriormente ya se han desarrollado sensores de POF para aplicaciones automotrices, tal es el caso de un simple y efectivo sensor óptico plástico para la medición de temperatura [6] y un sensor refractométrico plástico que emplea una sección cónica de fibra plástica de índice gradual [7]. La posibilidad de la medición del nivel de líquidos con el sensor de refractométrico de campo evanescente compuesto de múltiples curvaturas finas en una simple POF extensa o en un arreglo de POFs ha sido exitosamente demostrado en experimentos con agua [8]. Pero, la resolución vertical del mismo sensor es limitada por un tamaño finito de fibras curvadas y podrían ser difíciles de acomodar muchos bucles de fibras en el tanque. Aquí nosotros presentamos un novedoso sensor refractométrico que emplea un elemento de detección semicilíndrico. Pude ser empleado como un sensor puntual, o como un arreglo vertical en cuyo caso puede ser un sensor de nivel de líquidos, como es gasolina o diesel, de una manera discreta en un tanque o contenedor. A continuación se presenta la descripción del sensor y sus características de funcionamiento.

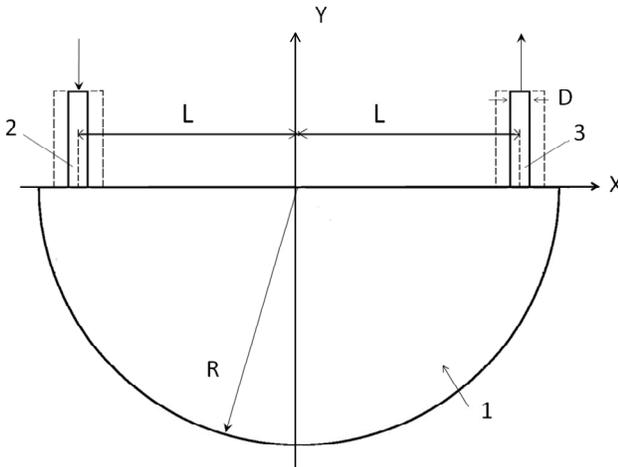
## SENSOR DE FIBRAS ÓPTICAS REFRACTOMÉTRICO

El sensor que tratado aquí consiste de un elemento óptico de detección semicilíndrico el cual está conectado a un par de fibras ópticas como se muestra en la figura 1. El elemento de detección óptico esta hecho de un material transparente dieléctrico. En este trabajo se utilizó un elemento de detección de polimetil metacrilato (PMMA) con un índice de refracción  $n=1.4828$  para una  $\lambda=940$  nm [9].



**Figura 1. Vista esquemática del sensor.**

El principio de operación del sensor es ilustrado en la figura 2, el cual muestra una sección transversal del elemento de detección óptico y las fibras conectadas a él. Una de ellas es la fibra de entrada y la otra la de salida. La luz de una fuente remota (LED no mostrado en la figura) es acoplada vía la fibra de entrada (2) al interior del elemento de detección (1). La luz se propaga por medio de reflexiones totales internas hasta que llega al plano de salida del elemento de detección. En este plano una parte de la luz es acoplada al núcleo de la fibra de salida (3) y llega a través de esa fibra a un fotómetro remoto (no mostrado en la figura).



**Figura 2. Transductor refractométrico, consiste de un elemento semicilíndrico de dieléctrico transparente (1) integrado con una fibra óptica de entrada (2) y otra fibra óptica de salida (3).**

Cuando el elemento está en el aire la reflexión es un poco más potente (bajo cierta posición de las fibras relativa en el elemento de detección), cuando el elemento está inmerso en un líquido la reflexión en la superficie del cilindro disminuye o se desvanece por completo debido a una menor diferencia en los índices de refracción en los dos medios. Por

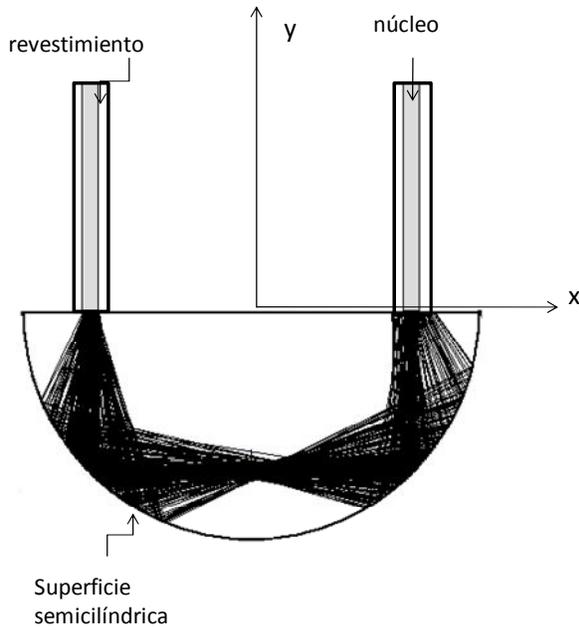
consiguiente la transmisión óptica en el elemento de detección es  $T=I_{out}/I_{in}$ ,  $I_{out}$  e  $I_{in}$  son la intensidad de la luz de salida y entrada respectivamente, las cuales son una medida de el índice de refracción externo,  $n$ .

La diferencia en la transmisión óptica en el elemento de detección en el aire y en un líquido en particular, sirve como discriminación entre los dos medios y es un fundamento para la medición de nivel de líquido con un arreglo vertical de estos sensores (en cuyo caso, la salida del sensor es interpretada de una manera binaria).

Todos los parámetros geométricos del sensor están relacionados al radio del elemento de detección  $R$ , y se usaron las siguientes cantidades adimensionales para describir la geometría del sensor: el diámetro adimensional del núcleo de las fibras  $\Phi=D/R$ , la distancia adimensional de las fibras ópticas desde el plano de simetría del elemento  $A=L/R$ .

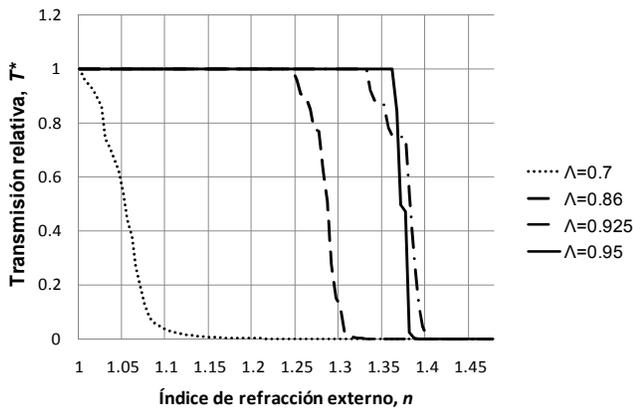
La transmisión óptica  $T$  es una función de los parámetros ópticos y geométricos del elemento de detección y las fibras ópticas. En vista de obtener una relación entre estos parámetros, se empleó un procedimiento iterativo con el propósito de encontrar la combinación de valores óptimos de los parámetros del sensor. Este procedimiento incluye el análisis de la transmisión del sensor contra el índice de refracción externo, la cual fue obtenida por medio del algoritmo de trazados de rayos y experimentalmente. El análisis arrojó datos para las correcciones del diseño inicial. Este procedimiento fue repetido hasta que se obtuvo una diferencia suficientemente grande de la respuesta del sensor al aire-gasolina y al aire-diesel.

Se simuló el trazado de rayos por medio de un modelo matemático, un algoritmo computacional y un programa de computación en Visual Basic, programa descrito en [10]. El análisis fue simulado para rayos en el plano  $x$ - $y$  del elemento de detección para el caso en que el medio externo es aire, este análisis se muestra en la figura 3.



**Figura 3. Trayectoria de rayos en el elemento de detección bajo  $\Phi=0.075$ ,  $\Lambda=0.7$ ,  $NA_{entrada}=0.485$ ,  $NA_{salida}=0.095$ .**

Con el análisis numérico se obtuvo también la transmisión óptica contra índice de refracción externo con la geometría del sensor y las constantes del material como parámetros. En práctica, es conveniente caracterizar el funcionamiento del sensor en términos de la transmisión relativa  $T^* = I_{out}(n)/I_{out}(air)$ , debido a que esta cantidad no incluye la intensidad de la luz de entrada  $I_{in}$  la cual no puede ser medida experimentalmente [11]. Las gráficas de la transmisión relativa  $T^*$  contra el índice de refracción externo  $n$  obtenidas bajo la combinación casi-óptima de los parámetros del sensor para varias distancias adimensionales relativas  $\Lambda$  son mostradas en la figura 4.



