



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“SENSORES ÓPTICOS
REFRACTOMÉTRICOS”**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera en Telecomunicaciones

P R E S E N T A

YUNUÉ HERNÁNDEZ BARRERA

DIRECTOR DE TESIS

DR. SERGIY KHOTYAINTEV



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Agradecimientos

A mi mamá Xazmín Maday Barrera Vázquez, por ser la figura y el pilar más importante de mi vida. Gracias por siempre confiar, creer en mí y en mis sueños. Con sus consejos, enseñanzas y apoyo incondicional he logrado llegar hasta este punto. Esta tesis es el resultado de lo que me ha enseñado en la vida y por ello se la dedico.

A mis abuelitos María Inés Vázquez y Oscar Barrera por su cariño, paciencia, esfuerzo, por siempre estar en los momentos más importantes de mi vida, por ser un gran apoyo y soporte. Nunca podré pagarles todo lo que han hecho por mí.

A mi tía Orquídea Gemima Barrera Vázquez, por demostrarme que con esfuerzo y dedicación una mujer es muy capaz de terminar una ingeniería. Además, gracias por darme tantos recuerdos bellos, desde mi niñez hasta ahora, los llevo muy presentes en mi corazón.

A mi familia por brindarme su amor incondicional y porque de alguna u otra manera siempre encuentran la forma de alentarme a ser una mejor persona en todos los ámbitos.

Un agradecimiento muy especial a mi profesor, mentor y director de tesis Dr. Sergiy Khotiaintsev por todo el apoyo, conocimiento y tiempo dedicado en la realización de esta tesis.

A mi compañero de laboratorio M.I Misael Plata por apoyarme en la realización de este trabajo, por compartirme sus conocimientos en esta área, así como todo el tiempo y esfuerzo que me brindó en estos meses.

A mis sinodales Dr. Francisco Javier Ugalde, Dr. Miguel Moctezuma, Dr. Luis Francisco García y a M.I Christian Hernández por haber aceptado ser mi jurado y haberme dado la retroalimentación correspondiente.

A todos mis amigos y compañeros con los que compartí estos años en la universidad. Muchas gracias a Regina, Andrés, Valeria, Sebastián y Paulina, ellos me han enseñado el verdadero valor de la amistad incondicional.

A mis profesores de la infancia María del Pilar Martínez y Vladimir Bustamante porque desde esa etapa me enseñaron a confiar en mí, gracias a su buena enseñanza aprendí a ser una buena estudiante.

A la DGAPA - PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma de proyecto de innovación tecnológica “Sistema de fibra óptica para la detección automática de daños estructurales a edificios en tiempo real, especializado para la detección de daños críticos causados por terremotos y otros eventos catastróficos” con número de referencia IT102021.

Y finalmente a mi segunda casa, la facultad de ingeniería, por haberme brindado los conocimientos y herramientas necesarias para la realización de esta tesis y por darme una formación excelente como ingeniera.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra universidad. Esta tesis es resultado de mi trabajo personal y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración o externamente por otros autores, salvo que se indique específicamente en el texto.

Hernández Barrera Yunué. Ciudad de México, mayo 2023.

Resumen

Esta tesis presenta un estudio de sensores ópticos refractométricos basados en fibra óptica con un transductor semiesférico externo. En primer lugar, se investigó el principio de funcionamiento de este tipo de sensores y sus principales características. En segundo lugar, se realizó un modelado numérico del sensor con el fin de diseñar un prototipo de sensor refractométrico para detección de agua.

Se realizó la implementación física de este prototipo y su caracterización experimental. Los resultados experimentales concuerdan bien con las predicciones teóricas. Los resultados de este trabajo forman una base sólida para el diseño de sensores refractométricos ópticos basados en fibra ópticas para otras aplicaciones específicas.

Palabras clave: Fibra óptica, sensores refractométricos, transductor externo.

Abstract

This thesis presents a study of fiber-optic refractometric optical sensors with an external hemispherical transducer. Firstly, operating principle of this type of sensors and their main characteristics were investigated. Secondly, a numerical modeling of the sensor was carried out in order to design a prototype refractometric sensor for water detection.

The physical implementation of this prototype and its experimental characterization was carried out. The experimental results coincide well with the theoretical predictions. The results of this work form a solid base for the design of optical/fiber refractometric sensors for other specific applications.

Keywords: Fiber optics, refractometric sensors, external transducer.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Antecedentes	7
1.2. Objetivo principal.....	8
1.3. Metas	8
1.4. Metodología	9
Bibliografía del Capítulo 1	9
CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES CON BASE DE FIBRAS ÓPTICAS	11
2.1. Introducción	11
2.2. Estructura de la fibra óptica	12
2.3. Principio de operación y características geométricas.....	13
2.3.1. Ley de Snell.....	14
2.3.2. Reflexión total interna.....	15
2.3.3. Apertura numérica.....	16
2.4. Perfil de las fibras ópticas	18
2.4.1. Perfil escalonado	20
2.4.2. Perfil gradual	21
2.5. Clasificación de fibra ópticas	22
2.5.1. Fibra monomodo (<i>Single-Mode Fiber, SMF</i>).....	22
2.5.2. Fibra multimodo (<i>Multi-Mode Fiber, MMF</i>)	23
2.6. Conclusiones del Capítulo 2.....	24
Referencias del Capítulo 2	24
CAPÍTULO 3. ESTRUCTURAS DE FIBRA ÓPTICA COMO SENSORES DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL MEDIO EXTERNO	26
3.1. Introducción	26
3.2. Sensores de fibra óptica.....	27
3.2.1. Clasificación de sensores de fibra óptica	28
3.2.2. Ventajas y desventajas de sensores basados en fibra óptica.....	34
3.2.3. Fenómenos físicos ópticos que intervienen en los sensores	36
3.3. Sensores refractométricos de fibra óptica	43
3.3.1. Transductores refractométricos.....	44
3.3.2. Sensores refractométricos de fibra óptica intrínsecos o internos	45
3.3.3. Sensores refractométricos de fibra óptica con transductor externo.....	45
3.4. Aplicaciones y retos importantes.	47

3.5.	Conclusiones del Capítulo 3.....	48
	Referencias del Capítulo 3	49
CAPÍTULO 4. MODELADO NUMÉRICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN SENSOR REFRACTOMÉTRICO CON TRANSDUCTOR EXTERNO.....		51
4.1.	Introducción.	51
4.2.	Descripción física y geométrica del transductor	52
4.2.1.	Descripción de la superficie de segundo orden	53
4.2.2.	Trayectoria de los rayos dentro de los elementos detección	53
4.3.	Características de operación y rendimiento de los transductores refractométricos.....	57
4.3.1.	Transmisión del transductor	57
4.3.2.	Transmisión relativa.....	58
4.3.3.	Intervalo de entrada y salida.....	58
4.3.4.	No linealidad.	59
4.3.5.	Sensibilidad del transductor.	59
4.3.6.	Pérdidas ópticas propias.	60
4.4.	Variación de parámetros.....	61
4.5.	Software SRFO.	64
4.5.1.	Interfaz grafica	64
4.5.2.	Archivos generados.....	66
4.6.	Conclusiones del Capítulo 4.....	67
	Referencias del Capítulo 4	67
CAPÍTULO 5. PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR REFRACTOMÉTRICO DETECTOR DE AGUA		69
5.1.	Introducción	69
5.2.	Propuesta conceptual del sensor refractométrico detector de agua	69
5.3.	Consideraciones sobre la elección de los elementos de la instalación para la experimentación con el sensor óptico refractométrico propuesto	72
5.3.1.	Transductor refractométrico óptico.....	72
5.3.2.	Fuente de luz	73
5.3.3.	Fibra óptica.....	74
5.3.4.	Fotorreceptor	74
5.3.5.	Acopladores.....	75
5.3.6.	Desplazadores de 3 ejes.....	75
5.3.7.	Indicador de desplazamiento de precisión.....	76
5.3.8.	Osciloscopio.....	76

5.4.	Resultados teóricos.....	77
5.4.1.	Cocientes de reflexión en la interfaz de dos medios	77
5.4.2.	Cálculos de parámetros adimensionales para la implementación del modelo matemático del sensor con el software SRFO.....	78
5.4.3.	Simulación en software SRFO	79
5.5.	Descripción de la instalación experimental y metodología del experimento	83
5.5.1.	Instalación	83
5.5.2	Configuración y acoplamiento	87
5.5.3	Instalación en forma final.....	90
5.6	Resultados del experimento	91
5.7	Conclusiones del Capítulo 5.....	93
	Referencias del Capítulo 5	94
CAPÍTULO 6.	CONCLUSIONES GENERALES	94
ANEXO 1.	HOJA DE DATOS DIODO LASER.....	97
ANEXO 2.	HOJA DE DATOS DEL MODULO NE555	99
ANEXO 3.	HOJA DE DATOS FIBRA ÓPTICA.....	100
ANEXO 4.	HOJA DE DATOS DE FOTORRECEPTOR.....	102

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El crecimiento de las telecomunicaciones en los últimos años ha sido muy acelerado. Por tal motivo, estas se han convertido en un componente clave para el desarrollo económico, social y tecnológico de cualquier país, ya que permiten la transmisión de información a través de grandes distancias y a una velocidad muy rápida. Es importante recalcar que para que esta comunicación se lleve a cabo es fundamental un medio de transmisión. La elección del medio de transmisión adecuado es esencial para garantizar una comunicación efectiva y de alta calidad. Cada tipo de medio de transmisión tiene sus propias características y limitaciones, por lo que es importante seleccionar el adecuado según la aplicación y las necesidades de la red de telecomunicaciones.

Existen diferentes medios de transmisión utilizados, dentro de ellos, se encuentra la fibra óptica. La fibra óptica ha logrado tener un gran impacto en diferentes áreas de interés, debido a que esta presenta grandes ventajas como lo son su gran ancho de banda, inmunidad al ruido, bajo peso, etc.

En un enlace de fibra óptica existen numerosos elementos como filtros, amplificadores, acopladores direccionales, dispositivos de acceso, etc. Dichos elementos, igual que las fibras ópticas, muestran cierta variación de sus características dependiendo de diferentes parámetros del medio que los rodea, por ejemplo, la temperatura, presión, etc. Estas variaciones pueden generar problemas para el mejoramiento de los sistemas de comunicación óptica; por otro lado, se puede aprovechar la sensibilidad de algunos elementos hechos de fibra óptica para medir diferentes cantidades físicas.⁽¹⁾⁻⁽²⁾ Por ello, la respuesta de sensibilidad de los componentes de un enlace de fibra óptica al exponerlos a diferentes factores físicos del medio ambiente presenta un gran interés teórico y práctico.

Para el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, este tema de sensibilidad es de importancia ya que se ha estudiado y trabajado sobre los sensores refractométricos con base en fibras ópticas en diversas aplicaciones.⁽³⁾⁻⁽⁶⁾ Los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo permiten esperar, que, con ciertas mejoras se genere un progreso en las estructuras que utilicen fibras ópticas,

desarrollando características adecuadas para su implementación en diferentes dispositivos como, detectores de ingreso de agua a sistemas y cables de fibra óptica en redes de telecomunicaciones.

Las características más relevantes de los elementos en cuestión son: a) una alta sensibilidad al índice de refracción del medio externo, y b) pérdidas muy pequeñas, es decir, un alto coeficiente de transmisión, así que resulta conveniente determinar qué tipos de estructuras son realizables y presentan posibilidades de aplicación.

En esta tesis se hizo un estudio teórico y experimental de la sensibilidad de los sensores de este tipo al índice de refracción de medio externo y comparar los resultados teóricos obtenidos con un experimento correspondiente.

1.2. Objetivo principal

Analizar los datos teóricos y experimentales sobre los sensores ópticos refractométricos con transductor externo basados en fibra óptica, para su probable aplicación en los detectores de ingreso de agua en los equipos y cables de sistemas de comunicación, y para una variedad de otras aplicaciones que sugieran en uso de este tipo de sensores.

1.3. Metas

- Analizar el estado de arte de las tecnologías de comunicación por fibra óptica e instrumentación basada en fibra óptica, e identificar las oportunidades para los sensores de fibra óptica de tipo refractométrico.
- Realizar un modelado numérico de las características de funcionamiento de un sensor refractométrico detector de agua y obtener sus características de transmisión óptica en función del medio externo: el aire y el agua.
- Desarrollar las técnicas de caracterización experimental de los sensores refractométricos de fibra óptica, implementar un respectivo experimento y comparar las predicciones teóricas con el comportamiento experimental del sensor óptico refractométrico detector de agua.

1.4. Metodología

La metodología incluye tanto métodos teóricos como experimentales. En la parte teórica se planea el uso de métodos matemáticos, métodos para la solución de ecuaciones algebraicas lineales, técnicas de integración, métodos numéricos en general, procesamiento estadístico de los datos y teoría de optimización.

En la parte experimental está prevista la fabricación de muestras de algunas estructuras sensoras y la investigación de su comportamiento utilizando los instrumentos ópticos y electrónicos.

En el desarrollo de la tesis, en primer término, se ubicarán las fuentes de información donde se describe el problema de sensibilidad de las características de elementos de fibra óptica a los factores del medio ambiente y presenten los avances teóricos y prácticos en esta área.

En segundo término, se analizarán los aspectos fundamentales de tecnología objeto del estudio: las características de fibras ópticas y de los sensores ópticos refractométricos.

Como tercera fase, se ubicará el perfil objeto del trabajo de tesis propuesto, se identifican las líneas de investigación y desarrollo y se elaborará la propuesta general sobre el planteamiento de tesis. También, se identificarán los problemas particulares a desarrollar relacionados a este trabajo de tesis.

Como la cuarta fase, con base en la información recabada y problemas identificados en la presente área, se desarrollará la parte teórica y parte experimental de la tesis. En el desarrollo de la tesis, se utilizarán las técnicas de simulación numérica de propagación de la radiación electromagnética en medios ópticos, la experimentación utilizando algunas muestras de estructuras hechas de fibra óptica, etc.

Bibliografía del Capítulo 1

- (1) G. Keiser. (2013) *Optical fiber communication*. Tata McGraw Hill, 5th Edition.
- (2) G. P. Agrawal. (2004). *Lightwave Technology: Components and Devices*. Wiley.
- (3) J. L. Santos, Faramarz Farahi, (2014). *Handbook of Optical Sensors, Technology & Engineering*. CRC Press.

- (4) J. M. López. (2002). *Handbook of optical fibre sensing technology*, John Wiley & Sons, Ltd.
- (5) J. Dakin, B. Culshaw. (1988). *Optical Fiber Sensors* Eds. Vol. I-IV, Boston: Artech.
- (6) S. Khotiaintsev, S. Perez-Garcia et al. (2012). Optical Intensity-type Refractometer for Remote Measurements via Fiber-optic Cables,” *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. 30, No. 8, pp. 1073 – 1079.

CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES CON BASE DE FIBRAS ÓPTICAS

2.1. Introducción

La fibra óptica es un medio de transmisión que utiliza la luz para transmitir información. La fibra óptica consiste en un núcleo de vidrio o plástico que se encuentra en el centro, rodeado por una capa de revestimiento que refleja la luz dentro del núcleo. La luz que se utiliza en la fibra óptica es generalmente de longitud de onda visible o infrarroja cercana, generada por diferentes fuentes de luz.

La fibra óptica es una de las formas más eficientes de transmitir información a largas distancias, ya que la señal puede viajar a velocidades muy altas y con una capacidad de ancho de banda muy amplia, esto significa que se pueden transmitir grandes cantidades de datos en un tiempo mucho más corto. Las ventajas de la fibra óptica sobre otros medios de transmisión incluyen una mayor capacidad de ancho de banda, menor atenuación de la señal y es menos susceptible a la interferencia electromagnética, lo que significa que la señal puede viajar más lejos sin degradarse. Esto supone una gran ventaja ya que se pueden utilizar menos repetidores para amplificar la señal, lo que reduce los costos de infraestructura y hace que las instalaciones sean de gran escalabilidad. Debido a que la señal no tiene tantas perturbaciones es mucho más estable y predecible que la de otros medios de transmisión.

Además de ser utilizada en la transmisión de datos en redes de telecomunicaciones, la fibra óptica también se utiliza en aplicaciones médicas, de defensa, industriales y de investigación científica. Justamente en este trabajo se analizará una de las aplicaciones en la que se ha utilizado la fibra óptica en los últimos años.

En resumen, la fibra óptica es importante en las comunicaciones porque es capaz de transmitir grandes cantidades de información a altas velocidades con una alta fiabilidad, seguridad y escalabilidad. La fibra óptica es un componente clave de las redes de comunicación modernas y es esencial para el funcionamiento de la mayoría de los servicios de comunicación.

2.2. Estructura de la fibra óptica

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, la fibra óptica es un hilo flexible hecho normalmente de vidrio (sílice de diferentes grados de purezas, dependiendo el uso que se le quiera dar a la fibra) o plástico, aunque también se fabrican fibras con cuarzo, pero con una mezcla de diferentes materiales para reducir el índice de refracción.