**Figura 4. Transmisión relativa calculada  $T^*$  vs. Índice de refracción externo,  $n$  bajo  $\Phi=0.075$ ,  $NA_{entrada}=0.485$ ,  $NA_{salida}=0.095$ .**

Los datos en la figura 4 muestran el efecto de la distancia adimensional en la respuesta del sensor a diferentes índices

de refracción externos. El índice de refracción de la gasolina es alrededor de 1.442 y el del diesel es de 1.461 para una longitud de onda  $\lambda = 940$  nm. Para una confiable discriminación entre aire y gasolina o entre aire y diesel es la característica escalonada  $T^*$  entre  $n=1.3\dots1.4$  es apropiada. Por tanto, cualquiera de las tres distancias adimensionales  $\Lambda$  ( $\Lambda=0.86, 0.925$  y  $0.95$ ) pueden ser empleadas en el sensor, debido a que entregan una función de la transmisión relativa en el rango específico de índices de refracción externos  $n$ .

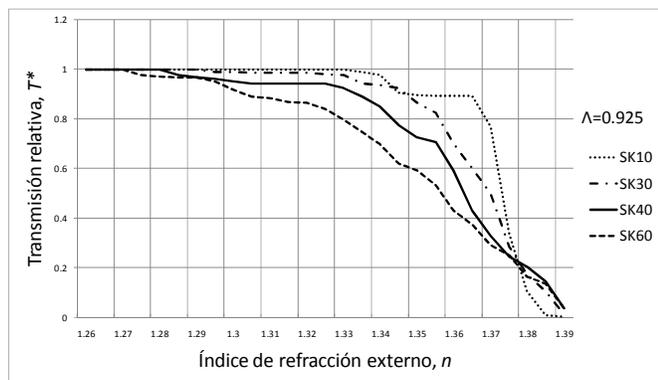
Además se realizó un análisis para conocer si es factible fabricar el sensor con algunas fibras ópticas plásticas comerciales, las cuales son mostradas en la tabla 1 [12], todas son fibras comercializadas por Mitsubishi, fabricadas con un núcleo de PMMA, con índice de refracción de 1.49 y cabe mencionar que se seleccionaron estas fibras porque el fabricante las recomienda para el uso de sensado de temperatura, velocidades, niveles de líquidos y posicionamiento, también porque la única característica que cambia entre las mismas es el diámetro del núcleo.

Modelo	Perfil	NA	Diámetro del núcleo [μm]	Diámetro adimensional Φ
SK10	SI	0.5	240	0.012
SK30	SI	0.5	735	0.03675
SK40	SI	0.5	980	0.049
SK60	SI	0.5	1470	0.0735

**Tabla 1. Características de algunas POFs comerciales**

La transmisión relativa  $T^*$  calculada contra en índice de refracción bajo la distancia adimensional  $\Lambda=0.95$  y características idénticas de todas las fibras ópticas es graficada en la figura 5. De acuerdo con los datos es posible concluir que la fibra estándar SI POF es la menos adecuada para esta aplicación, debido a la pendiente que presenta en la transmisión relativa.

En la gráfica de la figura 5 se muestra la transmisión relativa  $T^*$  calculada contra el índice de refracción con un posicionamiento de las fibras a una distancia dimensional  $\Lambda=0.925$  para las fibras mencionadas en la tabla 1. Realizando un análisis de esta gráfica se concluye que el modelo más adecuado para la fabricación del sensor es el SK10 ya que presenta una respuesta escalonada, mientras que el menos adecuado es el SK60.



**Figura 5. Transmisión relativa calculada  $T^*$  vs. Índice de refracción externo,  $n$  para algunas fibras POF comerciales**

### EXPERIMENTO.

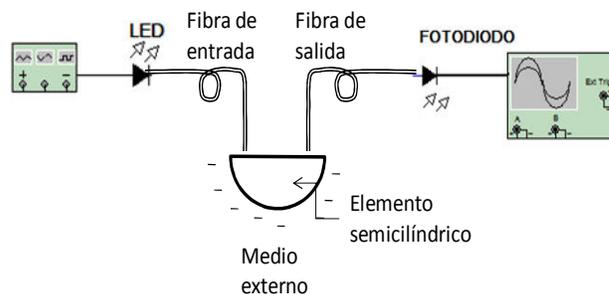
El experimento fue realizado con un modelo del sensor físico relativamente grande. El diseño esquemático del experimento se muestra en la figura 6. Se utilizó un haz de miles de fibras ópticas de un diámetro pequeño (alrededor de 20  $\mu\text{m}$  cada una). Cada haz cuenta con un diámetro total de 3mm. Se utilizó un diafragma con apertura circular de varios diámetros en orden de modelar físicamente las fibras ópticas con diámetros distintos en su núcleo. La apertura angular efectiva de la fibra de entrada fue controlada cuando fue necesario por el ángulo de incidencia de la misma. Ambas fibras ópticas estaban en contacto con el elemento de detección en puntos simétricos a la superficie del elemento detector. Se empleó un líquido adecuado para acoplar el área de contacto de la superficie del elemento con la fibra con el propósito de evitar reflexiones excesivas en la interfase de contacto.

Las terminaciones de las fibras que estaban en contacto con el elemento de detección fueron montadas en dos unidades de desplazamiento en los planos x-y-z de precisión las cuales permitieron el movimiento de las fibras relativo al plano de simetría del sensor. El elemento semicilíndrico de detección tiene un radio  $R = 20\text{mm}$  (en un dispositivo práctico, el radio del elemento de detección puede reducirse y pueden usarse fibras ópticas comunes en el campo de las telecomunicaciones en lugar de un haz de fibras.)

Se utilizó como fuente de luz un LED infrarrojo de alta radiación hecho de GaAlAs con un ángulo de divergencia de emisión de 40°. Dicho LED fue excitado por una onda de corriente triangular que fue generada por un generador de señales, dicha onda tuvo una amplitud de 14 mA a una frecuencia de 100 Hz; se escogió una onda triangular para identificar una posible saturación en el receptor óptico a la salida del sensor. El generador fue conectado en serie al

LED y a una resistencia de 330  $\Omega$  y la fuente de luz fue acoplada a la fibra óptica de entrada.

Como fotodetector se usó un fotodiodo de Ge de gran área de sensibilidad (25  $\text{mm}^2$ ), el cual se acopló a un amplificador de transimpedancia, el cual se conectó a un fotómetro. Los datos obtenidos de cada medición fueron guardados en una computadora vía una interfase RS232 para después ser procesados.



**Figura 6. Diagrama esquemático del experimento.**

La característica de transmisión del transductor fue obtenida de la siguiente manera: El par de fibras ópticas fueron posicionadas originalmente a la mínima distancia posible alrededor de 0.5 R ( $\Lambda = 0.5$ ). Así, se incrementó la distancia de las fibras desde el plano de simetría del sensor discretamente con incrementos de  $\Lambda=0.005$  hasta el borde del elemento semicilíndrico ( $\Lambda = 0.99$ ). Para cada posición de las fibras la intensidad de la luz fue medida a la salida del transductor; dichas mediciones se realizaron primero como medio externo el aire y después con el elemento semicilíndrico inmerso en diferentes líquidos, como agua destilada, gasolina y diesel. Enseguida la transmisión relativa fue calculada, procesada estadísticamente (se promedió los resultados de 10 mediciones individuales) y graficada.

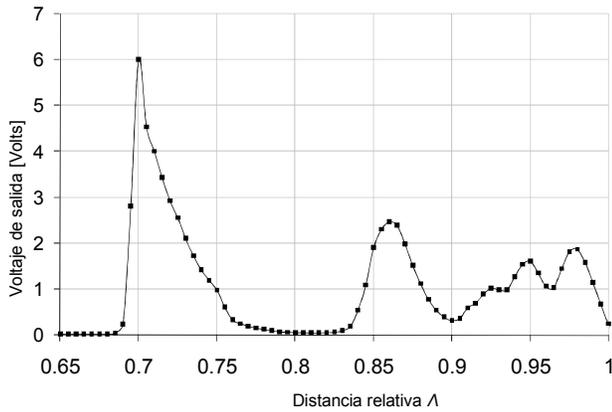
Alternativamente, la transmisión óptica del sensor fue medida con varios medios externos (el aire y varios líquidos) bajo una posición fija de las dos fibras ópticas. Esto excluye posibles errores en la posición de la fibra cuando se mide la transmisión óptica bajo diferentes medios externos.

### RESULTADOS.

Los datos experimentales de la transmisión del sensor en el aire contra la distancia relativa  $\Lambda$  se graficó en la figura 7. Los picos observados en la grafica son debidos al acoplamiento de las dos fibras ópticas por dos, tres, cuatro o más reflexiones secuenciales de la luz en la superficie del elemento de detección cilíndrico. Esto corresponde a algunas distancias discretas adimensionales  $\Lambda$ , mientras que para las

distancias intermedias no se provee ningún acoplamiento o se provee uno muy reducido.

La transmisión en líquidos es siempre menor que la transmisión en el aire, debido a la reflectividad de la superficie del sensor cuando está inmersa en un medio más denso ópticamente. Por tanto, el cero o las regiones cercanas a cero en la gráfica de la figura 7 son inservibles; los picos de las regiones de transmisión que corresponden a un mayor acoplamiento entre las dos fibras ópticas son las regiones que sirven para la discriminación entre aire y líquidos y por tanto para la medición de nivel de líquidos.



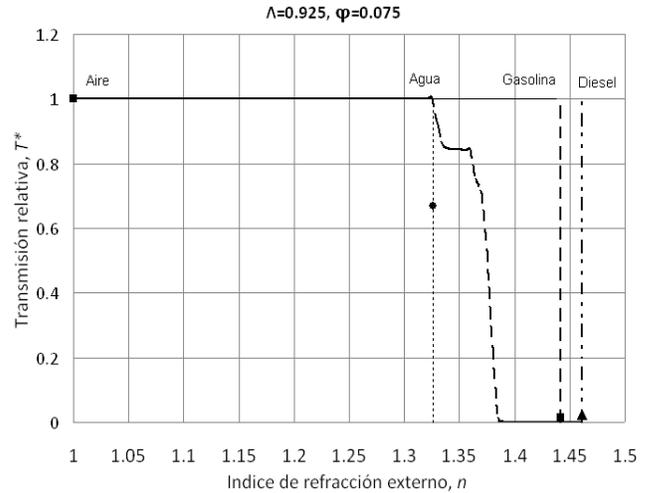
**Figura 7. Voltaje de salida del sensor vs posición relativa de las fibras  $\Lambda$  cuando el sensor esta en el aire.**

Las distancias adimensionales  $\Lambda$  las cuales corresponden a los picos observados en la transmisión óptica en el aire están dadas en la tabla 2.

Pico de transmisión N.	Distancia Adimensional, $\Lambda$
1°	0.70
2°	0.86
3°	0.925
4°	0.95
5°	0.975

**Tabla 2. Picos de transmisión**

Los datos experimentales en la transmisión relativa del sensor para aguas destilada, gasolina y diesel están graficados en la figura 8 para una distancia relativa de  $\Lambda=0.925$  y para un diámetro adimensional de las fibras de  $\Phi=0.075$ . Para estos datos es posible llegar a la conclusión de que se puede discriminar claramente entre aire-gasolina, aire-diesel, agua-gasolina y agua-diesel a bajo las condiciones previamente descritas.



**Figura 8. Resultados teoricos (.....) y experimentales bajo  $\Phi=0.075$ ,  $N_{Aentrada}=0.485$ ,  $N_{Asalida}=0.095$ . Los puntos experimentales corresponden a agua destilada (•) gasolina (■) y diesel (▲).**

**CONCLUSIONES.**

Como se mostró se investigo teórica y experimentalmente la respuesta de un sensor refractométrico de fibra óptica basado en un elemento de detección semicilíndrico de plástico que mide el índice de refracción de un medio circundante. Particularmente se investigo la transmisión para medios externos como aire, gasolina, agua y diesel con el propósito de integrarlo en el sistema de control de algún vehículo que utilice combustibles como los mencionados para medir el nivel dentro de un tanque de algún vehículo que utilice estos combustibles. Investigamos cuales son los parámetros óptimos en los cuales se puede tener una discriminación confiable entre aire-gasolina y aire-diesel de tal forma que se puede tensar en un arreglo vertical de fibras ópticas para poder tener una medición completa de los tanques.

**REFERENCIAS.**

[7] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum, *POF Handbook. Optical Short Range Transmission Systems*, Springer, Berlin Heidelberg, 2008.

[8] Breyer, F., Lee, J., Randel S., and Hanik, N., "Comparison of OOK- and PAM-4 Modulation for 10 Gbit/s Transmission over up to 300 m Polymer Optical Fiber," *Optical Fiber Communications National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on, 24-28 Feb. 2008*, pp. 1-3.

- [9] Ciocan, C. “The Domestic Digital Bus System (DB2). A Maximum of Control Convenience in Audio Video,” *Consumer Electronics*, 1990. ICCE 90. *IEEE* 1990 International Conference on, 6-8 Jun. 1990, pp. 170 – 171.
- [10] Guglielmetti, L., “Standardizing Automotive Multimedia Interfaces”, *IEEE Spectrum*, Apr.-Jun. 2003, pp. 76–78.
- [11] Cena, G. and Valenzano, A., “Performance Analysis of Byteflight Networks,” *Factory Communication Systems*, 2004, Proceedings. 2004 *IEEE* International Workshop on, 22-24 Sept. 2004, pp. 157–166.
- [12] Arcos M., Chana, D., Contreras, K. et al., “Design and Fabrication of a Novel Plastic Optical Sensor for Temperature Measurement Using a Chemical Transducer,” “*Plastic Optical Fibers*, 2007, Proceedings. 16th International Conference on, 10-12 Sept. 2007, p. 189.
- [13] Arrue, J., Jimenez, F., Aldabaldetrekú G. *et al.*, “Analysis of the Parameters of Tapers in graded-Index POF for the Design of a Refractive-Index Sensor and Other Applications,” “*Plastic Optical Fibers*, 2007, Proceedings. 16th International Conference on, 10-12 Sept. 2007, pp. 238-241.
- [14] Poisel, H., Meedt, H., and Niewisch, J., “Fiberoptic Liquid-Level Sensor – FOLLS,” *Plastic Optical Fibers*, 2007, Proceedings. 16th International Conference on, 10-12 Sept. 2007, pp. 178-181.
- [15] N. G. Sultanova, S. N. Kasarova, C. D. Ivanov, and I. D. Nikolov, “Refractive data of optical plastics for laser applications,” *International Conference on Holography, Optical Recording, and Processing of Information*, vol. 6252 of *Proceedings of SPIE*, pp. 1–5, Varna, Bulgaria, May 2006.
- [16] Khotiaintsev, K. “*Desarrollo de una aplicación de simulación numérica para sensores refractométricos ópticos*,” Tesis para obtener el grado, Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Pue., México, 2005 .
- [17] Svirid V., Khotiaintsev S. and Swart, P. “Linear and Steplike Characteristics in an Optical Fiber Refractometric Transducer with Hemispherical Detection Element,” *Optical Engineering*, vol. 42, no. 5, 2003, pp. 1383-1389.
- [18] <http://www.mitsubishicorp.com/us/en/bg/ps/fo.html>

## VII. AUTORES

**Dr. Serguei Khotiaintsev** recibió el grado de Maestro en Ciencias y el grado de Doctor de la Facultad de Ingeniería en Radio del Instituto Politécnico de Kiev (hoy en día Universidad Nacional Tecnológica de Ucrania). Actualmente es Profesor de Tiempo Completo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es autor o co-autor de más de 120 artículos, algunos libros y tiene 19 patentes. El Dr. Khotiaintsev es *Senior Member* del IEEE.

**Enrique Llanito Caudillo** estudió Ingeniería en Telecomunicaciones en la Universidad Nacional Autónoma de México.

**Ing. Selene Pérez García** obtuvo su título de Ingeniería en Telecomunicaciones en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Actualmente es estudiante de tiempo completo de la maestría en Ingeniería Eléctrica en la UNAM.