Es importante saber que este hilo de fibra óptica a pesar de que es flexible es muy frágil por lo que tiene que estar cubierto por distintas capas de diferentes materiales para no solo darle resistencia mecánica, sino también, reducir las pérdidas de luz que se llegan a presentar. Estas capas se presentan a continuación (Fig 1):

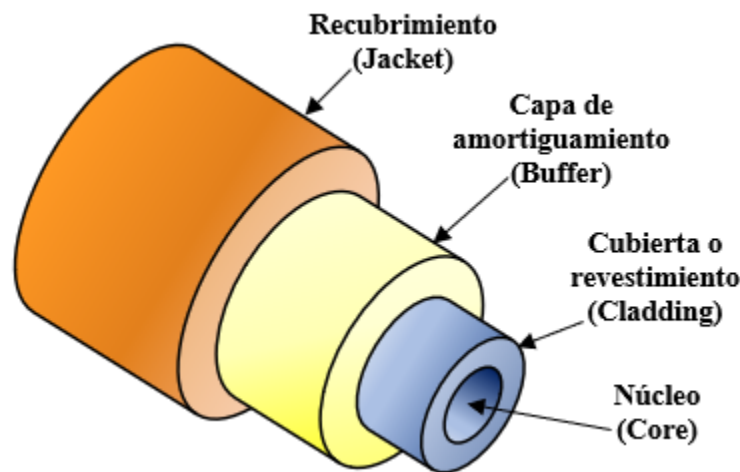


Fig. 1: Estructura típica de una fibra óptica.

- **Núcleo (Core):** El núcleo es la parte que está hecho de cuarzo fundido, vidrio o plástico, este es el elemento principal que transporta la luz. El diámetro del núcleo varía dependiendo del tipo de fibra.
- **Cubierta o revestimiento (Cladding):** Esta capa está hecha del mismo material que el núcleo, pero con un índice de refracción menor (modificado con impurezas). Este es el elemento principal externo ya que sirve para confinar la luz dentro del núcleo por la reflexión total interna.
- **Capa de amortiguamiento (Buffer):** Esta capa de la fibra óptica está hecha de un plástico suave pero muy resistente que rodea al hilo. Protege al hilo de la fibra de la

humedad, rasguños y ayuda a disminuir las pérdidas de luz en la fibra provocadas por microcurvaturas.

- **Recubrimiento (*Jacket*):** También está hecha de plástico, pero plástico más duro. Esta capa sirve para proteger a la fibra de los factores externos mecánicos.

El grosor total del núcleo y la cubierta es tan pequeño, que por su aspecto filamentoso se le da el nombre de fibra.

2.3. Principio de operación y características geométricas

Los medios de transmisión tienen varias clasificaciones, en concreto la fibra óptica cae en un subconjunto de medios de transmisión denominadas como guías de ondas ópticas dieléctricas. La fibra óptica funciona sobre principios similares a otras guías de ondas, con la importante inclusión de un eje de simetría cilíndrico⁽¹⁾ en forma de hilo sumamente delgado, de material altamente transparente diseñado para transmitir información a grandes distancias utilizando señales ópticas.

Se puede decir en palabras más sencillas que, la fibra óptica no es más que un conductor de luz. La luz queda atrapada en este conducto y se propaga a la máxima velocidad posible a lo largo del mismo. La velocidad de propagación de la luz depende del tipo de material transparente empleado, ya que la máxima velocidad $c = 299.792.458 \left[\frac{m}{s} \right]$ sólo se alcanza en el vacío. En el resto de los medios la propagación se produce a menor velocidad, la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en otro medio, se conoce como índice de refracción del medio y es característico de cada material.⁽²⁾

La causa física por la cual la luz queda atrapada dentro del dicho conducto se basa en las leyes de reflexión y refracción de la luz, que en resumen dicen que, cuando un rayo atraviesa la frontera desde un medio físico transparente a otro medio también transparente, pero donde la velocidad de propagación es menor, la trayectoria de este va a variar⁽²⁾, siguiendo la ley física conocida como Ley de Snell. Es importante mencionar que esta ley sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos.

2.3.1. Ley de Snell

La ley de Snell dice que el ángulo de incidencia (θ_i) y el ángulo de transmisión (o ángulo de refracción) (θ_t) están relacionados mediante la siguiente ecuación ⁽³⁾:

$$n_1 \text{sen} \theta_i = n_2 \text{sen} \theta_t \quad (2.1)$$

Para que quede esto más claro, a continuación, se muestra un esquema en la Fig.2:

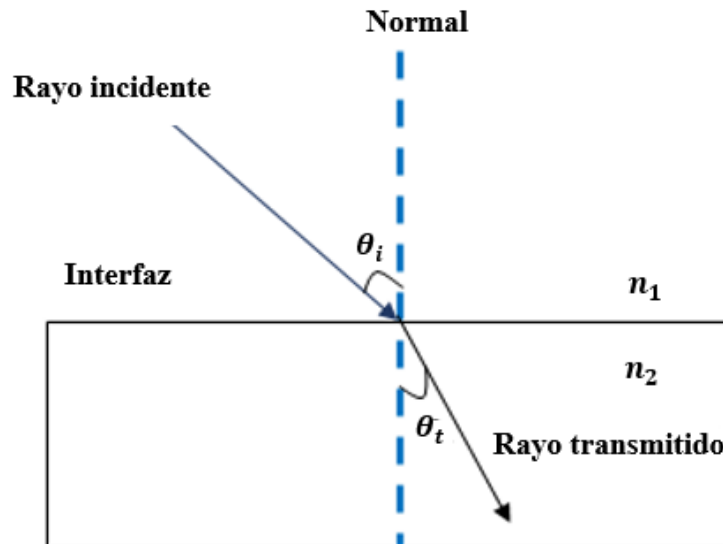


Fig. 2: Ilustración de la ley de Snell

Entonces si se ve el esquema, podemos definir que:

θ_i → El ángulo de incidencia es aquel ángulo formado entre el vector normal y el rayo incidente.

θ_t → El ángulo de transmisión es el ángulo formado entre el vector normal a la interfaz y el rayo transmitido.

n_1 y n_2 → Son los índices de refracción del medio desde que incide el rayo y del medio en el que se transmite el rayo, respectivamente.

2.3.2. Reflexión total interna

Ahora bien, refiriéndonos más a la fibra óptica lo que sucede es: cuando la luz entra en el núcleo de la fibra óptica, se refracta hacia el centro de la fibra debido a la diferencia en los índices de refracción entre el núcleo y el recubrimiento. Si el ángulo de incidencia es lo suficientemente grande, la luz se refleja completamente en la interfaz entre el núcleo y el recubrimiento y se mantiene dentro del núcleo, este fenómeno es conocido como reflexión total interna (Fig 3).

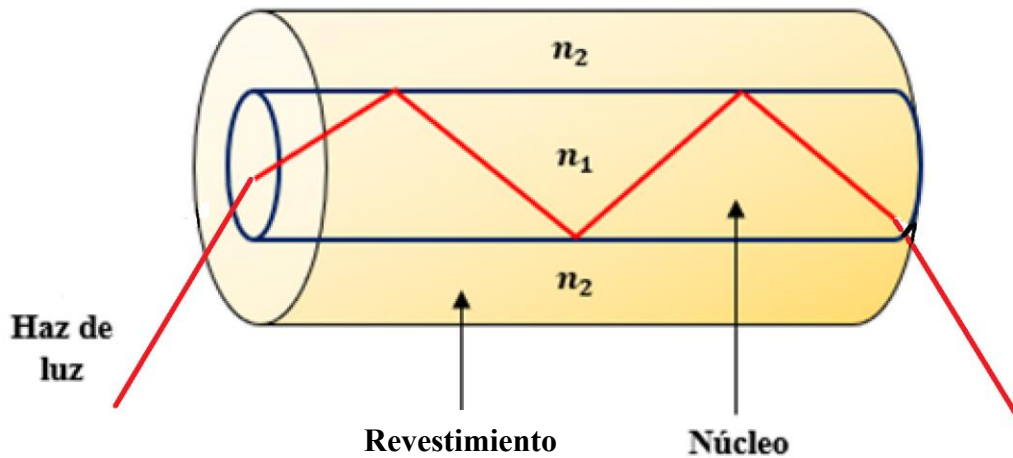


Fig. 3: Ilustración del fenómeno de reflexión total interna

En este fenómeno es importante hablar del ángulo crítico (θ_c). Este es el caso cuando el haz de luz pasa de un medio de mayor densidad a otro menor ($n_1 > n_2$), según va aumentando el ángulo de incidencia, se llega a un valor en que toda la luz es reflejada ⁽⁴⁾. (Fig 4)

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right). \quad (2.2)$$

A partir del ángulo crítico θ_c toda la energía de la luz es reflejada y regresa al medio de n_1 . En palabras más sencillas, el ángulo crítico es el ángulo mínimo de incidencia en el cual se produce la reflexión total interna. Dicho ángulo se mide respecto a la normal de la separación de los medios. Para asegurar que haya reflexión total interna los ángulos de incidencia tienen que ser superiores a este ángulo crítico, es decir:

$$\sin \theta_i \geq \frac{n_1}{n_2}. \quad (2.3)$$

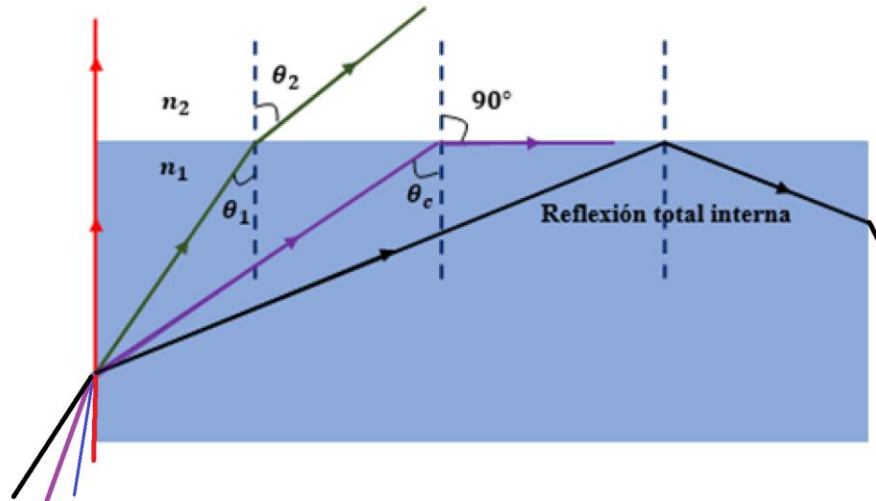


Fig. 4: Ángulo crítico θ_c y reflexión total interna.

El fenómeno de la reflexión interna total, responsable del guiado de la luz en las fibras ópticas, se conoce desde 1854. Aunque las fibras de vidrio se fabricaron en la década de 1920, su uso se volvió práctico solo en la década de 1950, cuando el uso de una capa de revestimiento condujo a una mejora considerable en sus características de guía ⁽⁵⁾.

Esta reflexión total interna permite que la luz se transmita a lo largo de la fibra óptica sin pérdida de señal.

2.3.3. Apertura numérica

En la fibra óptica también existe un ángulo característico más allá del cual la luz no se podrá propagar internamente (como se puede observar la flecha de color verde en la Fig. 4). Al hacer incidir un rayo con este ángulo, cuando se traza a través del extremo de la fibra, emerge con un ángulo en el aire que representa el ángulo geométrico máximo de aceptación para los rayos que ingresan a la fibra ⁽¹⁾; este ángulo es conocido como la apertura numérica de la fibra (Fig. 5). Para no tener problemas de acoplamiento ya sea de fibra-fibra o láser-fibra es

muy importante considerar tanto el tamaño del núcleo de la fibra y el tamaño de la apertura numérica.

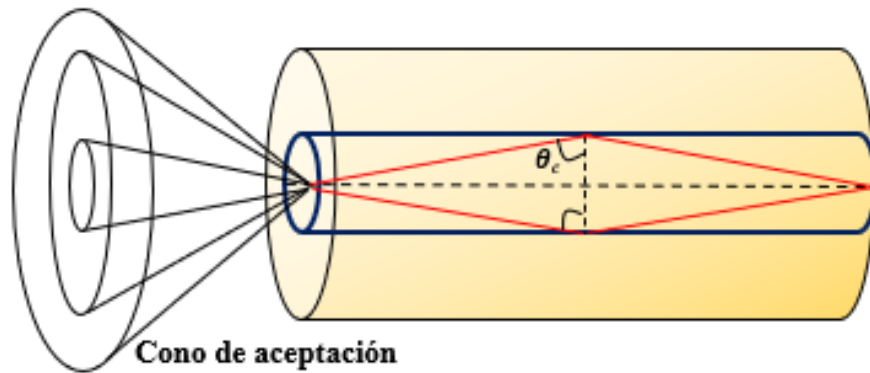


Fig. 5: Ilustración del concepto de Cono de aceptación y de la Apertura numérica de una fibra óptica.

Entonces, entre mayor sea el tamaño del núcleo como de su apertura numérica, en general se tendrá una mayor eficiencia en su acoplamiento (Fig. 6). El acoplamiento entre fibras que no coinciden ya sea en el núcleo o en la apertura numérica, es difícil y, por lo general, produce una pérdida excesiva.

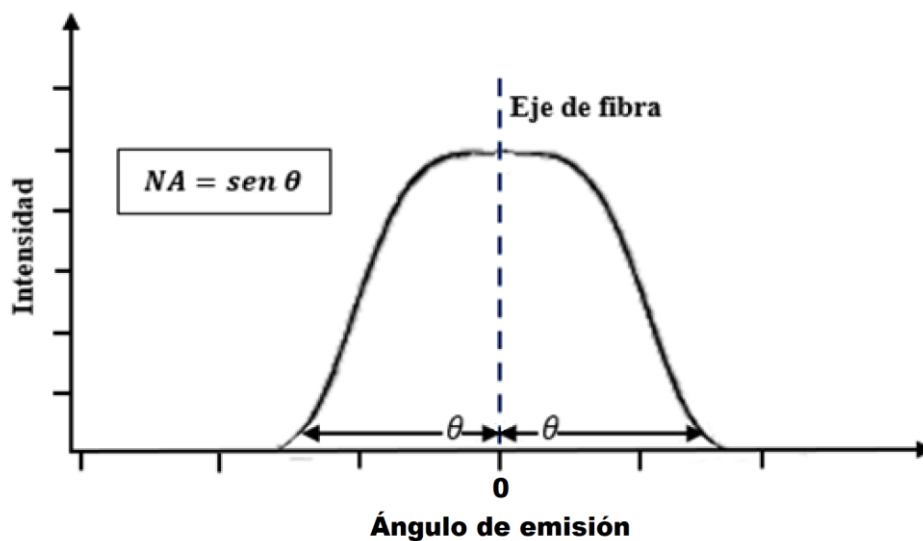


Fig. 6: Ilustración de ángulo de emisión de una fuente.

Utilizando un lenguaje más técnico, se puede definir la apertura numérica como, valor numérico del seno del máximo ángulo que posibilita el acoplamiento de la onda lumínica desde el exterior de la fibra óptica hasta su interior. ⁽¹⁾ Dicho de otra manera la apertura numérica es la propiedad de la fibra para recolectar la luz y propagarla ⁽⁶⁾, está definido por:

$$NA = \sin \theta \quad \text{dónde} \quad \sin \theta = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2} . \quad (2.4)$$

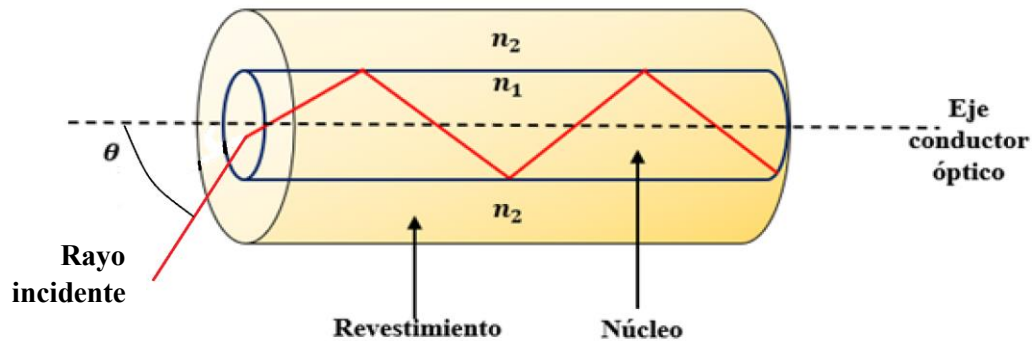


Fig. 7: Propagación de luz en una fibra óptica.