**Ing. Jordi Morales Farah** recibió el grado de ingeniero en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

## Estudio de las fibras ópticas de plástico como medio de transmisión y como transductores de los sensores ópticos.

**Alumna:** Selene Pérez García  
**Tutor:** Dr. Serguei Khotiaintsev

MAESTRIA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.  
OPCIÓN: TELECOMUNICACIONES

Los sensores de fibras ópticas ofrecen muchas ventajas sobre los sensores mecánicos, eléctricos y otros sensores. Anteriormente se usaban fibras ópticas de silicio en los sensores principalmente, recientemente, el avance significativo en la calidad de las fibras ópticas de plástico (POF) ha generado el desarrollo de muchas nuevas aplicaciones para la transmisión óptica y el sensado óptico.

En el trabajo de tesis se desarrollo de un sensor refractométrico que discrimina entre gasolina, agua y aire, este sensor utiliza un elemento transductor semicilíndrico que está hecho de PMMA, el cual se muestra en figura 1a. El principio de operación del mismo se basa en el fenómeno de la reflexión total interna de la luz, y se basa en la medición de la intensidad de la reflexión interna parcial y total de la luz en la superficie del transductor que se encuentra en contacto con el medio circundante. El correspondiente coeficiente de reflexión es función de los índices de refracción de los dos medios en contacto. Por tanto dicho coeficiente es entonces una medida del índice de refracción del medio externo.

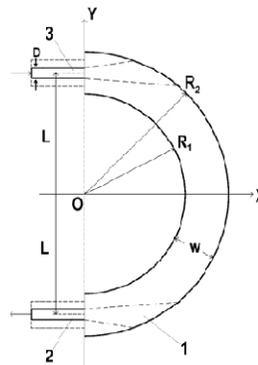
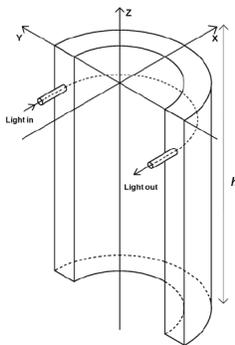


Figura 1a. Vista esquemática del sensor. Figura 1b. Corte transversal del sensor.

En la figura 1b, se muestra un modelo geométrico del sensor, en la figura se muestra un corte transversal del elemento de detección y las fibras. Una de ellas es la fibra de entrada y la otra la de salida. La luz es acoplada vía la fibra de entrada al interior del elemento, la luz se propaga por medio de reflexiones totales internas hasta que llega a la fibra de salida y llega a través de esa fibra a un fotómetro remoto. Cuando el elemento está en el aire la reflexión es un poco más potente (bajo cierta posición de las fibras relativa en el elemento de detección), cuando el elemento está inmerso en un líquido la reflexión en la superficie del cilindro disminuye o se desvanece por completo.

### Experimento.

Se realizó un experimento para discriminar entre agua, aire y gasolina, la siguiente figura muestra una foto del mismo, en él podemos observar el sensor acoplado a dos fibras ópticas, para la realización se utilizó un elemento semicilíndrico con un radio externo de 20mm y un radio interno de 14 mm, como fuente de luz se utilizó un LED infrarrojo de GaAlAs de  $\lambda=940$  nm, el LED es excitado por una señal triangular generada por un generador de señales con una amplitud de 14 mA a una frecuencia de 100 Hz, se utilizó un fotodiodo conectado a la fibra receptora de Ge el cual tiene un área sensitiva de  $25 \text{ mm}^2$ .

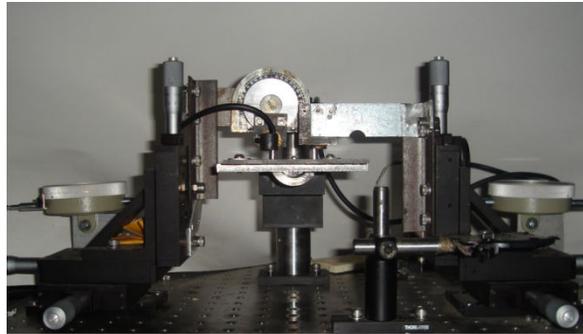


Figura 2. Diagrama del experimento.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura siguiente, en el cual se muestra una gráfica de índice de refracción vs transmisión relativa del elemento inmerso en un medio externo, en este caso se grafico aire con un índice de refracción de 1, gasolina con un índice de refracción de 1.442 y agua con un índice de refracción de 1.33, de acuerdo a los resultados obtenidos pudimos observar que la posición relativa de las fibras para que éstas estén acopladas y puedan discriminar entre estos tres medios externos es de 0.925.

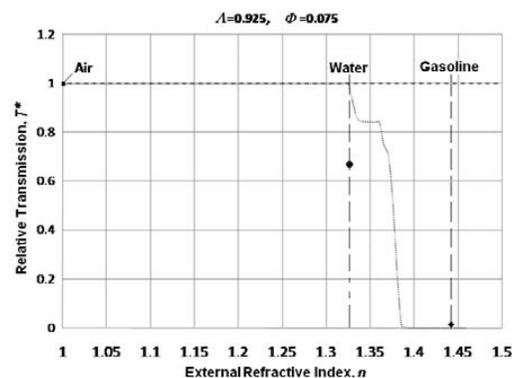


Figura 3. Resultados obtenidos experimentalmente.

### CONCLUSIONES.

Como se mostró se investigó teórica y experimentalmente la respuesta de un sensor refractométrico de fibra óptica basado en un elemento de detección semicilíndrico de plástico que mide el índice de refracción de un medio circundante. Particularmente se investigó la transmisión para medios externos como aire, gasolina y agua con el propósito de integrarlo en el sistema de control de algún vehículo que utilice combustibles como los mencionados para medir el nivel dentro de un tanque de algún vehículo que utilice estos combustibles. Investigamos cuales son los parámetros óptimos en los cuales se puede tener una discriminación confiable entre aire-gasolina de tal forma que se puede tensar en un arreglo vertical de fibras ópticas para poder tener una medición completa de los tanques.

### REFERENCIAS.

- [19] Arcos M., Chana, D., Contreras, K. et al., "Design and Fabrication of a Novel Plastic Optical Sensor for Temperature Measurement Using a Chemical Transducer," *Plastic Optical Fibers, 2007*, Proceedings. 16th International Conference on, 10-12 Sept. 2007, p. 189.
- [20] Arrue, J., Jimenez, F., Aldabaldetrekú G. et al., "Analysis of the Parameters of Tapers in graded-Index POF for the Design of a Refractive-Index Sensor and Other Applications," *Plastic Optical Fibers, 2007*, Proceedings. 16th International Conference on, 10-12 Sept. 2007, pp. 238-241.
- [21] Poisel, H., Meedt, H., and Niewisch, J., "Fiberoptic Liquid-Level Sensor – FOLLS," *Plastic Optical Fibers, 2007*, Proceedings. 16th International Conference on, 10-12 Sept. 2007, pp. 178-181.
- [22] virid V., Khotiaintsev S. and Swart, P. "Linear and Steplike Characteristics in an Optical Fiber Refractometric Transducer with Hemispherical Detection Element," *Optical Engineering*, vol. 42, no. 5, 2003, pp. 1383-1389.



## CARACTERÍSTICAS REFRACTOMÉTRICAS DE UN ELEMENTO DE DETECCIÓN ÓPTICO SEMICILÍNDRICO PLÁSTICO

S. Pérez García, A. Beltrán Hernández, S. Khotiaintsev

Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería.  
Universidad Nacional Autónoma de México.

[selene\\_pg@comunidad.unam.mx](mailto:selene_pg@comunidad.unam.mx), [albelher@gmail.com](mailto:albelher@gmail.com), [sergeik@hotmail.com](mailto:sergeik@hotmail.com)

### RESUMEN:

En este trabajo se analizan las propiedades refractométricas de un elemento transductor óptico de forma semicilíndrica; la propagación de la luz por medio de las reflexiones internas en serie en este elemento es una función del índice de refracción del medio externo. La alimentación del elemento se realiza remotamente de una fuente de luz no coherente: un diodo emisor de luz (*LED*) vía una fibra óptica, la otra fibra óptica conecta el transductor con un fotómetro.

El análisis desarrollado se hace desde el punto de vista de su utilización en los sensores de índice de refracción de sustancias líquidas<sup>1</sup>, así como en forma de arreglos en medidores de nivel de líquidos<sup>2</sup>. El enfoque se hace sobre los elementos ópticos de plástico, en virtud de que es más sencillo y económico fabricar este tipo de elementos de materiales plásticos. Se realiza un análisis de propagación de la luz en este elemento utilizando las aproximaciones de la óptica geométrica mediante el trazado de rayos en tres dimensiones.

Con este análisis, se obtiene la respuesta del transductor al índice de refracción del medio externo en función de los parámetros geométricos de este así como de las constantes de los materiales. Adicionalmente se obtienen las relaciones para la resolución vertical del sensor en función de varios parámetros de diseño.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las fibras ópticas de plástico (*POF*) se han desarrollado en las últimas décadas. Sus principales desarrollos se han dado en la transmisión de datos en redes de área local como FTTH (*Fiber To The Home*) y a bordo de vehículos: autos, camiones, etc. Una de las ventajas de redes basadas en fibras de plástico es que utilizan componentes simples y poco costosos, son de fácil manejo y conexión debido a que sus núcleos son relativamente grandes comparados con las fibras de vidrio (*silice*). Además, operan en el rango de la luz visible, tienen gran apertura numérica, los equipos de pruebas son de uso simple y económico, tienen gran flexibilidad y resistencia a curvaturas y vibraciones, son de fácil fabricación, e igual que las fibras de vidrio son inmunes a interferencias electromagnéticas y no producen cortocircuitos y chispas que puedan ocasionar fuego y explosiones. Por otro lado, tienen una alta atenuación con respecto a las fibras de cuarzo por lo que la longitud de las líneas de comunicación óptica con este tipo de fibras está limitada a unos cientos de metros<sup>3</sup>.

Actualmente existen estándares para las comunicaciones de diferentes componentes a bordo de vehículos, tales como DB2, Byteflight y MOST<sup>4</sup>; existe un gran interés en introducir las redes de fibra óptica de plástico a bordo de vehículos y complementar la comunicación entre diferentes componentes a bordo del vehículo con sensado óptico de tal manera que la señal pueda viajar a través de las mismas fibras que sirvan para otros propósitos (*transmisión de datos*) dentro del mismo.

Los medidores de nivel de diferentes líquidos a bordo de vehículos presentan un sector importante de los sensores que se utilizan en los medios de transporte. En este trabajo se presenta un sensor óptico de tipo refractométrico con de un elemento transductor óptico de forma semicilíndrica, el cual se puede implementar fácilmente en forma de arreglos verticales de muchos transductores



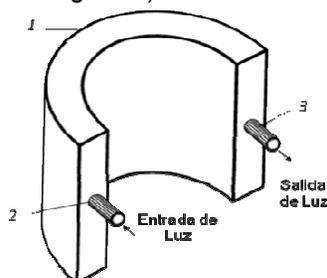
VII encuentro  
Participación de la  
Mujer  
en la Ciencia



individuales, para la medición de nivel de líquidos. Además, este transductor permite la discriminación entre diferentes líquidos, tales como la gasolina y agua en un tanque de automóvil.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SENSOR

El sensor (*mostrado en la Figura 1*) está formado por un elemento transductor óptico semicilíndrico de plástico (1) conectado a un par de fibras ópticas plásticas: una fibra transmisora (2) y otra receptora (3). La luz de una fuente óptica no coherente (*no mostrada en la Figura*) es acoplada de la fibra transmisora y pasa por medio de reflexiones internas en serie (*parciales o totales*) a través del elemento óptico de detección, luego una parte de la luz se acopla a la fibra óptica receptora y llega a un fotómetro (*no mostrado en la Figura 1*).

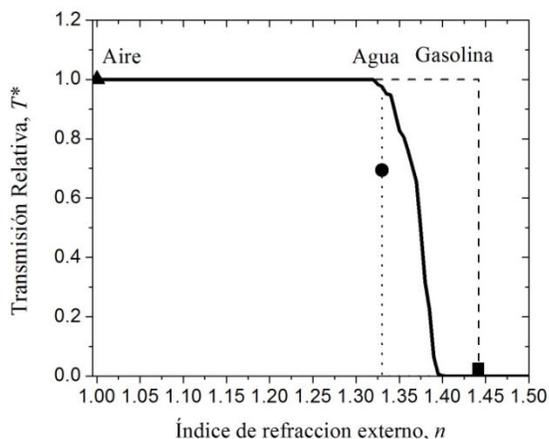


**Figura 1. Elemento transductor óptico semicilíndrico.**

Debido a que la luz viaja por medio de reflexiones internas en el elemento transductor de detección, la intensidad de la luz en la salida del elemento es una función del índice de refracción del medio externo. Cuando el elemento se encuentra en aire la reflexión interna es más potente (*las fibras ópticas deben estar en cierta posición*) y cuando el elemento está inmerso en un líquido la reflexión en la superficie del cilindro disminuye o se desvanece por completo. La magnitud de la señal de salida relacionada a la magnitud de la señal cuando el elemento se encuentra en el aire representa el índice de refracción del medio exterior.

$$T^* = \frac{I_{out}(n)}{I_{in\ air}} = f(n) \quad (1)$$

Donde  $I_{out}(n)$  e  $I_{in\ air}$  son la intensidad de la luz de salida cuando el elemento transductor se encuentra en el líquido y en el aire, respectivamente. De esta manera, la característica  $T^*$  (*Transmisión Relativa*) no incluye la intensidad de la luz de entrada la cual no puede ser medida experimentalmente<sup>2</sup>.

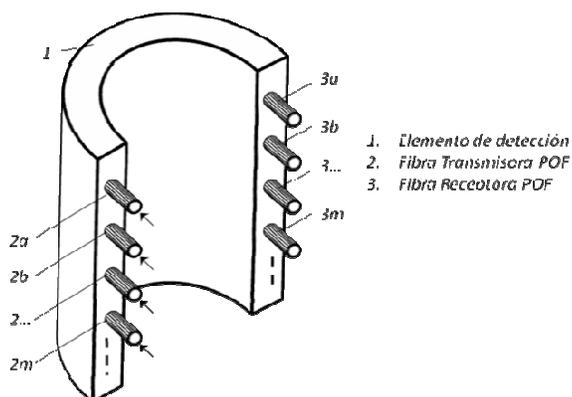


**Figura 2. Resultados teóricos (-) y experimentales bajo,  $\Lambda=0.93$ ,  $NA_{entrada}$ ,  $NA_{salida}=0.5$ . Los puntos experimentales corresponden a: aire (▲), agua destilada (●) y gasolina (■).**



Se realizó un análisis teórico de propagación de la luz en el elemento óptico semicilíndrico utilizando un modelo matemático basado en la óptica geométrica mediante el trazado de rayos en tres dimensiones. Los resultados: la transmisión relativa del transductor vs. el índice de refracción externo se presenta en la Figura 2 en forma gráfica. Se puede observar que a diferentes índices de refracción corresponde diferente transmisión relativa  $T^*$ , lo que permite la discriminación entre diferentes líquidos.

La magnitud de la transmisión relativa,  $T^*$ , también es fundamento para la medición de nivel de líquido con un arreglo vertical de estos transductores como se muestra la Figura 3. En este caso, la salida del sensor es interpretada de una manera binaria.



**Figura 3. Diseño conceptual de un sensor de nivel de líquidos, de tipo discreto multipunto.**

Para medir el nivel de líquido en un tanque, se requiere un arreglo vertical de transductores; para evitar utilizar muchos elementos individuales de detección en este trabajo utilizamos un solo semicilindro que sea tan largo como la altura del tanque. Cada par de fibras transmisora y receptora conjuntamente con un segmento respectivo del semicilindro, constituyen un transductor refractométrico. Cada fibra óptica transmisora estará conectada a su propia fuente de luz (*un LED*) y cada fibra óptica receptora a un foto receptor (*fotoómetro*). Se pondrán tantos pares de fibras como requiera la resolución de la medición de nivel en el tanque de gasolina. En el caso de arreglos grandes de transductores se utiliza la conmutación de las fuentes y foto receptores para reducir el número total de estos elementos en el sensor.