Todo rayo luminoso que llegue a la cara de la entrada de la fibra con un ángulo menor que θ -definido por la ecuación (2.4)- se propagará. Esta luz está contenida en un cono, cuyo ángulo medio con vértices es θ , llamado cono de admisión o cono de aceptación (Fig. 5 y Fig. 7). ⁽⁶⁾

2.4. Perfil de las fibras ópticas

El perfil de las fibras ópticas se refiere a las características físicas y ópticas que definen el comportamiento de la señal de luz que se transmite a través de la fibra. En particular, el perfil se compone de dos partes principales: el índice de refracción y el diámetro del núcleo. Dando una definición un poco más concreta, el perfil se refiere a la variación de índice de refracción a lo largo del núcleo de la fibra óptica, es decir, cómo varía la velocidad de propagación de la luz a medida que se mueve a través de la fibra. Esta variación se controla cuidadosamente durante la fabricación de la fibra para maximizar la eficiencia de la transmisión de la luz y minimizar las pérdidas de señal. La elección del perfil de la fibra óptica depende de la aplicación específica y de las características de transmisión de la señal requeridas.

El perfil de las fibras ópticas es importante porque determina la capacidad de la fibra para transmitir señales de luz de manera eficiente y confiable. La combinación correcta de índice de refracción y diámetro del núcleo puede mejorar la capacidad de transmisión de la fibra y reducir la pérdida de señal.

Ya que el índice de refracción del revestimiento siempre es constante, se puede clasificar las fibras ópticas en función de su perfil de índice de refracción del núcleo en perfil gradual y perfil escalonado.

Las fibras con perfil escalonado podemos encontrarlas en dos diferentes comportamientos, monomodo o multimodo. En cambio, las fibras de perfil gradual solo existen para comportamiento multimodo. ⁽⁶⁾

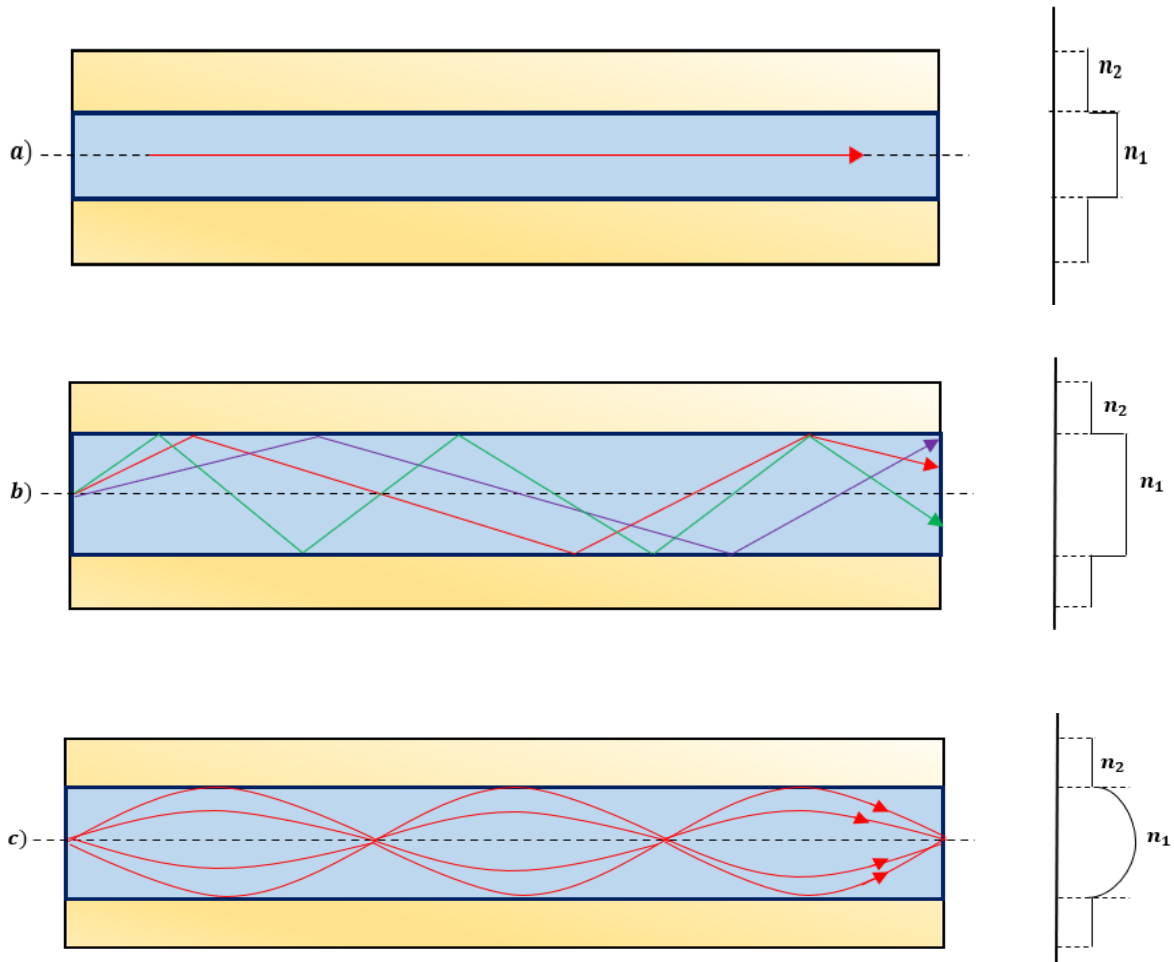


Fig. 8: a) Fibra óptica de perfil escalonado monomodo. b) Fibra óptica de perfil escalonado multimodo. c) Fibra óptica de perfil gradual multimodo.

2.4.1. Perfil escalonado

En este perfil, el valor de índice de refracción del núcleo permanece constante a lo largo de toda la sección, pero cambia abruptamente en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento de la fibra.

En una fibra óptica de perfil escalonado, la luz se refleja en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento, lo que evita la dispersión modal y permite una transmisión más eficiente y confiable de señales. La interfaz también actúa como una guía de onda para la luz, lo que ayuda a mantener la señal enfocada y en su trayectoria correcta a lo largo de la fibra.

Existen dos tipos principales de fibras ópticas de perfil escalonado: la fibra óptica monomodo (Fig. 8a) y la fibra óptica multimodo (Fig.8b).

2.4.1.1. Perfil escalonado monomodo

La fibra óptica monomodo es adecuada para transmisiones de larga distancia y alta velocidad, ya que solo admite un modo de propagación de luz debido a que el núcleo de la fibra es muy delgado, típicamente alrededor de 9 micras de diámetro, lo que limita la propagación de solo un modo de luz a lo largo de la fibra. Esto permite que la fibra óptica de perfil escalonado monomodo transmita señales a larga distancia con muy poca atenuación de la señal y sin distorsión.

La fibra óptica de perfil escalonado monomodo se utiliza comúnmente en aplicaciones de telecomunicaciones, como redes de fibra óptica de larga distancia, debido a su capacidad para soportar altas velocidades de transmisión y su eficiencia en la transmisión de señales de larga distancia. También se utiliza en aplicaciones científicas y militares donde se requiere una alta precisión y confiabilidad en la transmisión de señales.

En general, el perfil escalonado monomodo de la fibra óptica es una opción ideal para aplicaciones que requieren una transmisión de señal de alta velocidad y larga distancia con una mínima atenuación de la señal y sin distorsión.

2.4.1.2. Perfil escalonado multimodo

Por otro lado, la fibra óptica multimodo es adecuada para aplicaciones de corta distancia y velocidades más bajas, ya que admite varios modos de propagación de luz. Esto ocurre

debido a que, en una fibra óptica monomodo, típicamente el núcleo mide alrededor de 50 a 62,5 micras de diámetro, lo que permite la propagación de varios modos de luz a lo largo de la fibra.

En el perfil escalonado multimodo, la transición del índice de refracción del núcleo al revestimiento de la fibra es abrupta, lo que minimiza la dispersión modal y mantiene la señal enfocada en el núcleo de la fibra. Sin embargo, debido a que se permiten varios modos de propagación de luz, la señal se degrada más rápidamente a medida que se transmite a través de la fibra.

La fibra óptica de perfil escalonado multimodo se utiliza comúnmente en aplicaciones de corta distancia, como redes de área local (LAN), debido a su capacidad para transmitir señales a velocidades moderadas y distancias cortas a un costo menor que las fibras ópticas monomodo. En resumen, el perfil escalonado multimodo de la fibra óptica es una opción adecuada para aplicaciones de corta distancia y velocidades moderadas, donde el costo es una consideración importante.

2.4.2. Perfil gradual

En este tipo de fibras ópticas, el índice de refracción del núcleo no permanece constante a lo largo del núcleo, presentando una sección cóncava con una forma acampanada, de manera que el valor del índice de refracción en el centro del núcleo de la fibra es máximo y decrece a medida que nos aproximamos a su periferia (Fig. 8c). En la frontera del núcleo y revestimiento se igualan los valores de ambos índices de refracción, a partir de este punto y a lo largo de toda su sección permanece constante el valor del índice de refracción del revestimiento. ⁽⁵⁾⁽⁶⁾

Este perfil se utiliza para reducir la dispersión modal en la transmisión de señales a larga distancia. La dispersión modal es un fenómeno que ocurre cuando diferentes modos de propagación de la luz dentro de la fibra viajan a diferentes velocidades, lo que puede causar distorsión en la señal y limitar la velocidad de transmisión. Esta modificación gradual del índice de refracción ayuda a reducir la dispersión modal al minimizar la diferencia en la velocidad de propagación de los diferentes modos de luz.

Una de las ventajas del perfil gradual es su capacidad para soportar altas velocidades de transmisión a distancias más cortas que la fibra óptica monomodo, lo que la hace adecuada para aplicaciones de corta y media distancia. Además, la fibra óptica de perfil gradual puede ser menos costosa de producir que la fibra óptica monomodo.

Sin embargo, la principal desventaja del perfil gradual es que la señal se degrada más rápidamente a medida que se transmite a lo largo de la fibra en comparación con la fibra óptica monomodo. Por lo tanto, para aplicaciones de larga distancia y alta velocidad, se prefiere la fibra óptica monomodo.

En conclusión, el perfil gradual de la fibra óptica es una opción adecuada para aplicaciones de corta y media distancia donde se requieren velocidades de transmisión moderadas y costos más bajos. Sin embargo, para aplicaciones de larga distancia y alta velocidad, la fibra óptica monomodo sigue siendo la mejor opción debido a su capacidad para transmitir señales de manera más eficiente y con menos distorsión.

2.5. Clasificación de fibra ópticas

La fibra óptica es un medio de transmisión de datos que utiliza hilos de vidrio o plástico para transmitir información en forma de luz. La fibra óptica ha revolucionado la industria de las comunicaciones al proporcionar velocidades de transmisión de datos muy altas, una mayor capacidad de ancho de banda y una menor atenuación de la señal en comparación con otros medios de transmisión como el cobre. Existen dos tipos principales de fibra óptica: la fibra monomodo y la fibra multimodo. Cada una de estas fibras tiene sus propias características y ventajas, y la elección de una u otra dependerá de la aplicación específica y las necesidades del usuario.

2.5.1. Fibra monomodo (*Single-Mode Fiber, SMF*)

Esta fibra se caracteriza por tener un diámetro muy pequeño, de aproximadamente 5 – 9 micrómetros, lo que significa que solo puede transmitir un haz de luz (un modo) a través de ella.

Como sólo permite el paso de un haz de luz, este haz de luz, no rebota en las paredes, y viaja paralelo a la longitud del cable. Por ese motivo, las pérdidas por reflexión (distorsión modal), son menores, y por tanto la fibra puede ser más larga que en el multimodo. ⁽⁷⁾

Potencialmente, esta es la fibra que ofrece la mayor capacidad de transporte de información, por lo que se utiliza en aplicaciones de larga distancia y alta velocidad, como redes de telecomunicaciones y transmisiones de datos de larga distancia. Los elevados flujos que se pueden alcanzar constituyen la principal ventaja de las fibras monomodo, ya que sus pequeñas dimensiones implican un manejo delicado. ⁽⁸⁾

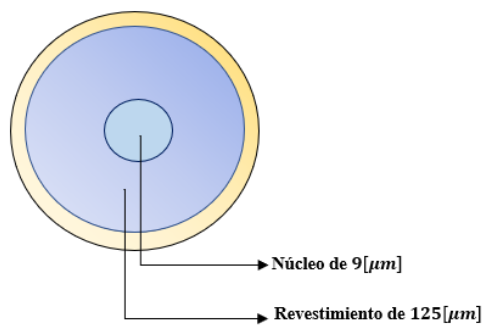


Fig. 9: Estructura de fibra monomodo

2.5.2. Fibra multimodo (*Multi-Mode Fiber, MMF*)

Esta fibra tiene un diámetro mayor que la fibra monomodo, de 50, 62.5, 105, 200, 300, 400, 500 y más micrómetros lo que permite la transmisión de múltiples haces de luz (modos electromagnéticos) a través de ella. Esto supone que no llegan todos a la vez. Una fibra multimodo puede tener más de mil modos de propagación de luz. ⁽⁷⁾

El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud, que el revestimiento. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión. ⁽⁸⁾

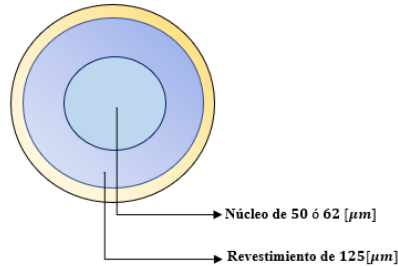


Fig. 10: Estructura de fibra multimodo.

2.6. Conclusiones del Capítulo 2

En conclusión, la fibra óptica es una tecnología de transmisión de datos que ha revolucionado la forma en que las comunicaciones se llevan a cabo en todo el mundo. Los dos tipos principales de fibra óptica, la monomodo y multimodo, ofrecen velocidades de transmisión de datos muy altas y una mayor capacidad de ancho de banda en comparación con otros medios de transmisión. La elección de una u otra dependerá de la aplicación específica y las necesidades del usuario. Además, las variantes de fibra óptica como la fibra de índice escalonado y la fibra de índice gradual se utilizan en aplicaciones especializadas. La fibra óptica se ha convertido en una tecnología esencial para la transmisión de datos a larga distancia de manera eficiente y confiable, y se espera que continúe siendo un componente clave en la industria de las comunicaciones en el futuro.

Referencias del Capítulo 2

- (1) Bass, M. (2002). *Fiber optics handbook: Fiber, devices and systems for optical communication*. Optical Society of America. New York, EUA: McGraw-Hill.
- (2) Pierre, J. (2010). *The fiber optic*. Boletín 70°. Washington, D. C. EUA: CITEL
- (3) Montes, I. *Reflexión y refracción. Fundamentos teóricos*. CDMX, México: Facultad de Ingeniería. UNAM.
- (4) Castro, A. (2017). *Nuevos sensores refractométricos en fibra óptica*. UNAM, México.
- (5) Agrawal, G. (2010). *Fiber-optic communication system*. New York. EUA: John Wiley & Sons. pp.24-74.

- (6) Pierre, J. (1991). *Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas*. México; Trillas.
- (7) Mitschke, F. (2009). *Fiber Optics: Physics and Technology*. New York, EUA: Springer
- (8) Vargas, I. *Sistemas de fibra óptica*. Ica, Perú: Universidad Nacional San Luis Gonzaga.

CAPÍTULO 3. ESTRUCTURAS DE FIBRA ÓPTICA COMO SENSORES DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL MEDIO EXTERNO

3.1. Introducción

El campo de los sensores de fibra óptica ha tenido un gran desarrollo durante los últimos años, por lo que se ha generado una expansión e introducción por nuevas áreas y aplicaciones de tecnologías dentro de la ingeniería, que influyen directamente en temas que han sido objeto de investigación durante algunos años. Este gran avance se debe, en su mayoría, a la alta disponibilidad de los láseres, junto con la existencia de fibras ópticas, guías de ondas ópticas integradas, dispositivos semiconductores ópticos y un gran conjunto de nuevos componentes en el campo de la óptica.

Al analizar el estado de arte de sensores basados en fibra óptica, evidentemente se tiene que tocar el tema de fibra óptica. Las aplicaciones de la fibra óptica han ido progresando en los últimos años. Desde 1970, que se realizaron algunos de los primeros experimentos con fibra ópticas de bajas pérdidas, y no aplicado a telecomunicaciones como se había estado haciendo, sino para sensores. Estos experimentos dieron un nuevo lugar a la creación de un grupo de investigadores centrados en la explotación de esta nueva aplicación. En la actualidad, el principal objetivo de la investigación en este campo es crear una serie de técnicas basadas en fibras ópticas que puedan utilizarse para una gran variedad de sensores y que constituyan la base de una tecnología de medición eficaz, capaz de complementar a los métodos convencionales en el campo de los sensores. Se busca el uso de la fibra óptica en estos nuevos sensores ya que esta es un medio físico que trata de minimizar efectos que perturben tanto a la señal de transmisión como a la señal de recepción, para que estas sean confiables y lo más precisas posibles.

Los sensores resultantes tienen una serie de características que nos resultan familiares y con ciertas ventajas: son compactos y ligeros, en general, mínimamente invasivos, tienen versatilidad geométrica, son económicos, si se habla de sus características técnicas se puede mencionar que están libres de interferencia electromagnética, tienen ancho de banda grande

y alta sensibilidad. Son de naturaleza pasiva debido a su construcción dieléctrica, algunos pueden soportar altas y bajas temperaturas y soportan ambientes ruidosos, entre otras.