### 3. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

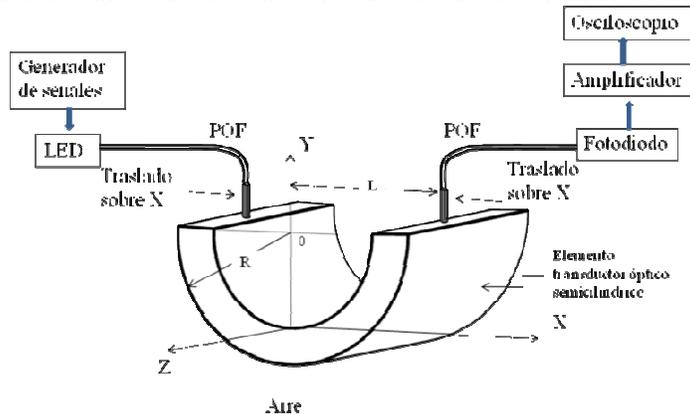
Se investigaron experimentalmente las características del sensor, el diagrama del experimento se presenta en la Figura 4. Se utilizaron dos tramos de fibra óptica de Polimetilmetacrilato (*PMMA*) acoplados al elemento de detección semicilíndrico. La fibra óptica es de una apertura numérica  $NA=0.5$ , diámetro del núcleo  $d = 980 \mu\text{m}$  y diámetro total (*incluyendo el recubrimiento y la capa protectora*)  $D = 2.2 \pm 0.07 \text{ mm}$ . Ambas fibras ópticas fueron sujetadas en su extremo a dos unidades de desplazamiento de precisión en tres ejes, esto permitió tener un movimiento libre de la fibra en los ejes X-Y-Z.

El elemento transductor de forma semicilíndrica es de un radio  $R=20 \text{ mm}$ . Se instaló un LED infrarrojo de arseniuro de galio-aluminio,  $\text{GaAlAs}$  como fuente óptica con una divergencia de haz de  $40^\circ$ . Para excitar el LED se utilizó un generador de señales con una onda triangular de amplitud 4 volts pico-pico y frecuencia de 100 Hz (*la forma triangular de la onda nos permitió monitorear la ausencia de la saturación en el foto receptor*). La fuente de luz se acoplo al extremo libre de una fibra óptica.

Para detectar la señal proveniente de la fibra óptica se usó un foto receptor con un foto diodo de germanio con un área de sensibilidad de  $25 \text{ mm}^2$ .

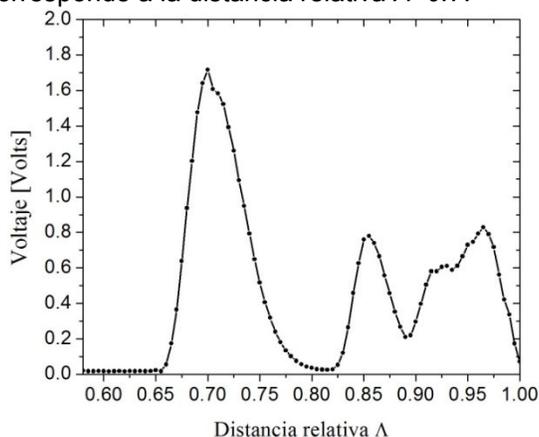


Para la caracterización del sensor en el aire se posicionaron las fibras ópticas a la mínima distancia relativa posible  $\Lambda=L/R=0.58$ . Tal distancia  $\Lambda$  se incrementó gradualmente con incrementos de  $0.005\Lambda$ , desde el plano de simetría del sensor hasta el borde del elemento semicilíndrico ( $\Lambda=0.99$ ).



**Figura 4. Diagrama del experimento.**

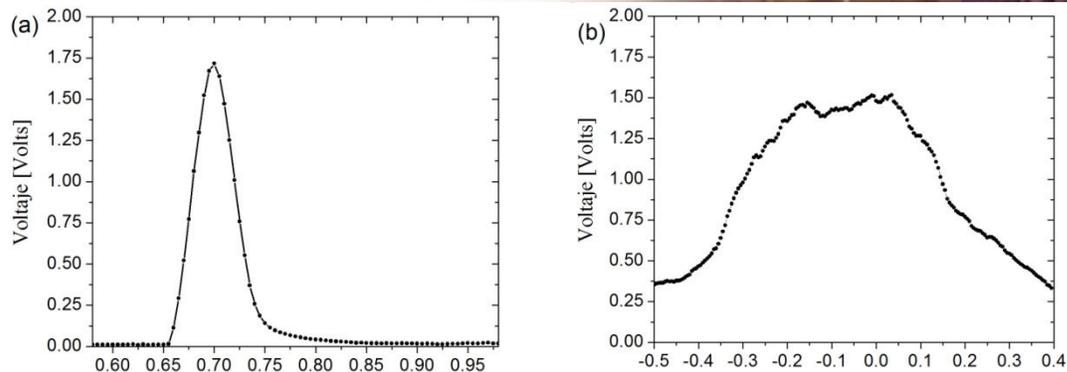
Se posicionaron las fibras ópticas para medir la intensidad de la señal a la salida del transductor. Se obtuvo la curva de calibración del sensor para conocer el punto donde se presenta un acoplamiento máximo entre las dos fibras ópticas. Los resultados se presentan en forma gráfica en la Figura 5. Se ve que existen algunas distancias  $\Lambda$  que corresponden a un eficiente acoplamiento. El acoplamiento máximo corresponde a la distancia relativa  $\Lambda=0.7$ .



**Figura 5. Señal de salida del sensor en función de la posición relativa de las fibras ópticas,  $\Lambda$  con aire como medio externo.**

Obtenido el punto de máximo acoplamiento se investigó la forma y el tamaño del haz en dos dimensiones, esto para determinar la posible distancia entre los pares de las fibras ópticas, en un arreglo para la medición de nivel de líquidos. Con este objetivo, se realizó un barrido de la fibra óptica receptora en los ejes X-Z sobre la superficie de salida del elemento transductor. Los resultados se presentan en la Figura 6, en donde se ve que el haz es asimétrico con una distribución gaussiana sobre los dos ejes X y Z. Los tamaños reales del haz son de  $x=0.8$  mm y  $z=10.7$  mm. Este último valor delimita la distancia entre los pares de las fibras ópticas a lo largo del eje z, en el caso de un arreglo para la medición de nivel de líquidos.

Los datos presentados en las figuras 5 y 6 es un resultado estadístico obtenido de 10 mediciones individuales realizadas en cada posición de las fibras ópticas.



Distancia relativa de la fibra receptora  $\Lambda$ . Fibra transmisora  $\Lambda=0.7$  Distancia relativa  $\Gamma$  de la fibra receptora.  $\Gamma=0$  en la fibra transmisora

**Figura 6. Señal de salida del sensor: (a) Señal vs. la distancia relativa de la fibra óptica receptora  $\Lambda$  en el eje X, fibra óptica transmisora fija en  $\Lambda=0.7$ ; (b) Señal vs. la distancia relativa de la fibra óptica receptora  $\Lambda$  en el eje Z.**

#### 4. CONCLUSIONES

Se mostró la posibilidad de utilizar un elemento óptico en forma de semicilindro como un transductor refractométrico. Se implementó una maqueta funcional de este sensor con un elemento transductor semicilíndrico de plástico (PMMA). Este transductor se puede utilizar en forma individual para la medición de índice de refracción de varios líquidos y en forma de arreglos verticales, para la medición de nivel de líquidos, tales como la gasolina o diesel en los tanques de automóviles, camiones, etc. En el caso de arreglos, la distancia mínima entre los transductores depende de la apertura angular de las fibras ópticas transductora y receptora; en nuestro caso de fibras ópticas de PMMA con una apertura numérica de 0.5 la distancia mínima es de 10.7 mm. En la práctica, un sensor de nivel de líquido de este tipo tendrá una definición en la medición de nivel de orden de 12 mm.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Facultad de Ingeniería y de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a través del proyecto PAPIIT IN114109, así como el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través del proyecto 026106. S. P. G. y A. B. H. agradecen las becas proporcionadas por la Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP) de la UNAM.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. S. Khotiaintsev, E. Llanito-Caudillo, S. Perez-Garcia, J. Morales-Farah, "Optical-Fiber Refractometric Sensor with Semi-Cylindrical Optical Detection Element for Measuring the Level of Gasoline", CERMA '09, IEEE, 2009, pp. 468-473.
2. V. Svirid, S. Khotiaintsev, P. Swart, "Linear and Steplike Characteristics in an Optical Fiber Refractometric Transducer with Hemispherical Detection Element", Optical Engineering, Vol. 42, 5, 2003, pp. 1383-1389.
3. O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum, *POF Handbook. Optical Short Range Transmission Systems*, Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
4. S. Khotiaintsev, E. Llanito-Caudillo, S. Perez-Garcia, J. Morales-Farah, "Discrete POF liquid-level sensor for measuring the level of gasoline and detecting water in automobile tanks", 18th International Conference on Plastic Optical Fibers, Australia, September, 2009.

# Plastic optical fiber multipoint liquid-level sensor with single semi-cylindrical detection element

Sergei Khotiaintsev, Selene Pérez-García, Alfredo Beltrán-Hernández, Enrique Llanito-Caudillo  
 Dept. of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, National Autonomous  
 University of Mexico, Av. Universidad 3000, Mexico, D. F., C. P. 04510, Mexico

## ABSTRACT

We present an optical fiber liquid-level sensor which employs an array of plastic optical fibers coupled to a single semi-cylindrical refractometric detection element of plastic. The sensor measures the level of liquids in a discrete way and also is capable of discriminating between different liquids (such as gasoline and water) in a tank or reservoir.

**Keywords:** Specialty optical fibers, plastic optical fibers, optical fiber sensors, liquid-level measurement

## 1. INTRODUCTION

Plastic optical fibers (POF) has become an important transmission medium for robust short-distance data communications in a variety of applications such as Fiber To The Home (FTTH) systems, Multimedia Communications in Cars (MOST) and Industrial automation Networks (PROFINET).<sup>1</sup> The biggest advantages of POF are their large core, simplicity of handling and a low system cost.<sup>2</sup> Therefore, it is attractive to complement POF-based communication systems with a variety of POF-based sensors of different physical quantities.<sup>3-5</sup> Here we present an optical fiber discrete-type liquid-level sensor which employs an array of POFs and a single relatively long detection element. We investigate the characteristics of this sensor under different parameters of optical fibers and sensor geometry. In addition, we investigate the possibility of discriminating between different liquids (such as gasoline and water) in a tank or reservoir.

## 2. CONCEPTUAL DESIGN OF THE SENSOR

The present optical discrete-type liquid-level sensor consists of a long semi-cylindrical transparent detection element of plastic, which is connected to  $M$  symmetrically placed pairs of POFs as shown in Fig. 1. We use a hollow segment of semi-cylinder for detection element in order to reduce its mass and volume, but a solid semi-cylinder can be used for the same purpose

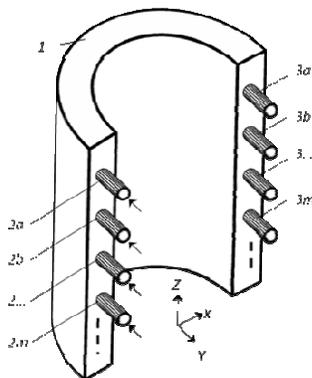


Figure 1. Conceptual design of the sensor: (1) - detection element of plastic, (2) and (3) - transmitting and receiving POFs, respectively.

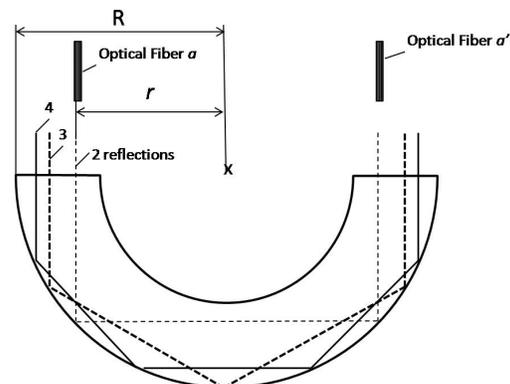


Figure 2. Light propagation in  $xy$  plane of the detection element for different parameter  $r$ .

as well. Each pair of POFs ( $2a-3a$ ,  $2b-3b$ , ...,  $2m-3m$ ) together with the section of the semi-cylinder which lies between them constitutes an elementary refractometric transducer. The POFs of each pair are optically coupled via the internal reflection of light at the cylindrical interface between the element's material and external medium. The internal reflection at

the interface is a function of the refractive index of the two media. The optical transmission is high when the elementary transducer is in the air and it is low when the elementary transducer is in a liquid. The difference in optical transmission is exploited for the discrimination between the two external media: the air and liquid. The individual transducers of the array are interrogated in sequence (via the respective POFs) using the remote optical transmitters and receivers (not shown in Fig. 1). The liquid level is associated with the lowest transducer of the array which exhibits high optical transmission.

It is possible to see in Fig. 2 that the optical coupling of the two optical fibers takes place under certain distance of the optical fibers from the cylinder axis,  $r$ . Therefore, the optical transmission varies with  $r$  and there are several transmission zones which correspond to different parameter  $r$ . In different transmission zones, the optical rays have significantly different angles of incidence  $\theta_i$  at the cylindrical surface of the element. This property can be exploited for the discrimination between two different liquids of different refractive index (which results in different critical angle  $\theta_c$ ). It requires two pairs of transmitting-receiving POFs in the same elementary transducer for the discrimination of the liquids. The fibers of each pair have to be placed at different dimensionless distance from the element's axis  $\Lambda=r/R$ ,  $R$  is the external radius of the detection element. Table 1 presents the considerations for the choice of the angle of incidence  $\theta_i$  and dimensionless distance  $\Lambda$  for some particular cases.

Table 1. Considerations for the choice of angle of incidence  $\theta_i$  and dimensionless distance  $\Lambda$ .

	Function	Angle of incidence $\theta_i$	Distance $\Lambda$
1.	Discrimination between the air and water	$\theta_{c \text{ air}} < \theta_i < \theta_{c \text{ water}}$ ( $42.6^\circ < \theta_i < 64.0^\circ$ )	0.71 or 0.87 (2 or 3 <i>serial internal reflections</i> )
2.	Discrimination between the air and/or water, and gasoline	$\theta_{c \text{ water}} < \theta_i < \theta_{c \text{ gasoline}}$ ( $64.0^\circ < \theta_i < 76.5^\circ$ )	0.92 or 0.95 or 0.97 (4, 5 or 6 <i>serial internal reflections</i> )
3.	Discrimination between the air and gasoline - Not necessary, because condition 2 is more strict	$\theta_{c \text{ air}} < \theta_i < \theta_{c \text{ gasoline}}$ ( $42.6^\circ < \theta_i < 76.5^\circ$ )	

The number of elementary transducers in the array  $M$  is depends on the height of particular tank or reservoir and the required resolution in accessing the level of liquid. The total number of optical fibers in the sensor is  $2M$  in the liquid-level measurement mode and  $4M$  when the discrimination between two different liquids is implemented in addition to the liquid level measurement. As some applications require hundreds of elementary transducers, the total number of optical fibers in the sensor may be very large. The operation of the detection element in the reflection mode requires only a half of the optical fibers necessary in the transmission mode, but instead directional optical couplers are necessary for the separation of the input and output optical radiation. We envision that with the advance of new types of optical fibers, such as multi-core POFs with dozens or hundreds of cores in the same cladding and POFs of small bending radius, the size of the optical fiber bundles would be reasonably small even in large arrays.

### 3. RESULTS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY

We found the properties of the elementary transducer by numerical ray-tracing of light propagation in the detection element, using the concepts of the geometrical optics. The mathematical model, ray-tracing algorithm and respective computer program were reported previously.<sup>6-8</sup> Following are results obtained for the detection element and optical fibers of polymethylmethacrylate (PMMA) of the refractive index  $n=1.4828$  @  $\lambda=920$  nm in the case of symmetric position of optical fibers of a dimensionless core diameter  $\Phi=2a/R$ ,  $a$  is the radius of the optical fiber core.

The propagation of light in the semi-cylindrical detection element is illustrated in Fig. 3, which shows two orthogonal projections of the element and light trajectories in it. Due to the curvature of surface in one direction, the element has focusing properties in  $xy$  plane but no focusing properties in  $z$  direction. Therefore, the optical beam spreads in  $z$  direction and only small part of it is collected by the receiving optical fiber at the element's output. However, the respective optical loss is generally acceptable because other losses are not too large and the optical power budget of the sensor can be significantly superior to these and other losses.