Por ello, este capítulo se centra en la descripción y caracterización de los sensores ópticos basados en fibra óptica, así como mostrar su funcionamiento básico.

3.2. Sensores de fibra óptica

Podemos iniciar con la definición de un sensor, dispositivo capaz de detectar y/o cuantificar la variación de algún parámetro. Las principales partes que forman a un sensor son: dispositivo transductor, canal de comunicación, detector, subsistema de procesamiento de la señal.⁽¹⁾

Sabiendo esto, se puede decir que los sensores de fibra óptica son sensores ópticos basados en fibra para cierta cantidad, normalmente temperatura o tensión mecánica, pero a veces también desplazamientos, vibraciones, presión, aceleración, rotaciones, o concentraciones de especies químicas. El principio general de tales dispositivos es que la luz de un láser (a menudo un láser de fibra de una sola frecuencia) o de una fuente super luminiscente se envía a través de una fibra óptica, experimenta cambios sutiles de sus parámetros ya sea en la fibra o en una o varias rejillas de bragg de fibra, y luego llega a un detector que mide estos cambios.⁽²⁾

El componente característico de un sensor de fibra óptica es un haz de fibras de vidrio que pueden transportar luz. Cada fibra óptica puede tener un diámetro del orden de unos pocos micrómetros hasta unos milímetros.⁽³⁾ Entonces, siendo más específicos en cuanto a los componentes que tienen en común los sensores de fibra ópticas se pueden mencionar los siguientes: una fuente de luz, una interfaz óptica, una o más fibras ópticas, un mecanismo de modulación óptica, un fotodetector, y un equipo de procesamiento de señales estando todos ellos integrados o no integrados. Algunos ejemplos de estos componentes se muestran a continuación (Fig. 11):

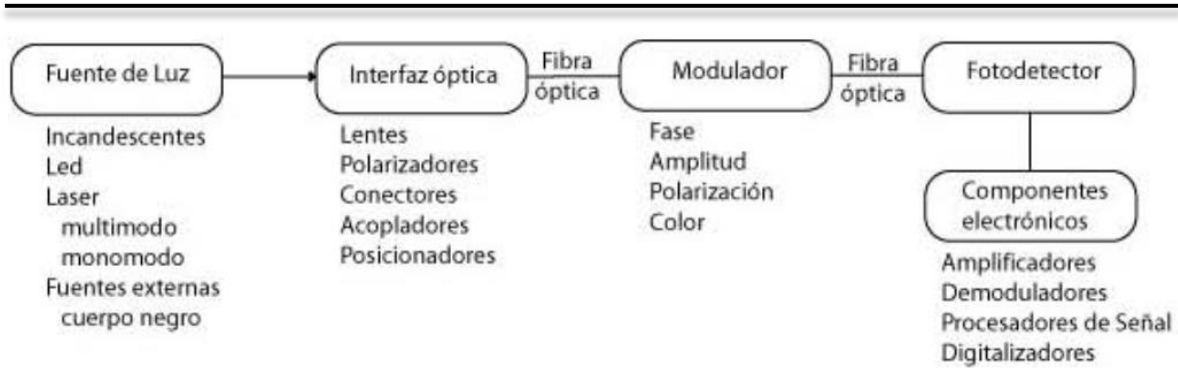


Fig. 11: Componentes básicos de un sensor basado en fibra óptica. (6)

Juntando lo anterior, una definición más concreta de un sensor óptico es: sistema fotónico en el que la magnitud del objeto medido, o señal de entrada, introduce modificaciones o modulaciones en alguna de las características de la luz en un sistema óptico. Tras ser detectada, procesada y adicionada, el sistema emitirá una señal de salida, normalmente en el dominio eléctrico, que será una reproducción válida de la variable objeto. La luz transmitida o reflejada puede ser modulada por una señal moduladora en sus características de amplitud, fase, frecuencia o polarización. (4)

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, la evolución de estos sensores ha sido fundamental, y dicha evolución ha generado que los sensores se dividan en diferentes clasificaciones dependiendo el uso que se le vaya a dar.

3.2.1. Clasificación de sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica se pueden clasificar de varias maneras las cuales son las siguientes:

3.2.1.1. Naturaleza de transducción

3.2.1.1.1. Sensores externos o extrínsecos

Estos sensores externos o extrínsecos en los que alguna forma del elemento o sistema sensor óptico convencional se despliega a distancia y se ilumina a través de un enlace de fibra óptica, y la señal codificada ópticamente se transfiere por la fibra de entrada (u otra fibra) a un punto de procesamiento central, para su demodulación final (5) En palabras más sencillas, en estos sensores la interacción entre la magnitud física bajo medición y la radiación óptica ocurre en

un dispositivo óptico externo a la fibra óptica y la señal que resulta de esta interacción se transmite por medio de una fibra óptica al equipo receptor. (Fig. 12.a)

3.2.1.1.2. Sensores intrínsecos

La propia fibra óptica actúa como elemento sensor. Cuando cambia una condición del medio detectado, las propiedades de propagación de la luz de la fibra óptica también cambian (por ejemplo, debido a la micro flexión de una fibra recta como resultado de una fuerza aplicada), proporcionando una medida del cambio en la condición.

Este segundo tipo de sensores se encuentran, por ejemplo, en giroscopios de fibra óptica, hidrófonos de fibra óptica y algunos tipos de sensores de desplazamiento de fuerza a microescala.

Como una aplicación intrínseca de la fibra óptica en la detección, considere un elemento de fibra óptica recto que se sostiene en los dos extremos. ⁽³⁾ En esta configuración, casi el 100% de la luz en el extremo de la fuente se transmitirá a través de la fibra óptica y llegará al extremo del detector (receptor). Ahora, suponga que se aplica una ligera carga al segmento de fibra óptica en su tramo medio. Se desviará ligeramente debido a la carga y, como resultado, la cantidad de luz recibida en el detector puede disminuir significativamente. (Fig. 12.b)

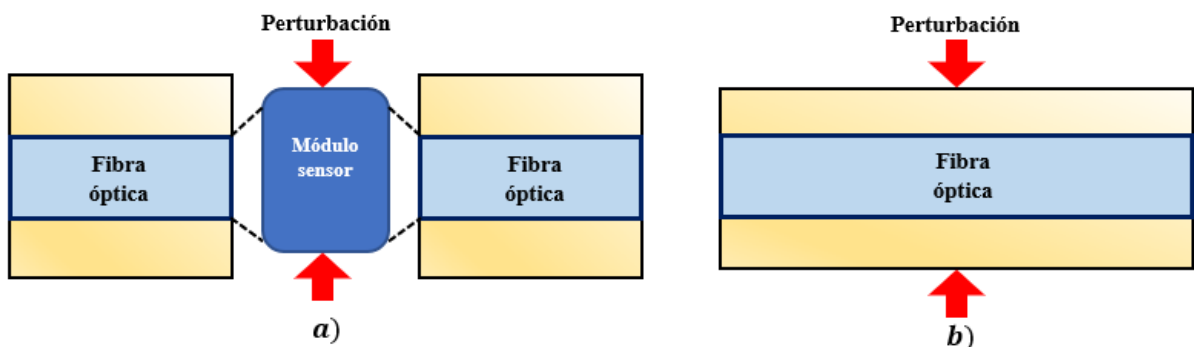


Fig. 12: Tipos de sensores de fibra óptica a) extrínsecos b) intrínsecos.

3.2.1.2. Distribución espacial de la magnitud medida

Según la distribución espacial de la magnitud medida, los sensores de fibra óptica pueden ser de uno de los cuatro tipos siguientes:

3.2.1.2.1. Puntuales

Este tipo de sensores se les llama puntuales, cuando la medición se realiza en puntos discretos a los que acceden canales diferentes. En palabras más sencillas, cada sensor detecta en un solo punto.

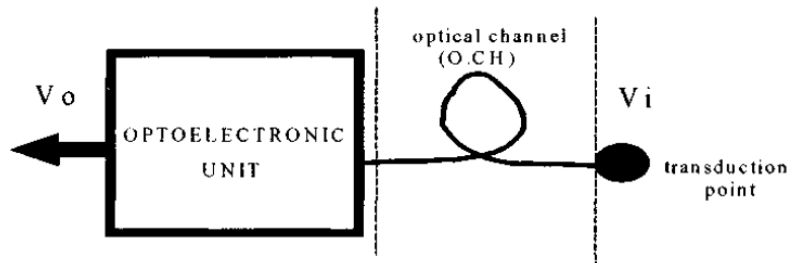


Fig. 13: Sensor óptico puntual. (4)

3.2.1.2.2. Integrados

Estos sensores son un conjunto de transductores que se encuentra en un área en diferentes puntos del objeto bajo medición, pero todos los valores medidos son integrados en una sola cantidad –la lectura integrada de la magnitud física en cuestión.⁽¹⁾

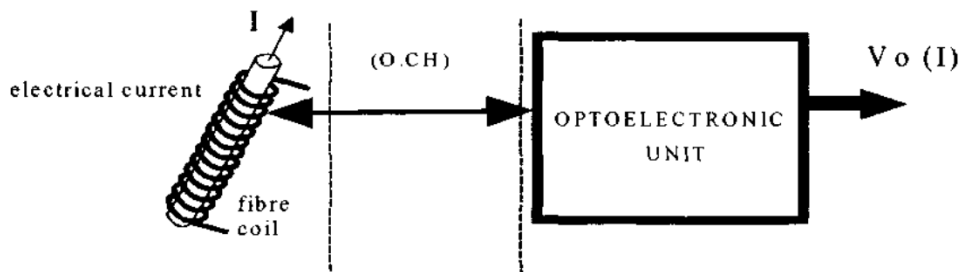


Fig. 14: Sensor óptico integrado (4)

3.2.1.2.3. Distribuidos

En este tipo de sensores los transductores realizan mediciones en un área o a lo largo de una línea continua, con una resolución espacial dada. Un ejemplo de este tipo son los sensores de fibra para la medición distribuida de la temperatura, que, en realidad, determinan la distribución de la temperatura a lo largo de una fibra que actúa como transductor. La fibra óptica actúa simultáneamente como transductor y como canal de comunicación. ⁽⁴⁾

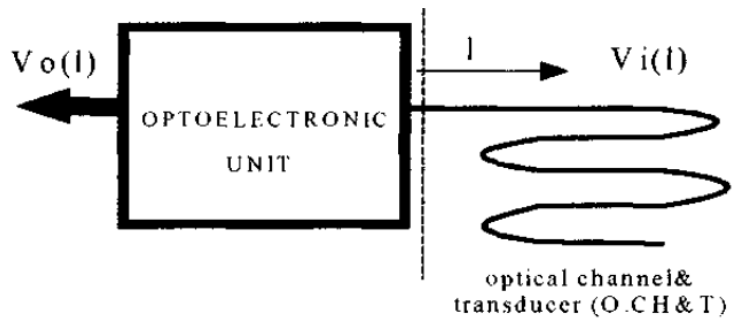


Fig. 15: Sensor óptico distribuido (4)

3.2.1.2.4. Cuasi distribuidos

Estos sensores tienen la capacidad de medir la magnitud física bajo estudio en diferentes puntos, pero a través de un solo canal mediante técnicas de multiplexado óptico.

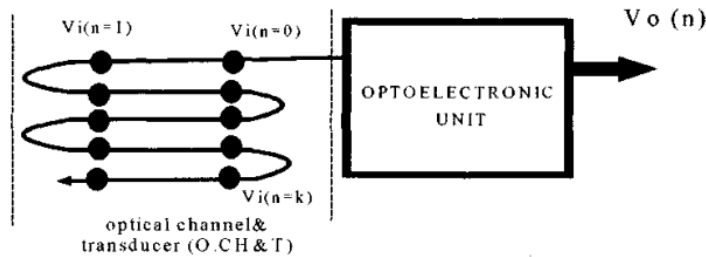


Fig. 16: Sensor óptico cuasi distribuido. (4)

3.2.1.3. Principio de operación

Los sensores ópticos basados en fibra óptica también se pueden clasificar según el tipo de modulación que se utilice para la modulación de la onda, estos se pueden clasificar en:

3.2.1.3.1. Sensores de amplitud o intensidad modulada

Son sensores en los que la magnitud a medir modifica la intensidad óptica transmitida por la fibra óptica. En estos sensores se pueden utilizar diferentes fuentes de luz, pueden ser incoherentes o coherentes de bajo coste juntos con algunos componentes ópticos sencillos.

Esto da lugar a sensores técnica y económicamente competitivos con un gran potencial comercial. Esto conlleva una gran ventaja ya que pueden ser utilizados en un amplio espectro de aplicaciones incluidos los entornos industriales.

3.2.1.3.2. Sensores de longitud de onda modulada

Los sensores de longitud de onda modulada miden el cambio de longitud de onda en la fibra. Los ejemplos de sensores de longitud de onda modulada son los sensores de cuerpo negro, los sensores de fluorescencia y los sensores de rejilla de Bragg de longitud de onda modulada.

(8)

3.2.1.3.3. Sensores de fase o interferométricos

En estos sensores la variable a medir provoca una modulación de fase de la onda en el transductor. Específicamente en este tipo de sensores se requiere fuentes de luz coherentes, fibras monomodo y dispositivos ópticos complejos, debido a que se debe controlar la polarización, a veces las fibras que mantienen una polarización fija son más caras. A pesar de su alto costo, ofrecen potencialmente una mayor sensibilidad.

3.2.1.3.4. Sensores espectroscópicos

Así como los sensores anteriores, estos son en los que la variable objeto modula el espectro de radiación. Estos sensores utilizan un refractómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR) para detectar cambios en la luz dispersada. Estos sensores son muy populares, ya que permiten la detección distribuida a lo largo de la fibra, con interesantes aplicaciones en la supervisión del estado estructural y la medición de cambios en la deformación. (8)

En este rubro se encuentran también los sensores de rejilla de Bragg que cambian la longitud de onda reflejada de la rejilla en función de su tensión y temperatura. Los sensores de rejilla de Bragg se pueden usar para monitorear las condiciones, dentro de las alas de los aviones, en turbinas eólicas, puentes, grandes represas, pozos petroleros y oleoductos. Algo que ahorita está mucho en el momento estelar y como se mencionó anteriormente, son los edificios con sensores de fibra óptica integrados a veces se denominan "estructuras inteligentes"; permiten monitorear las condiciones internas y obtener información importante sobre la tensión a la que están sujetas las diferentes partes de la estructura, sobre fenómenos de envejecimiento, vibraciones, etc. Las estructuras inteligentes son un motor principal para el desarrollo futuro de sensores de fibra óptica. ⁽²⁾⁽¹⁸⁾

3.2.1.3.5. Sensores polarimétricos

Son sensores en los que simplemente la variable a medir modula la polarización de la luz. Estos sensores aprovechan el fenómeno de birrefringencia en la fibra óptica, donde dependiendo de la polarización cambia el índice de refracción. Cuando se aplica tensión a la fibra óptica, se produce el efecto de birrefringencia y da lugar a una diferencia de fase detectable. ⁽⁸⁾

A continuación, se presenta un diagrama (Fig. 17), con algunos ejemplos del uso de los sensores:

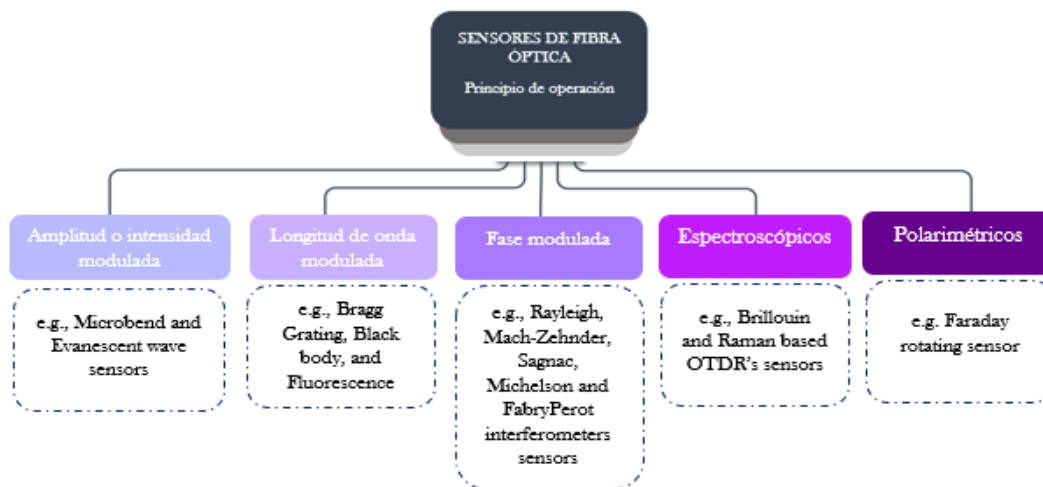


Fig. 17: Tipos de sensores de fibra óptica según su principio de funcionamiento

3.2.1.4. Otras clasificaciones

Otra clasificación son unos sensores especiales basados en fibra óptica que se alimentan eléctricamente, aquí, la fibra sirve para transferir energía eléctrica para accionar algún tipo de sensor convencional en miniatura. Realmente hacer una clasificación concreta de los sensores no se podría realizar ya que se encuentran en constante evolución, incluso existen unos sensores llamados “híbridos”, estos sensores son combinaciones de varios sensores que pueden aprovecharse. A continuación, en la Fig. 18, se presenta un diagrama del flujo de la evolución de los sensores de fibra óptica para darnos una idea.

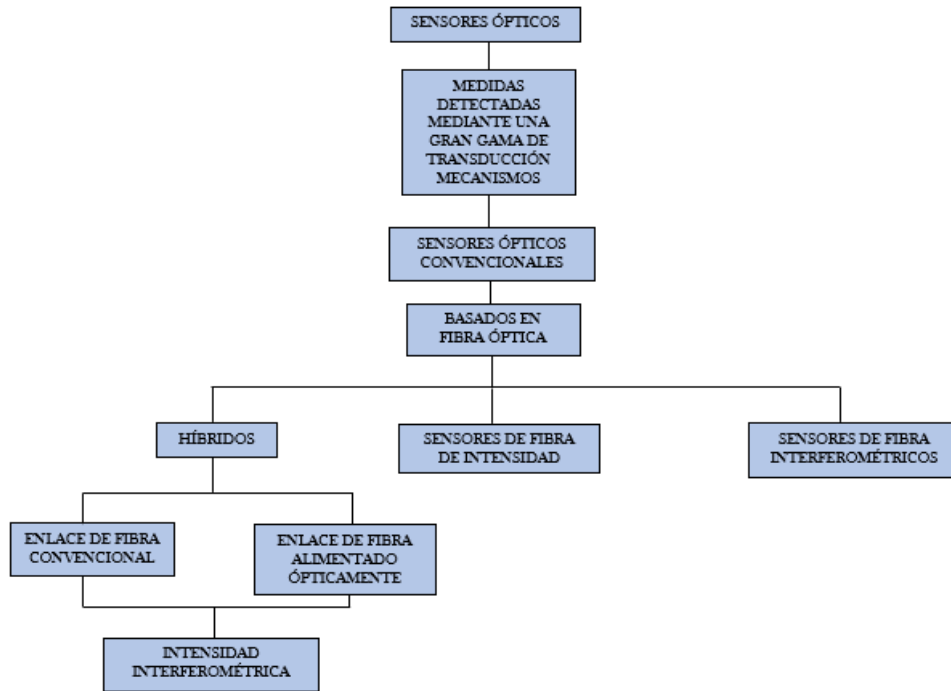


Fig. 18: Diagrama de flujo de sensores ópticos que indica cómo ha crecido el número de sensores ópticos

3.2.2. Ventajas y desventajas de sensores basados en fibra óptica

3.2.2.1. Ventajas

Las ventajas de la fibra óptica dentro del diseño de los sensores incluyen la insensibilidad al ruido eléctrico y magnético (debido al acoplamiento óptico); operación segura en ambientes explosivos, de alta temperatura, corrosivos y peligrosos; y alta sensibilidad. Además, los problemas de desgaste y carga mecánica no existen porque los sensores de posición de fibra óptica son dispositivos sin contacto y sin partes móviles.

También se puede tomar una ventaja el tamaño y poco peso ya que esto es útil en aplicaciones de vuelo (giroscopios) o lugares donde la instalación es costosa; inmunidad a radiación electromagnética y emisión de radiofrecuencia y finalmente la velocidad de respuesta, útiles en aplicaciones de gran precisión. ⁽³⁾⁽⁵⁾

Gracias a la alta temperatura de fusión que tiene el material de las fibras ópticas (sílice), es posible utilizar este tipo de sensores en un amplio rango de temperaturas, desde temperaturas muy bajas (criogénicas), hasta muy altas (casi a temperatura de fundición del cuarzo).

Finalmente se puede decir que, con fibras ópticas, es relativamente fácil integrar una gran cantidad de sensores en un solo canal mediante técnicas de multiplexado (con técnicas espectrales y otras). ⁽¹⁾

3.2.2.2. Desventajas

Así como los sensores basados en fibra óptica presentan varias ventajas, como todos los sistemas, también se presentan algunas desventajas. Las desventajas de la fibra óptica incluyen la sensibilidad directa a las variaciones en la intensidad de la fuente de luz y la dependencia de las condiciones ambientales (temperatura, suciedad, humedad, humo, etc.). Sin embargo, se puede hacer una compensación con respecto a la temperatura.

También se tiene que hablar de fragilidad que estos sensores suponen, se requieren muchos cuidados en el encapsulado del sensor; los emisores y receptores pueden presentar dificultades de alineación y una vez instalados se pueden desalinearse con vibraciones o golpes. Además, la mayoría de los sensores de este tipo, el ancho de banda espectral de los emisores está muy limitado al infrarrojo. ⁽³⁾⁽¹⁾

Y una de las desventajas más sobresalientes es el costo de los sensores de fibras ópticas. En la mayoría de los casos, estos sensores ópticos tienen un costo mucho mayor en comparación con sensores eléctricos o mecánicos. Fundamentalmente, esto se debe al costo de los componentes que, al ser producidos en menor escala, por medio de una tecnología nueva, resulta en un incremento en el precio de éstos, por lo que a veces implementarlos es un poco difícil. Gracias a los avances que se ha tenido a lo largo de los años, las

comunicaciones ópticas se han desarrollado, por lo que más fabricantes se unen, esto provoca que haya más competencia por lo que los precios si son altos, pero con proyecciones a que bajen. ⁽¹⁾

3.2.3. Fenómenos físicos ópticos que intervienen en los sensores

3.2.3.1. Birrefringencia

Uno de los parámetros más importantes que caracterizan a una fibra óptica es el índice de refracción del núcleo, n . Birrefringencia es el fenómeno que ocurre cuando un material tiene dos índices de refracción diferentes para luz polarizada en direcciones diferentes. Esto puede ocurrir debido a la estructura anisótropa del material, lo que significa que la estructura del material es diferente en diferentes direcciones (Fig.19). La birrefringencia puede manifestarse de varias maneras, como cambios en el color o la intensidad de la luz que pasa a través del material, o la creación de patrones de interferencia de luz. Estos fenómenos pueden ser utilizados en aplicaciones como lentes polarizantes, que utilizan la birrefringencia para bloquear la luz polarizada en ciertas direcciones. ^{(7) (9)}

La birrefringencia se presenta en todas las fibras ópticas por más control de calidad que se tenga. Muchos sensores de fibras están basados en este fenómeno e incluso se fabrican fibras especiales con birrefringencias.

La birrefringencia puede ser intrínseca o inducida. La intrínseca se origina en el proceso de fabricación (secciones elípticas, excentricidad del revestimiento, etc.). La birrefringencia inducida se puede crear por deformaciones o curvaturas de la fibra.

La birrefringencia también puede afectar el rendimiento de los sensores ópticos basados en fibra óptica. En este caso, la birrefringencia se produce en la fibra óptica misma, que tiene dos índices de refracción diferentes para luz polarizada en direcciones diferentes. Esto puede causar distorsión de la señal de luz que viaja a través de la fibra óptica, lo que a su vez puede afectar la precisión de la medida realizada por el sensor.

Para minimizar los efectos de la birrefringencia en los sensores ópticos basados en fibra óptica, se pueden utilizar técnicas como la polarización de la luz que se transmite a través de la fibra óptica, o el uso de fibra óptica monomodo, que tiene un diámetro más

pequeño y menos propenso a la birrefringencia. También se pueden utilizar técnicas de procesamiento de señal para corregir la distorsión de la señal causada por la birrefringencia.

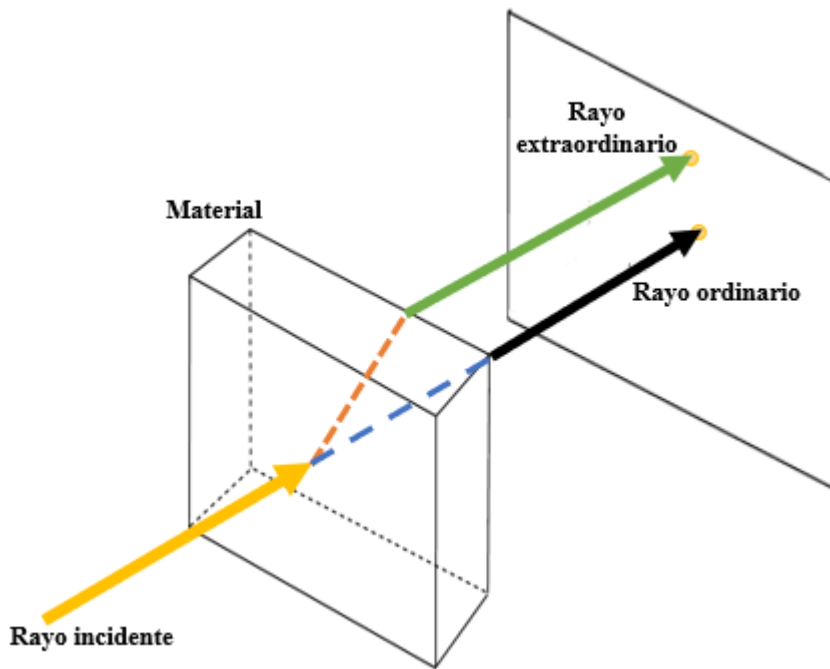


Fig. 19: Ilustración de la birrefringencia de un material.

3.2.3.2. Polarización de la luz

La luz es una onda electromagnética transversal representada mediante un vector de campo eléctrico (\vec{E}) que se propaga en la dirección positiva del eje z de un sistema cartesiano xyz (Fig.20). Por lo que la luz se puede visualizar como una onda electromagnética transversal. La trayectoria que describe el vector de campo eléctrico, proyectada sobre el plano xy se usa para determinar su estado de polarización (SOP, State of Optical Polarization) (Fig. 20). Para definir el estado de polarización de la luz es necesario establecer un marco de referencia (orientación de los ejes x y y con respecto al sistema de medida). La definición de dicho marco facilita el análisis de la evolución del estado de polarización al propagarse por diferentes medios ópticos.⁽¹⁰⁾

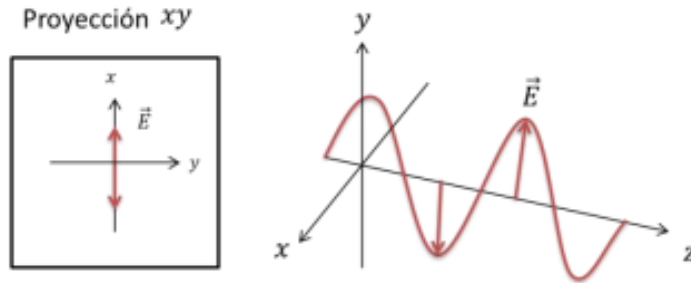


Fig. 20: Ilustración de la orientación del vector del campo eléctrico. (6)

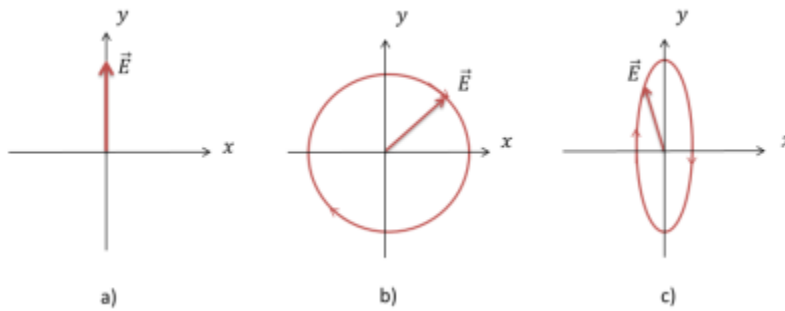


Fig. 21: Tipos de polarización: a) Polarización lineal b) Polarización circular c) Polarización elíptica (6)

3.2.3.2.1. Lineal

Una onda electromagnética plana se dice que está linealmente polarizada. El campo eléctrico transversal de la onda va acompañado de un campo magnético como el que se ilustra. (Fig. 22)

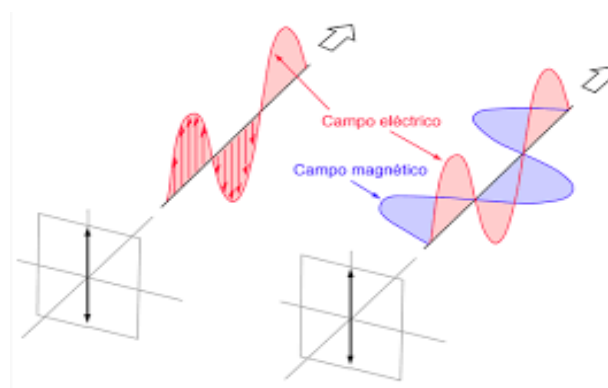


Fig. 22: Polarización lineal. (19)

3.2.3.2.2. Circular

Luz polarizada circularmente consta de dos ondas electromagnéticas planas perpendiculares con una diferencia de fase de 90° . La luz que se muestra a continuación está polarizada circularmente. (Fig. 23)

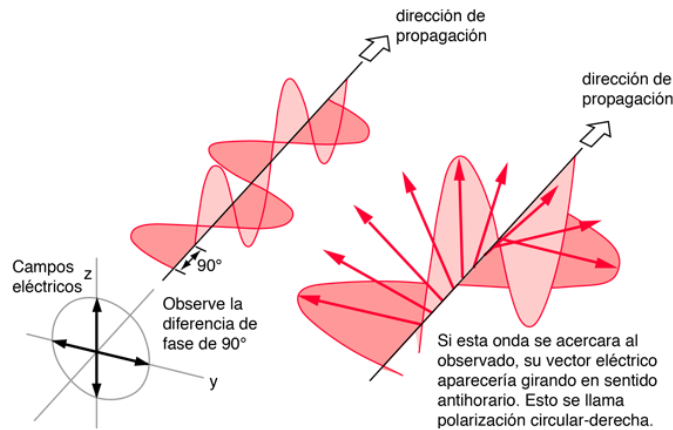


Fig. 23: Polarización circular. (19)

Si la luz está compuesta de dos ondas planas de igual amplitud, pero con una diferencia de fase de 90° , entonces se dice que la luz está polarizada circularmente. Si se pudiera ver la punta del vector del campo eléctrico, parecería moviéndose en un círculo a medida que se acerca. Si mientras se mira la fuente de luz, el vector del campo eléctrico de la luz, viniendo hacia adelante aparece girando en sentido antihorario, se dice que la luz está polarizada circularmente hacia la derecha. Si fuera en sentido horario, se diría que está polarizada circularmente hacia la izquierda. El vector del campo eléctrico dibuja una vuelta completa, cuando la luz avanza una longitud de onda completa.

3.2.3.2.3. Elíptica

La luz polarizada elípticamente consiste en dos ondas perpendiculares de amplitudes desiguales y con una diferencia de fase de 90° . La ilustración muestra una luz polarizada elípticamente a la derecha.

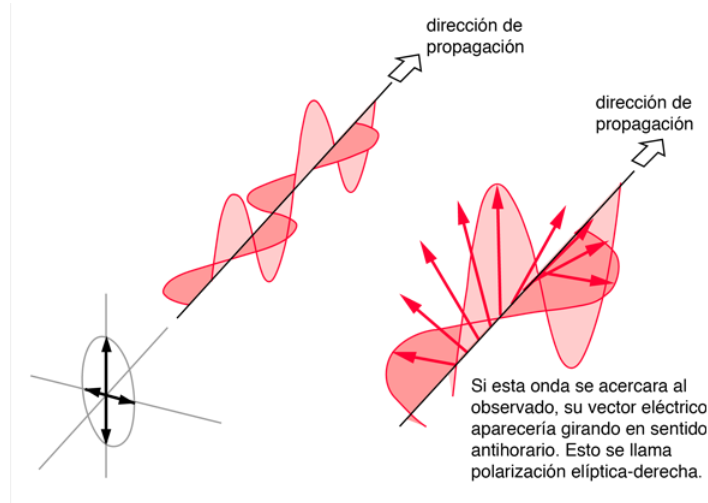


Fig. 24: Polarización elíptica-derecha. (19)

Si el dedo pulgar de la mano derecha estuviera apuntando en la dirección de propagación de la luz, el vector del campo eléctrico estaría girando en la dirección que señala el resto de los dedos.

3.2.3.2.4. Polarizaciones *s* y *p*

La polarización de la luz también se puede clasificar en polarizaciones *s* y *p* considerando el comportamiento de las ondas en el plano de incidencia.

Cuando se analiza la reflexión y la refracción de la luz sobre una superficie plana que separa dos medios dieléctricos homogéneos e isotropos de índices de refracción n_1 y n_2 , se considera que existe la presencia tanto del campo eléctrico \mathbf{E} y campo magnético \mathbf{B} ya que se habla de una onda electromagnética.⁽¹¹⁾ Pero existirán dos formas en las que estos se presenten.