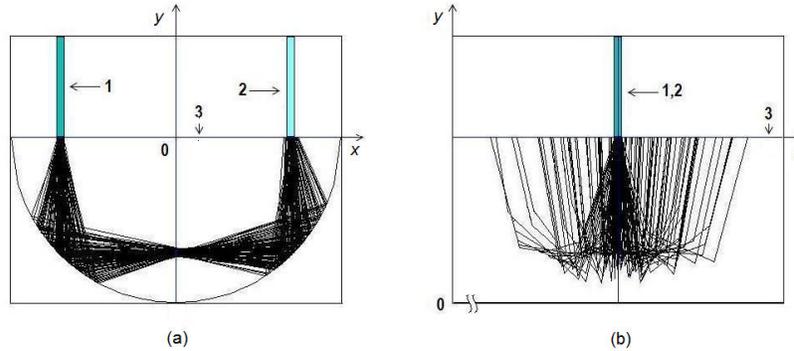
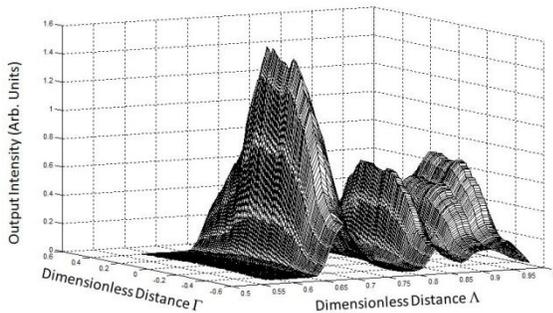


Figure 3. Simulated light trajectories in the semi-cylindrical element under  $\Phi=0.049$ ,  $\Lambda=0.7$  and  $NA_1=NA_2=0.5$ : (a) –  $xy$  projection, (b) –  $yz$  projection. (1) and (2) are the transmitting and receiving POF, respectively, and (3) is the detection element.



The existence of a series of transmission zones in the element and the spread of the optical beam in  $z$ -direction was verified experimentally by scanning the output facet of the detection element with the optical fiber tip and measuring the received light intensity. The respective data are shown in Fig. 4.

The established zone nature of optical transmission in the element confirms the possibility of discriminating between different liquids with optical fiber pairs placed at different dimensionless distance  $\Lambda$  in the transducer.

Figure 4. Measured light intensity distribution over the output facet of the detection element for  $\Phi_1=\Phi_2=0.049$ ,  $NA_1=NA_2=0.5$  and a symmetric variation of the parameter  $\Lambda_1=\Lambda_2$ .

The theoretical data showing the relative optical transmission  $T^*=I_{out}(n)/I_{out\ air}$ ,  $I_{out}(n)$ ,  $I_{out\ air}$  is the output light intensity when the sensor is in the air and liquid, respectively, vs. the external refractive index  $n$  for various dimensionless distances  $\Lambda$  and  $\Phi=0.049$ ,  $NA_1=NA_2=0.5$  are plotted in Fig. 5. The graphs in Fig. 5 show that there is a sharp step in optical transmission  $T^*$  which can be exploited for the discrimination between the air and a liquid. In addition, the step position on  $n$ -axis can be selected in such a way as to discriminate between the liquids of different refractive index. For example, for the discrimination between the gasoline ( $n=1.442$ ) and water ( $n=1.333$ ) which can be beneath the gasoline in a tank, a step in optical transmission at about  $n=1.4$  is necessary. The graphs for  $\Lambda=0.925$  and  $\Lambda=0.95$  show the required behavior.

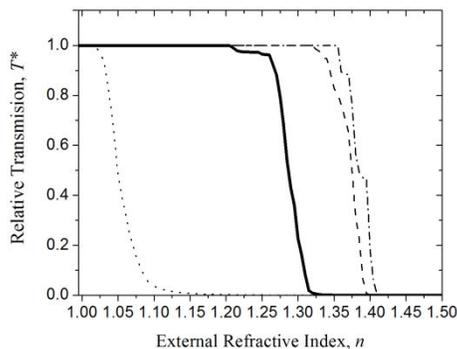


Figure 5. Theoretical relative transmission  $T^*$  vs. external refractive index  $n$  for  $\Phi=0.049$ ,  $NA_1=NA_2=0.5$  and different dimensionless distance:  $\Lambda=0.7$  ( $\cdots$ ),  $0.855$  ( $-$ ),  $0.925$  ( $- - -$ ),  $0.96$  ( $- . -$ )

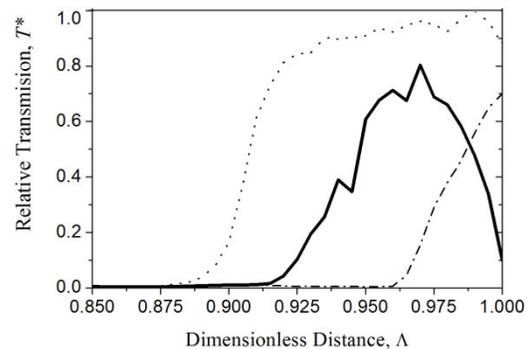


Figure 6. Experimental relative transmission  $T^*$  vs. dimensionless distance  $\Lambda$  for  $\Phi=0.049$ ,  $NA_1=NA_2=0.5$  and different external media: air ( $- - -$ ), water ( $\cdots$ ), gasoline ( $-$ ) and diesel fuel ( $- . -$ ).

The experimental relative transmission  $T^*$  against the dimensionless distance  $\Lambda$  for different external media is shown in Fig. 6. These data correlate well with the predicted behavior and can be used for selecting the parameter  $\Lambda$  for particular application of the transducer.

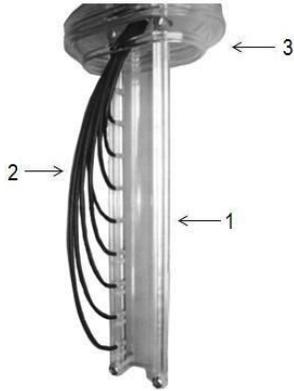


Figure 7. The prototype plastic optical fiber liquid-level sensor operating in the reflection mode. (1) – detection element, (2) – POFs, (3) - flange.

The prototype liquid-level sensor was implemented in the reflection operational mode (Fig. 7). It successfully measured the level of various liquids during numerous cycles of filling and emptying the tank where it was installed.

#### 4. CONCLUSIONS

The sensor described in this work can measure the level of liquids and, simultaneously, discriminate between different liquids in a tank or reservoir. It is a discrete-type sensor which employs an array of elementary refractometric transducers which are implemented in a single detection element of plastic in a form of a relatively long semi-cylinder. The transducers of the array are coupled to the remote optical transmitters and receivers via the plastic optical fibers. The use of a single detection element of plastic makes the sensor significantly simpler and cheaper than the existing arrays of point transducers of silica glass. New types of plastic optical fibers such as multi-core fibers would allow the designers to reduce the total amount of the optical fibers in this sensor. This would contribute to its competitive advantages over the existing sensors.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the support of the Faculty of Engineering and the General Directorate for Academic Personnel Affairs (DGAPA) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) in a form of Research grant IN114109 as well as the support of the National Science and Technology Council of Mexico (CONACYT) in a form of Research grant 026106. S. P. G. and A. B. H. acknowledge the scholarships provided to them by the Coordination of Graduate Studies (CEP) of the UNAM. E. L. C. and A. B. H. acknowledge the scholarships provided to them by the DGAPA-UNAM.

#### REFERENCES

- [1] Breyer, F., Lee, S. C. J., Randel, S. and Hani, N., "PAM-4 signaling for gigabit transmission over standard step-index plastic optical fibre using light emitting diodes," 34<sup>th</sup> European Conf. on Optical Communication 1-2 (2008).
- [2] Ziemann, O. and Poisel, H., "Short distance optical connections for home networks, sensing and mobile systems," in Optical Fiber Communication Conf. 1-3 (2007).
- [3] Jiménez, F., Arrue, J., Aldabaldeireku, G., Duran, G., Zubia, J., Ziemann, O. and Bunge, C. A., "Analysis of a plastic optical fiber-based displacement sensor," Appl. Opt. 46, 6256-6262 (2007).
- [4] Fukumoto, T., Nakamura, K. and Ueha, S., "A POF-based distributed strain sensor with intrinsic memory effect", Proc. SPIE 6770, 67700P (2007).
- [5] Montero, D. S., Vazquez, C., Möllers, I., Arrúe, J. and Jäger, D., "A self-referencing intensity based polymer optical fiber sensor for liquid detection," Sensors 9, 6446-6455 (2009).
- [6] Svyryd, V., Khotiaintsev, S. and Swart, P., "Linear and steplike characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element" Optical Eng. 42(5), 1383-1389 (2003).
- [7] Svyryd, V., Khotiaintsev, S. and Swart, P., "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element" Optical Eng. 41(4), 779-787 (2002).
- [8] Khotiaintsev, K., Undergraduate thesis, Universidad Autónoma de Puebla, México (2005).