Está el caso cuando el campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia, debido a la perpendicularidad entre los campos \mathbf{E} y \mathbf{B} , la componente E_{\perp} estará asociada a una componente B_{\parallel} , esto es que la luz se encuentra en una **polarización *s***. (Fig.25.a)

Y el otro caso es cuando campo eléctrico es paralelo al plano de incidencia, entonces como sucedió en el caso anterior, la componente E_{\parallel} tendrá asociada una componente B_{\perp} , esto es la **polarización *p***. (Fig.25.b)

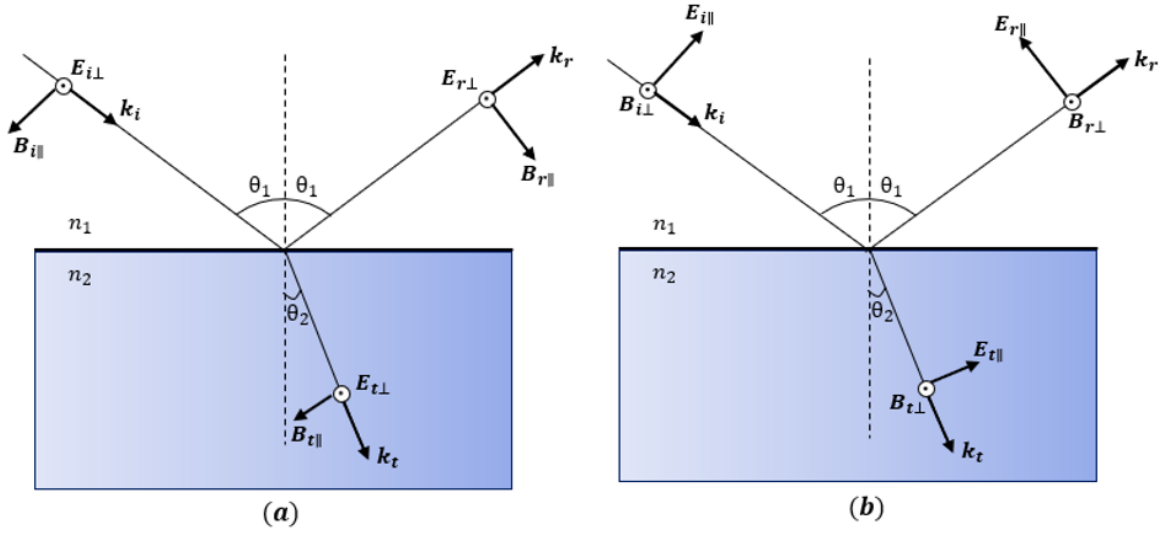


Fig. 25: a) Esquema de polarización s, b) Esquema de polarización p. Donde las ondas incidente, reflejada y refractada se indicarán mediante los subíndices i, r y t. Además k_i, k_r y k_t representan los vectores de las ondas incidente, reflejada y refractada respectivamente.

Las ecuaciones de Maxwell proporcionan ciertas relaciones entre estos componentes (paralela y perpendicular) de los campos eléctrico y magnético a ambos lados de la superficie entre los dos medios, esto permite establecer relaciones entre los componentes del campo eléctrico con las ondas incidente, reflejada y refractada. Gracias a la teoría electromagnética se tiene la relación $\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \nu \mathbf{B}$ ⁽⁷⁾ (donde \mathbf{k} es el vector de onda y ν la velocidad de propagación), con dicha relación pueden calcularse los coeficientes de reflexión (r) y de refracción o transmisión (t)⁽¹¹⁾, definidos como la razón de la amplitud de la onda reflejada a la incidente, u de la amplitud transmitida a la incidente respectivamente y se obtiene:

$$r_{\parallel} = r_p = \frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1}, \quad (3.1)$$

$$r_{\perp} = r_s = \frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}, \quad (3.2)$$

$$t_{\parallel} = t_p = \frac{E_{t\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1}, \quad (3.3)$$

$$t_{\perp} = t_s = \frac{E_{t\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}. \quad (3.4)$$

Estas son conocidas como las **fórmulas de Fresnel**.

Ahora bien, si se habla de los coeficientes de reflexión de intensidad R_s y R_p son los cuadrados respectivos coeficientes de reflexión y transmisión r_s y r_p . Estos coeficientes nos ayudarán a ver el rango de operación de nuestro sensor.

$$R_s = \left[\frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{\sin(\theta_2 + \theta_1)} \right]^2, \quad (3.5)$$

$$R_p = \left[\frac{\tan(\theta_2 - \theta_1)}{\tan(\theta_2 + \theta_1)} \right]^2, \quad (3.6)$$

$$T_s = 1 - R_s, \quad (3.7)$$

$$T_p = 1 - R_p. \quad (3.8)$$

Pero se tiene un caso especial, cuando la onda no está polarizada, el coeficiente de reflexión es:

$$R = \left(\frac{R_s + R_p}{2} \right). \quad (3.9)$$

3.2.3.3. Efecto eléctrico-óptico

El índice de refracción de ciertos cristales (por ejemplo, LiNbOs) cambia cuando se les hace pasar un campo eléctrico con alguna polarización y una dirección especial. Este efecto se llama efecto electroóptico y se utiliza ampliamente para construir moduladores ópticos ⁽⁹⁾. En resumen, este efecto consiste básicamente en el reajuste a nivel atómico debido a la presencia de un campo eléctrico en un material, provocando cambios en sus propiedades ópticas. ⁽¹¹⁾

Existen dos contribuciones que determinaron el efecto electroóptico, una lineal (efecto Pockel)¹ y una cuadrática (efecto Kerr)². El efecto Pockel es más útil para transmisión

¹ El efecto Pockels es un efecto electroóptico que consiste en el cambio del índice de refracción de un medio cuando sobre éste actúa un campo eléctrico, que puede ser variable o constante; la variación con el campo es lineal y de pequeña magnitud. El efecto Pockels permite gobernar fácilmente el índice de refracción de un medio por lo que tiene múltiples aplicaciones. ⁽¹²⁾

² El efecto Kerr es una birrefringencia creada en un material por un campo eléctrico exterior. Se caracteriza por la existencia de dos índices de refracción diferentes: un haz luminoso se divide en dos haces cuando penetra en este material. ⁽¹²⁾

en fibras ópticas y se usa para medir voltajes. El efecto Kerr se usa generalmente para construir switches ópticos.

3.2.3.4. Efecto foto elástico

Es la variación del índice de refracción en un cristal con la aplicación de un esfuerzo perpendicular a la dirección de propagación de la luz. En materiales anisotrópicos el efecto resulta en birrefringencia del cristal. Este efecto se usa en sensores de presión y esfuerzos.

3.2.3.5. Efecto magnetoóptico

El efecto magnetoóptico se genera con otro fenómeno conocido como efecto Faraday. Cuando un rayo de luz polarizada plana atraviesa a través de una sustancia sujeta a un campo magnético, el plano de polarización cambia un ángulo. Este efecto es particularmente útil para hacer sensores de alto voltaje y corriente. Aquí la fibra presenta la característica de que no es conductora, lo que hace tan atractiva para estas aplicaciones.⁽¹⁰⁾

3.3. Sensores refractométricos de fibra óptica

Se puede comenzar mencionando que la refractometría óptica es una técnica que se utiliza para medir el índice de refracción de diversos medios y materiales.⁽¹³⁾ El índice de refracción es una medida de cómo se desvía la luz al pasar a través de una sustancia. Esta técnica se utiliza comúnmente en diversos campos, incluyendo la industria química, farmacéutica, alimentaria y de materiales.

La refractometría óptica se basa en el principio de que cuando la luz pasa a través de una sustancia con un índice de refracción distinto al del aire, se desvía de su camino. Esta desviación se puede medir y utilizar para calcular el índice de refracción de la sustancia.

La refractometría óptica es una técnica rápida, precisa y no invasiva para medir el índice de refracción de una sustancia. Es muy útil para controlar la calidad de productos químicos y alimentos, así como para realizar análisis de laboratorio de forma rápida y sencilla.

Por ello el diseño de sensores ópticas bajo este principio son muy atractivos para diferentes aplicaciones. Los sensores refractométricos de fibras ópticas son un tipo de sensor refractométrico que utiliza fibras ópticas para transmitir la luz a través de la solución. Estos

sensores tienen varias ventajas sobre los sensores refractométricos tradicionales. En primer lugar, las fibras ópticas permiten una transmisión de la señal de luz más precisa y estable, lo que permite obtener mediciones más precisas y confiables. En segundo lugar, las fibras ópticas son muy resistentes y duraderas, lo que significa que los sensores de fibras ópticas pueden soportar condiciones difíciles y tienen una vida útil más larga. Además, los sensores de fibras ópticas son muy resistentes a la interferencia electromagnética y pueden operar en ambientes con altos niveles de ruido electromagnético como se mencionó anteriormente. Además, son muy pequeños y ligeros, lo que los hace ideales para su uso en aplicaciones donde el espacio es limitado.

Estos sensores funcionan enviando una señal de luz a través de una fibra óptica y midiendo la cantidad de luz que regresa después de pasar a través del medio o material que se está midiendo.

Particularmente, se ha investigado la aplicación de fibras microestructuradas para la detección de diferentes sustancias como gases o líquidos, presentando algunas ventajas atractivas para diversos campos de investigación como la química y biología, en donde las muestras a analizar son de volúmenes muy pequeños. ⁽¹⁾

3.3.1. Transductores refractométricos

Antes de entrar de lleno a los sensores, tenemos que entender que es un transductor refractométrico. Un transductor refractométrico de fibra óptica es un dispositivo que utiliza una fibra óptica para medir la refracción de la luz a través de una muestra de material. Los transductores refractométricos de fibra óptica se utilizan a menudo en aplicaciones industriales y de investigación para determinar la concentración de una solución o el índice de refracción de un material.

La fibra óptica se utiliza en los transductores refractométricos de fibra óptica porque es capaz de transmitir la luz de manera muy precisa y sin pérdidas significativas de intensidad. Esto hace que los transductores refractométricos de fibra óptica sean muy precisos y sensibles, y les permite medir la refracción de la luz con una gran precisión.

Los transductores refractométricos de fibra óptica se pueden utilizar con una amplia variedad de muestras, incluyendo líquidos, gases y sólidos. También se pueden utilizar en entornos donde otros tipos de transductores refractométricos no serían adecuados, como en entornos muy calientes o fríos. Además, los transductores refractométricos de fibra óptica son resistentes a la corrosión y pueden funcionar en entornos con altos niveles de humedad.

3.3.2. Sensores refractométricos de fibra óptica intrínsecos o internos

Los sensores refractométricos de fibra óptica intrínsecos, son aquellos que la propia fibra óptica actúa como elemento sensor:

- **Fibras o barras de vidrio cilíndricas rectas.** La superficie del elemento es expuesta al medio que lo rodea. Esto hace que la transmisión de luz en el elemento sea sensible al índice de refracción del medio que lo rodea.
- **Fibras ópticas o barras de vidrio dobladas o con forma en U.** En el caso de fibras ópticas, en la región del doblado, una porción de la luz sale del núcleo y al entrar al revestimiento, interactúa con el medio que rodea al doblado. Por eso, la propagación es sensible al índice de refracción del medio que rodea al sensor. No es necesario exponer el núcleo de la fibra en este tipo de transductores.
- **Puntas de fibras ópticas o tubos de vidrio planas o con puntas de forma especial.** La forma particular propuesta para un transductor de este tipo son la punta en ángulo, terminada en prisma, cubo, cono y punta redonda.
- **Dos fibras ópticas conectadas por un elemento óptico especial,** cuya transmisión es dependiente de un líquido. El elemento puede ser un prisma o algún otro elemento óptico que se actúe como un retroreflector sensible a líquidos.⁽¹⁴⁾

3.3.3. Sensores refractométricos de fibra óptica con transductor externo

Los sensores refractométricos de fibras ópticas con elementos de detección (transductores) externos emplean la reflexión interna (parcial y/o total) de la luz en la interfaz del elemento transductor que se encuentra en contacto con el medio que rodea al transductor.⁽¹⁾ La ventaja de utilizar elementos transductores externos principalmente consiste en tener un mayor número de parámetros geométricos y ópticos que pueden ser modificados en el diseño

del sensor con la finalidad de obtener una respuesta deseada del sensor: la transmisión óptica del sensor en función del índice de refracción del medio externo.

El principio de operación de este tipo de sensores es el mismo. Lo único que varía es la forma del elemento de detección utilizado para acoplar la fibra transmisora con la receptora, lo que implica que también cambiará la respuesta del sensor. ⁽¹⁵⁾

Este principio de operación básicamente es que un haz de luz, proveniente de una fuente luminosa, se acopla a la fibra óptica transmisora y es llevado hacia el elemento de detección. Dependiendo del índice de refracción del medio externo y de la posición relativa de las fibras, la luz podrá experimentar reflexión interna total, parcial o nula dentro del mismo. De existir reflexión interna, la luz será acoplada a la fibra óptica receptora para ser detectada por un fotodetector. ⁽¹⁶⁾

Cabe mencionar que este tipo de sensores son de intensidad, por lo que la potencia luminosa de la fibra de salida cambia en función del índice de refracción del medio externo que está en contacto con el elemento transductor. Lo anterior ocurre debido a que el acoplamiento entre las fibras por medio del elemento de detección se da gracias a la reflexión interna total o parcial dentro del mismo. Entonces si el medio externo es aire, el índice de refracción externo es mucho menor que el del elemento transductor por lo que habrá reflexión interna total y existirá acoplamiento entre las fibras, esto provocará que gran parte de la potencia luminosa de la fibra óptica transmisora entre a la fibra óptica receptora. Cuando el elemento de detección se encuentra sumergido en algún líquido, el índice de refracción del medio externo se vuelve comparable con el del elemento transductor, por lo que la potencia óptica a la entrada de la fibra receptora disminuirá o desaparecerá por completo.

La geometría de estos transductores puede variar, puede ser desde una forma semiesférica, paraboloidal hasta elipsoidal. La geometría y parámetros son los que cambian y marcan las diferentes características del sensor, como el rango de detección, la sensibilidad, la respuesta con respecto de la distancia relativa de las fibras.

Como se mencionó en el párrafo anterior, existen diferentes geometrías de los elementos de detección en la Fig.26 se pueden observar (A) semiesférico, (B) paraboloidal y

(C) elipsoidal. Para la descripción total de estos elementos de detección, hay diferentes parámetros de diseño. Por ejemplo, distancia de la fibra al centro del elemento (L), diámetro del núcleo de la fibra (D) y radio del elemento (R). Para el caso de los elementos de detección elipsoidales y paraboloides también es posible cambiar el polinomio que describe al elemento, lo que afectará notablemente la respuesta del sensor. ^{(14) (15) (16)}

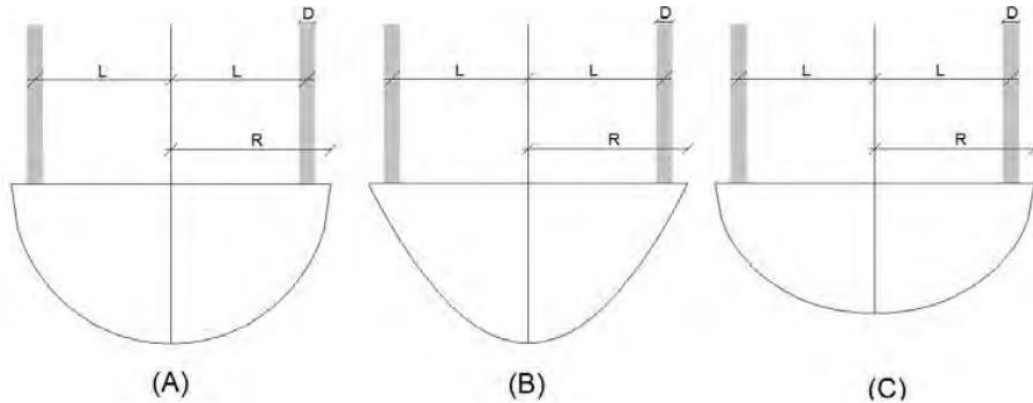


Fig. 26: Diagrama de los elementos de detección (A) semiesférico, (B) paraboloidal y (C) elipsoidal. (15)

3.4. Aplicaciones y retos importantes

Las soluciones en el campo de la tecnología de fibra óptica, en particular los sensores de fibra óptica se utilizan actualmente principalmente en el campo de los equipos e instrumentos de medición. Las mínimas pérdidas a lo largo de la línea en la transmisión de señales de fibra óptica, la total inmunidad a las interferencias electromagnéticas, así como la velocidad de transmisión de la información, hacen que las posibilidades de la tecnología de fibra óptica se presenten ante una gama de técnicas ópticas convencionales utilizadas hasta el momento.

Incluso después de un número considerable de años de desarrollo, los sensores de fibra óptica aún no se han extendido mucho, ya que es difícil reemplazar tecnologías ya bien establecidas, incluso si presentan ciertas limitaciones. Sin embargo, para algunas áreas de aplicación, los sensores de fibra óptica se reconocen cada vez más como una tecnología con posibilidades muy interesantes. ⁽²⁾

Por lo tanto, la especificidad de las fibras ópticas y los sensores de fibra óptica los hace aplicables, entre otros. en:

- Monitores de temperatura y tensión.
- Estructuras inteligentes, que son sensores implementados directamente en materiales compuestos y se utilizan para detectar: vibración, temperatura y tensiones.
- Detección de anomalías del campo electromagnético en los sistemas de distribución de energía.
- Detección de fugas.
- Mediciones precisas de emisión acústica.
- Mecanismos de agarre y otras aplicaciones en manipuladores industriales y robots móviles.
- Sistemas de medición multipunto de un tamaño y varios sistemas de medición en diversos puntos de medición.

Las enormes capacidades de los sensores de fibra óptica también los utilizan con éxito en: industria, ciencia, medicina, tecnologías de defensa y aviación, etc.

3.5. Conclusiones del Capítulo 3

La evolución de los sensores ópticos de fibra óptica indudablemente ha tenido un crecimiento muy significativo durante los últimos años. Como mencionamos a lo largo de este capítulo, esta evolución ha ayudado a que estos sensores tengan cada vez más campos de aplicación debido a las ventajas competitivas que estos presentan respecto a los sensores convencionales como los mecánicos, eléctricos, etc. Esta evolución se debe a varios factores, no solo el acceso a nuevas tecnologías de instrumentos ópticos, sino también, a la constante necesidad de hacer mediciones de alta presión en condiciones difíciles y hostiles, donde los sensores convencionales han presentado una serie de problemas que los sensores ópticos de fibra óptica vienen a solucionar.

Así como estos sensores presentan ventajas sobre otros, también presentan diferentes problemas que hay que considerar a la hora de su diseño, fabricación e implementación.

Los sensores de fibra óptica, estos se clasifican en diferentes categorías dependiendo su comportamiento, su principio de funcionamiento, su geometría, su distribución espacial,

etc. Realmente hacer una clasificación de estos sensores es un tanto abstracta ya que estos son muy amplios y cada día evolucionan. En este trabajo, se quiso dar una pequeña introducción a dichas clasificaciones para que fuera más fácil su entendimiento.

Se abundó un poco más en los sensores de fibra óptica con traductor externo, ya que este tipo de sensores son muy usados en diferentes industrias como la medicina, ingeniería, química, entre otras, para medir el índice de refracción de diferentes materiales y sustancias de gran importancia. Debido a sus grandes aplicaciones, estos sensores han sido objeto de investigación por ya varios años.

Referencias del Capítulo 3

- (1) Castro, A. (2017). *Nuevos sensores refractométricos en fibra óptica*. UNAM, México.
- (2) Pashcota, R. (2021). *Fiber-optic sensors*. RP-Photonics
- (3) W. de Silva, C. (2017). *Sensor Systems: Fundamentals and applications*. CRP Press. Taylor & Francis (pp. 501-535). EE. UU
- (4) López, J. (2002). *Handbook of optical fiber sensing technology*. Cantabria, España: John Wiley & Sons, LTD, pp. 2-13.
- (5) Grattan, K. Meggitt, B. (2000). *Optical Fiber Sensor Technology*. New York, EUA: Springer science+business media, LLC.
- (6) Ramírez, B. (2016). *Sensores de fibra óptica para el monitoreo de la salud estructural de materiales*. UNAM, México.
- (7) Hetch, E. (2002). *Optics*. San Francisco, EUA: Addison Wasley
- (8) Pendo, C. Silva, I. (2022). *Optical Fiber Sensors and Sensinf Networks: Overview of the Main Principles and Applications*. MDPI. Universidad de Minho, Portugal.
- (9) Camarena, A. (2015). *Efecto del control de la birrefringencia de la cavidad de un láser de anillo de fibra dopada con erbio sobre su sintonización espectral*. CICESE, Ensenada, Baja California.
- (10) Randhu, G. (2001). *La tecnología de los sensores de fibra óptica*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- (11) Beléndez, A. (1996). *Fundamentos de óptica para ingeniería informática*. Universidad de Alicante, España.

- (12) Martínez, B. (2012). *Capítulo 3. Dispositivos electro-ópticos*. Modulación de coherencia óptica con dispositivos electro-ópticos con aplicaciones en detección de campos eléctricos. Universidad de las Américas, Puebla, México.
- (13) Khotiaintsev, S. Khotiaintsev, K. Svyryd, V. Ortiz, M, García, C. Morales, J. Yam, L. *Sensores refractométricos de fibras ópticas con superficie de trabajo de segundo orden*. OPTOEL.
- (14) Chávez de la Mora, J. Molina A. Rodríguez, G. (2006). *Desarrollo de un sensor refractométrico*. Tecnológico de Monterrey, México.
- (15) Romo, K. Khotianintsev, S. García, A. (2005) *Analysis of refractometric optical-fiber sensors: comparison between different forms of optical detection element*, Proc. of SPIE, Vol. 5776, pp. 409-420.
- (16) Díaz, R. (2014). *Sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal en modo reflexión*. UNAM, México.
- (17) Khotianintsev, S. Llanito, E. Pérez, S. Morales, J. (2009) *Optical-fiber Refractometric Sensor with Semi-Cylindrical Optical Detection Element for Measuring the level of Gasoline*, CERMA, IEEE, pp. 468-473.
- (18) Vázquez, R. García, C. Romero, A. Alarcón, M. Camas, J. (2008). *Sensor Láser con Rejillas de Bragg de Fibra Óptica Caracterizado con Celdas Peltier para Aplicarse como un Sensor de Alarma de Temperatura*: Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Universidad Iberoamericana de Puebla, Universidad Autónoma del Carmen, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
- (19) Olmo, R. (2005) *Classification of polarization*. Hyperphysics. Georgia State University. Recuperado de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/polclas.html>

CAPÍTULO 4. MODELADO NUMÉRICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN SENSOR REFRACTOMÉTRICO CON TRANSDUCTOR EXTERNO

4.1. Introducción

Como se ha estado mencionando a lo largo de este trabajo, un sensor refractométrico se puede utilizar como dispositivo para medir el índice de refracción de un material o para este caso en específico, analizar si está en presencia de agua o de alguna otra sustancia. En este capítulo se presenta la descripción matemática de los procedimientos básicos del diseño del sensor. El modelado numérico de las características de un sensor refractométrico es una técnica utilizada para simular el comportamiento del sensor y predecir su respuesta ante diferentes condiciones de medición.

El modelado numérico de un sensor refractométrico implica la utilización de herramientas matemáticas y de simulación para estudiar cómo la luz se propaga a través del material y cómo se produce la reflexión y refracción en la interfaz sensor-muestra. Los modelos numéricos pueden ser utilizados para diseñar y optimizar el sensor, así como para predecir su respuesta en diferentes condiciones de medición.

En general, el modelado numérico de un sensor refractométrico involucra la solución de ecuaciones diferenciales parciales y la utilización de algoritmos de simulación para calcular la distribución de la intensidad de la luz, la reflectancia y transmisión en la interfaz sensor-muestra. Además, también es importante tener en cuenta las propiedades ópticas del material utilizado para el sensor, como la longitud de onda de la luz y el índice de refracción del medio.

En resumen, el modelado numérico de las características de un sensor refractométrico es una técnica valiosa para diseñar y optimizar sensores, así como para predecir su respuesta ante diferentes condiciones de medición. La utilización de herramientas matemáticas y de simulación permite estudiar de manera precisa y eficiente el comportamiento de los sensores y su relación con las propiedades ópticas de los materiales utilizados. Debido a lo

anteriormente mencionado, en este capítulo se hará una descripción matemática de las características tanto geométricas como de operación de un sensor refractométrico.

4.2. Descripción física y geométrica del transductor

Un transductor con elemento de detección semiesférico genérico se describe en la Fig.27.

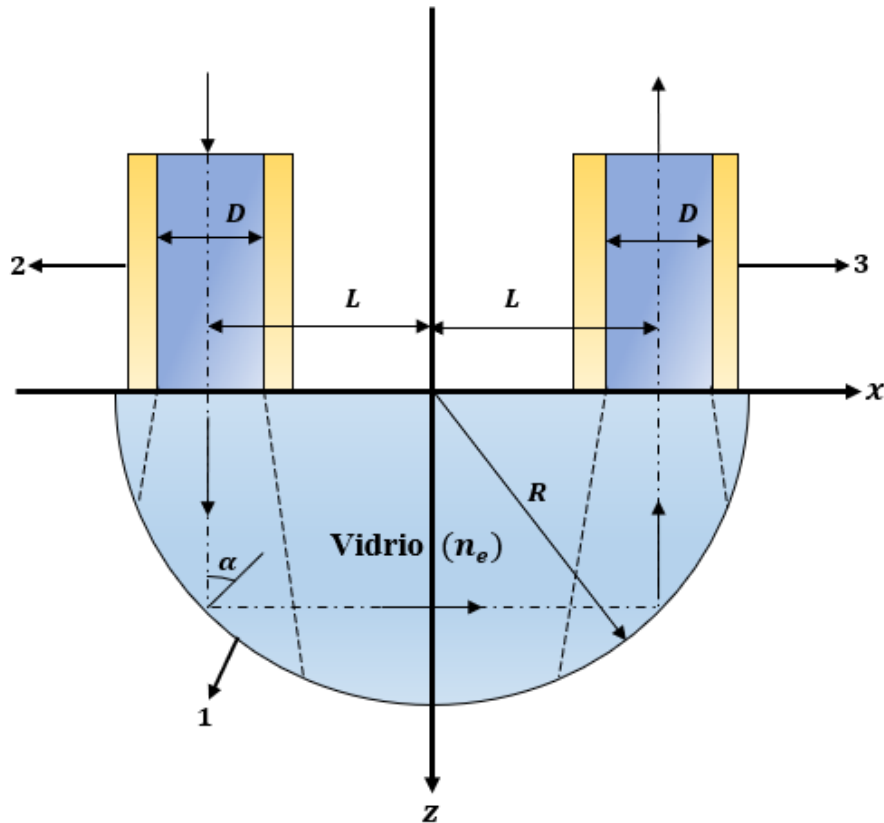


Fig. 27: Transductor refractométrico de fibra óptica compuesto por un elemento de detección dieléctrico semiesférico transparente (1), fibra óptica transmisora (2), fibra óptica receptora (3).

Para este caso en específico, el elemento de detección dieléctrico tiene forma semiesférica, como se mencionó en el capítulo anterior, esta forma puede variar, dependiendo del diseño que se quiera dar, dentro de las formas más comunes son semiesférico, paraboidal y elipsoidal. Este elemento de detección semiesférico tiene un radio R y un índice de refracción n_e , la elección del material dependerá del diseño que se elija y las necesidades que se tengan.

El transductor también consta de un par de fibras ópticas con núcleo de diámetro D , estas fibras se encuentran en ángulos rectos con la superficie plana del elemento y se colocan simétricamente con respecto al eje Z del sistema y una distancia L de dicho eje. Las fibras conectan el elemento con la fuente de luz remota y el medidor de intensidad de luz. La posición de la fibra con respecto al elemento se selecciona de tal manera que las fibras son acopladas ópticamente a través de la reflexión interna total en la superficie semiesférica del elemento cuando el elemento está en el aire. El acoplamiento disminuye cuando el elemento se sumerge en un fluido. La cantidad de cambio depende del índice de refracción del fluido y los parámetros del transductor. ⁽¹⁾

4.2.1. Descripción de la superficie de segundo orden

La superficie de segundo orden también llamada superficie cuadrática es aquella representación implícita que está dada por $f(x, y, z) = 0$ donde $f(x, y, z)$ es un polinomio. Por lo que el modelado de esta superficie de detección se puede representar con el siguiente polinomio ⁽²⁾.

$$a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4x^2z + a_5x^2z + a_6y^2x + a_7y^2z + a_8z^2x + a_9z^2y + a_{10}xy + a_{11}xz + a_{12}yz + a_{13}x + a_{14}y + a_{15}z + a_{16} = 0. \quad (4.1)$$

Donde $a_1 - a_{16}$ son los coeficientes que describen la superficie de segundo orden y x, y, z son las coordenadas cartesianas de los puntos de la superficie.

Para este trabajo, en específico se trabajará con un elemento de sensibilidad esférico, por lo que la ecuación 4.1 se reduce a una ecuación más sencilla. La ecuación en su forma canónica queda de la siguiente forma:

$$a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_{16} = 0. \quad (4.2)$$

Donde a_{16} es el radio de la esfera en cuestión.

4.2.2. Trayectoria de los rayos dentro de los elementos detección

Como ya se definió la geometría del elemento transductor, es hora de hacer un análisis de las trayectorias de los rayos del elemento de detección. Hay diferentes caminos que pueden seguir estas trayectorias. En el interior de cualquier esfera reflectante, las trazas de los rayos

tienen la forma de una simple curva cerrada inscrita en un plano ecuatorial de esta esfera y formada por segmentos de recta. ⁽³⁾

Es importante mencionar que, el acoplamiento entre la fibra transmisora y la fibra receptora ocurre solo bajo ciertas posiciones de la fibra óptica L (Fig.28). Si solo se considera el rayo axial de la fibra óptica de entrada, este acoplamiento ocurre bajo un número entero de reflexiones en serie sobre la superficie esférica dentro del elemento de detección M. La condición para el acoplamiento por medio del rayo axial se puede expresar como:

$$\Lambda = \sin \alpha_0 = \sin \left[\left(1 - \frac{1}{M} \right) \frac{\pi}{2} \right]. \quad (4.3)$$

Donde α_0 es el ángulo de incidencia del rayo axial. Por lo tanto, se dice que las zonas de transmisión máximas existen porque ocurre un fuerte acoplamiento cuando la posición del núcleo de la fibra satisface la ecuación.

A continuación, se muestra una tabla de la relación entre los parámetros L y α_0 correspondientes a los números diferentes de reflexiones M del rayo axial sobre la superficie del elemento detector. ⁽³⁾

Tabla 1. Numero de reflexiones de acuerdo con la relación entre los parámetros L y α_0 con elemento de detección semiesférico.

Posición Λ de las fibras ópticas	Angulo de incidencia α_0	Numero de reflexiones M =Número de zona de reflexión
0	0	1
0.707	45	2
0.86	60	3
0.924	67.5	4
0.951	72	5
0.966	75	6
0.975	77.14	7
0.981	78.75	8

Tomando en cuenta lo anterior y analizando la tabla anterior, se puede concluir que el ángulo α_0 se representa como una función de la posición de la fibra óptica.

Viéndolo de una forma geométrica el parámetro adimensional Λ se puede ver como la relación de la distancia entre el punto de incidencia del rayo en el elemento L y el centro del elemento entre el radio del elemento de detección, R . (Fig. 28)

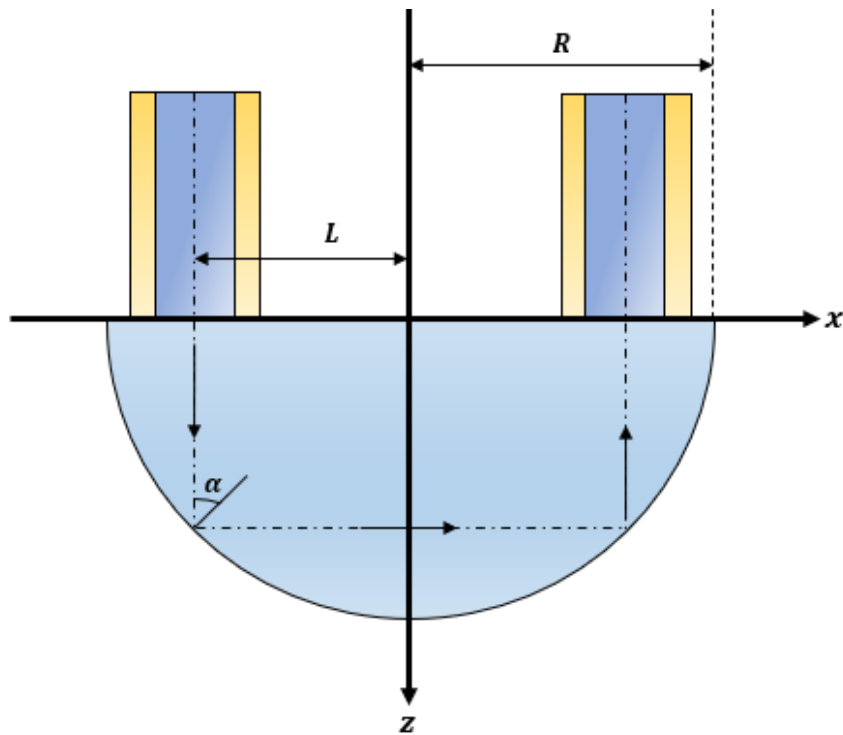


Fig. 28: Trayectoria de un rayo dentro del elemento de detección semiesférico.

Para que quede un poco más claro el comportamiento de las trayectorias dentro del elemento detector, a continuación, se muestra la Fig.29, donde se muestra algunas de las trayectorias a diferentes valores de Λ .

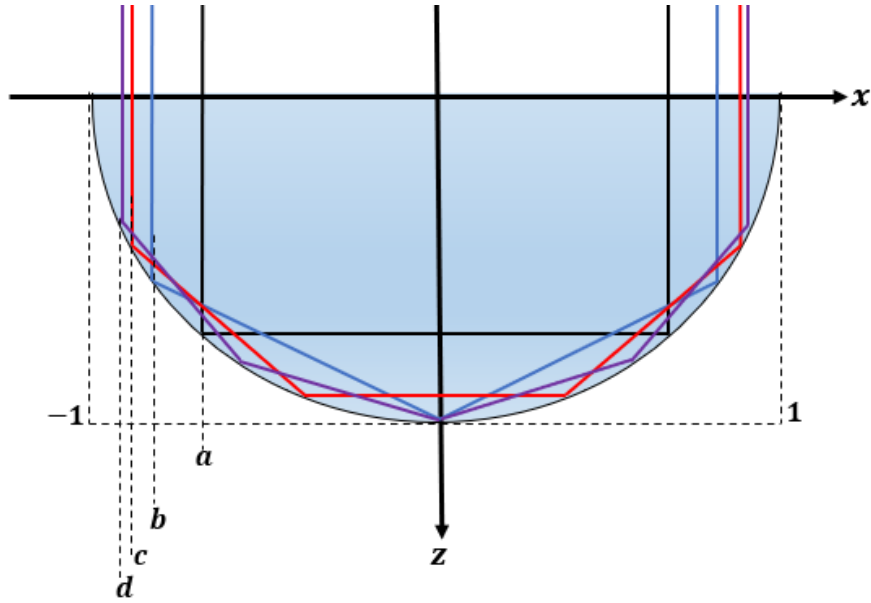


Fig. 29: Trayectorias de algunos rayos a diferentes valores de Λ a)0.707 b)0.866 c)0.924 d)0.951.

Cabe destacar que estas trayectorias pueden variar ligeramente, debido a la geometría del elemento de detección, es decir, si es elipsoidal o paraboidal.

La posición de las fibras se elegirá de acuerdo con las características que el sensor necesite. Para ello es necesario el uso del ángulo crítico (ecuación (2.2) vista en el capítulo 2 de este trabajo). Por ejemplo, supongamos que se quiere discriminar entre agua y aire y el material del elemento detector es cuarzo fundido con $n_e = 1.46$. Primero obtenemos que obtener el ángulo crítico que este tiene en el aire $n_{ext} = 1$, por lo que se tiene:

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_{ext}}{n_e}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1}{1.46}\right) = 43.23^\circ.$$

Después se obtiene el ángulo crítico cuando esté en el agua $n_{ext} = 1.333$.

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_{ext}}{n_e}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1.333}{1.46}\right) = 65.638^\circ.$$

Si queremos diseñar un sensor que discrimine entre aire y agua es necesario utilizar un ángulo de incidencia mayor a $\theta_c = 43.23^\circ$ que corresponde a la relación de aire/cuarzo fundido y menor a $\theta_c = 65.638^\circ$ que corresponde a la relación agua/cuarzo fundido, teniendo

en cuanto estos valores, si se observa la tabla 1, la posición tendría que ser $0.707 \leq \Lambda \leq 0.866$.

Como se estuvo mencionando a lo largo de esta parte del capítulo, la posición adimensional dependerá totalmente del medio a la que el transductor sea sometido y del material utilizado para la construcción del elemento de detección.

4.3. Características de operación y rendimiento de los transductores refractométricos

Las características de rendimiento de los transductores refractométricos son fundamentales para asegurar mediciones precisas y fiables en una amplia variedad de aplicaciones, por ello son piezas clave que deben ser considerados durante el diseño y la optimización de los transductores refractométricos.

4.3.1. Transmisión del transductor

La transmisión del transductor se puede definir como la relación entre la salida óptica y la entrada del transductor en función del índice de refracción del medio circundante ⁽¹⁾ y está dada por la siguiente expresión:

$$T(n) = \frac{I_2(n)}{I_1} \quad (4.4)$$

Donde I_1 es la intensidad de luz de entrada (es decir, la luz lanzada a través de la fibra transmisora, $I_2(n)$ es la intensidad de la luz a la salida del transductor (es decir, la luz aceptada por la fibra receptora). Cabe mencionar, que esta última es una función del índice de refracción n del medio circundante.

Como todo lo relacionado a ópticas se puede expresar en decibeles, esta transmisión no es la excepción, entonces la expresión en decibeles queda de la siguiente forma:

$$T(n)[dB] = 10 \log_{10} T(n). \quad (4.5)$$

Esta escala logarítmica es muy útil cuando la transmisión del transductor se analiza en un rango amplio.

4.3.2. Transmisión relativa

Debido a que la intensidad de entrada I_1 no se puede medir experimentalmente ya que es la intensidad de la luz en el núcleo de la fibra óptica, es conveniente caracterizar el funcionamiento experimental del sensor en términos de la función de la transmisión relativa ⁽²⁾ que está dada por la siguiente expresión:

$$T^*(n) = \frac{T(n)}{T_{aire}} = \frac{I_2(n)}{I_{2aire}}. \quad (4.6)$$

donde T_{aire} e I_{2aire} son la transmisión del transductor y la intensidad de la luz de salida cuando el medio que los rodea es aire.

La transmisión relativa es realmente la que se usa a la hora de analizar el comportamiento del sensor, ya que, relacionar la transmisión del transductor con la del aire permite excluir la pérdida óptica intrínseca que no depende del fluido de las características del rendimiento del transductor. ^{(1) (2) (4)}

Entonces, la peculiaridad de la transmisión relativa $T^*(n)$ es que muestra explícitamente el efecto del índice de refracción del medio circundante. A demás, cabe recalcar que el procedimiento electrónico posterior puede descartar fácilmente la pérdida no dependiente del fluido al que es sometido el transductor.

La transmisión relativa también se puede expresar en decibeles:

$$T^*(n)[dB] = 10 \log_{10} T^*(n). \quad (4.7)$$

4.3.3. Intervalo de entrada y salida

Primero se encuentra el intervalo de entrada, en palabras simples se puede definir como el rango en el que se puede variar el índice de refracción para ser medido. Este rango está comprendido entre el valor máximo y el valor mínimo que puede ser medido con el elemento de sensibilidad ⁽⁵⁾.

$$\Delta n = n_{\max} - n_{\min}. \quad (4.8)$$

Ahora bien, hablando del intervalo de salida, este se puede entender como el rango de transmisión relativa comprendida entre n_{\min} a n_{\max} .

$$\Delta T^* = |T^*(n_{m\acute{a}x}) - T^*(n_{m\acute{i}n})|. \quad (4.9)$$

4.3.4. No linealidad

Esta característica está relacionada con la transmisión relativa, esta característica se expresa como un porcentaje de la diferencia entre el comportamiento lineal ideal y la longitud de intervalo de salida ⁽²⁾. La expresión de este porcentaje es el siguiente:

$$N(n) = \frac{T^*(n) - (Kn + a)}{\Delta T^*} \times 100\%. \quad (4.10)$$

donde $(Kn + a)$ es la expresión de la recta característica ideal, esta recta ideal conecta el punto máximo y mínimo, teniendo en cuenta esto, K es la pendiente de la recta ideal, entonces $K = \frac{\Delta T^*}{\Delta n}$, el ultimo elemento es a , esta es la ordenada al origen. ⁽⁵⁾

En otras palabras, la no linealidad en estos sensores se refiere a la relación no proporcional entre la magnitud de la propiedad medida y la señal de salida del sensor. Esta característica puede afectar la precisión y la fiabilidad de la medición en los sensores ópticos, por lo que es importante comprender y minimizar su efecto en el diseño y la calibración del sensor.

4.3.5. Sensibilidad del transductor

La sensibilidad del transductor de un sensor óptico refractométrico se refiere a la capacidad del sensor para detectar cambios en el índice de refracción de un medio de interés. Cuanto mayor sea la sensibilidad del transductor, menor será la magnitud del cambio en el índice de refracción que puede ser detectado por el sensor.

En general, la sensibilidad del transductor se mide en términos de su relación de cambio de señal a cambio de índice de refracción. Por lo que una mayor relación de cambio significa que el transductor es más sensible a pequeños cambios en el índice de refracción de la muestra. La sensibilidad está dada por la siguiente expresión:

$$S(n) = \frac{dT^*(n)}{dn} \approx \frac{T^*(n_1) - T^*(n_2)}{n_1 - n_2}. \quad (4.11)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refractividad en la vecindad de n . Para el caso de una recta ideal como característica de transmisión $S(n) = K$ ⁽⁵⁾. Esta sensibilidad depende de varios

factores, como la configuración del sensor, las propiedades ópticas del medio de interés y la calidad de los componentes ópticos utilizados en el sensor.

Como se mencionó anteriormente, la sensibilidad puede variar ampliamente según su diseño y construcción. Algunos sensores ópticos refractométricos son capaces de detectar variaciones en el índice de refracción de hasta 10^{-6} , lo que significa que pueden detectar cambios muy pequeños en la concentración de soluciones.

Es primordial tener en cuenta que la sensibilidad del transductor no es el único factor que determina la sensibilidad global del sensor óptico refractométrico, ya que otros factores, como la calidad del láser utilizado y la estabilidad del sistema de medición, también pueden afectar la sensibilidad y la precisión de las mediciones.

4.3.6. Pérdidas ópticas propias

El transductor como elemento de sensibilidad tiene sus propias pérdidas. Estas pérdidas se pueden clasificar en dos partes:

4.3.6.1. Pérdidas relacionadas con la estructura geométrica del elemento de sensibilidad (intrínsecas)

El sensor puede llegar a presentar pérdidas ópticas intrínsecas, estas pérdidas son independiente del líquido al que el sensor es sometido y es por lo tanto un factor negativo del desempeño del traductor. La pérdida óptica intrínseca se debe a la imperfección y la independencia de líquido del acoplamiento entre las dos fibras y el transductor.

Estas pérdidas se atribuyen a diferentes factores, por mencionar algunos se puede decir que, debido a condiciones de entrada impropias o defectos estructurales (como la no homogeneidad del material, ralladuras en su superficie, etc.). También, podría ser por errores en el enfoque del haz de entrada hacia el núcleo de la fibra de salida, dentro de los límites de su apertura angular.

Un método para analizar y estimar las pérdidas que se generan por la estructura geométrica se calcula la transmisión del elemento en la condición de la reflexión total de su superficie, dependiendo de la posición a la que se colocan las fibras ópticas. ⁽⁶⁾

Estas pérdidas se pueden representar con la siguiente expresión:

$$A[dB] = 10 \log_{10} \frac{1}{T_{aire}} = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_{2aire}}. \quad (4.12)$$

Dichas pérdidas intrínsecas son exclusivamente a la estructura del transductor. ⁽⁵⁾

4.3.6.2. Pérdidas iniciales de Fresnel

Provenientes con la reflexión incompleta de la superficie del elemento de sensibilidad que se encuentra en el medio de referencia (para este caso en específico el aire). ⁽⁶⁾

4.4. Variación de parámetros

Los parámetros constantes y geométricos que intervienen en el diseño del sensor óptico refractométrico, afectan directamente a la función de transmisión del transductor y a la no linealidad de este.

Por lo tanto, al afectar directamente, estos parámetros se pueden modificar para así poder tener la posibilidad de modificar la sensibilidad del transductor y mejorar, si es que se puede, su respuesta.

La función de transmisión se puede modificar significativamente de cuatro formas principales. La primera es cambiando el diámetro del núcleo de fibra óptica, otro parámetro que se puede modificar es la posición adimensional (tratado anteriormente). De igual manera, se puede modificar la apertura numérica de la fibra receptora. Y finalmente, se puede cambiar el material del elemento de sensibilidad, esto provocará cambios en el índice de refracción n_e , cabe señalar que es conveniente hacer un análisis de los diferentes materiales ópticos existentes, para así poder discriminar cuál es el material idóneo para la construcción del sensor, ya que unos tienen mejor respuesta que otros, aclarando de nuevo, todo esto dependerá de las necesidades del sensor.

Si se cambia el diámetro de la fibra óptica, resulta en un aumento en el rango de índices de refracción medibles. Para poder observar el comportamiento dentro del elemento de detección, este se puede graficar en función a su transmisión relativa. Ahora bien, si se observa la gráfica de la Fig. 30, se ve la curva característica del transductor, esta tiene forma

de escalón, esta forma ayuda a dos cosas, primero se podría utilizar para discriminar entre aire o un líquido, o bien, diferenciar entre distintos fluidos.

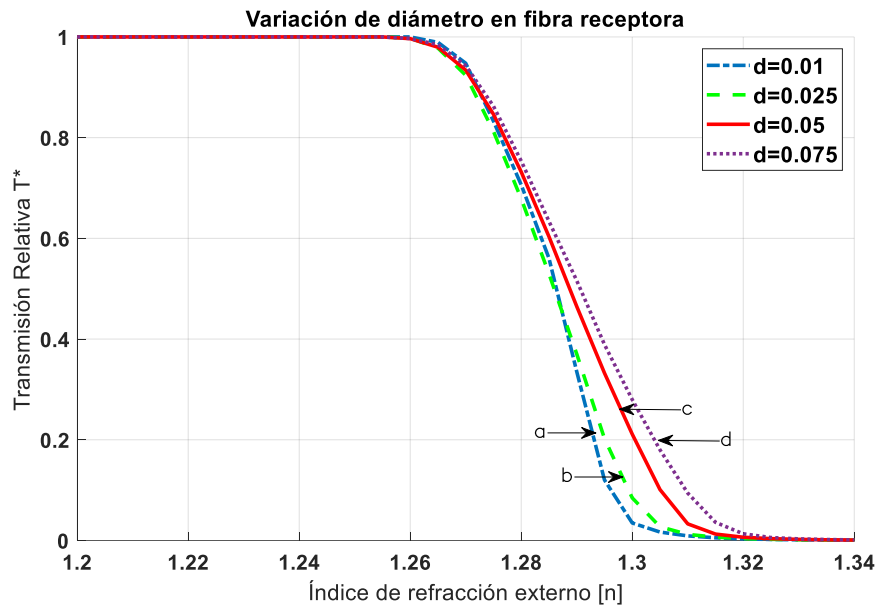


Fig. 30: Gráfica de T^* vs n con variación de diámetro de la fibra receptora. $d_1 = 0.05$ y $d_2(a) = 0.01$, $d_2(b) = 0.025$, $d_2(c) = 0.05$ y $d_2(d) = 0.075$.⁽¹⁾

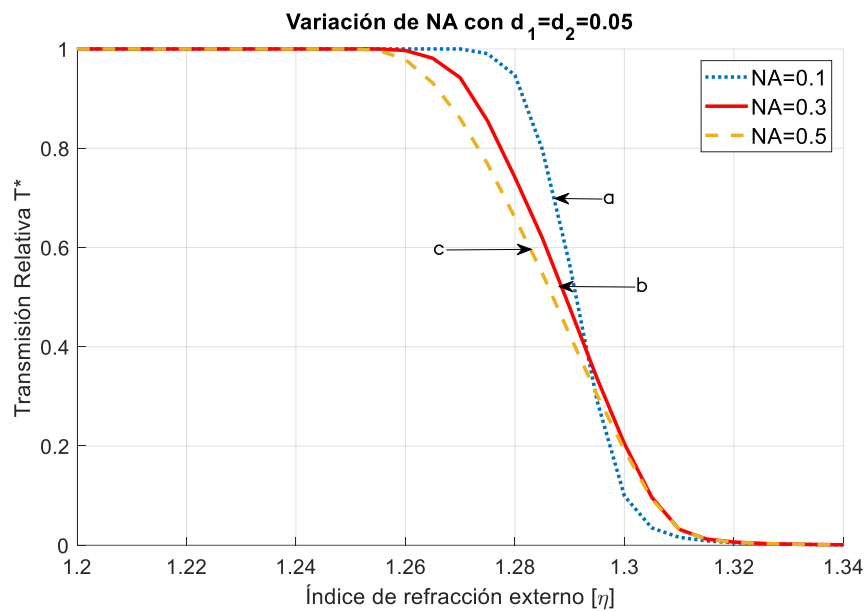


Fig. 31: Gráfica de T^* vs n con variación de apertura numérica de la fibra receptora. $NA_1 = 0.05$ y $NA_2(a) = 0.1$, $NA_2(b) = 0.3$, $NA_2(c) = 0.5$.⁽¹⁾

En la gráfica que se muestra en la Fig. 31, se puede observar la variación que tiene la curva característica del transductor a diferentes aperturas numéricas. El concepto de apertura numérica (mencionado en el capítulo 2) es de extrema importancia, ya que corresponde a la propiedad de la fibra para recolectar la luz y propagarla, entonces al aumentar la apertura, aumenta la cantidad de luz que puede entrar a la fibra. ⁽⁷⁾

Como ya se había mencionado, otro parámetro que se puede modificar es la posición adimensional de las fibras. Por lo que en la Fig. 32, se demuestra la posibilidad de modificar este parámetro, y esto también da pie a que la curva de transmisión a lo largo del eje n tenga diferentes comportamientos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la posición no la podemos cambiar aleatoriamente, esta se puede variar dentro de un rango que el material utilizado para el elemento de detección da, de acuerdo con su ángulo crítico.

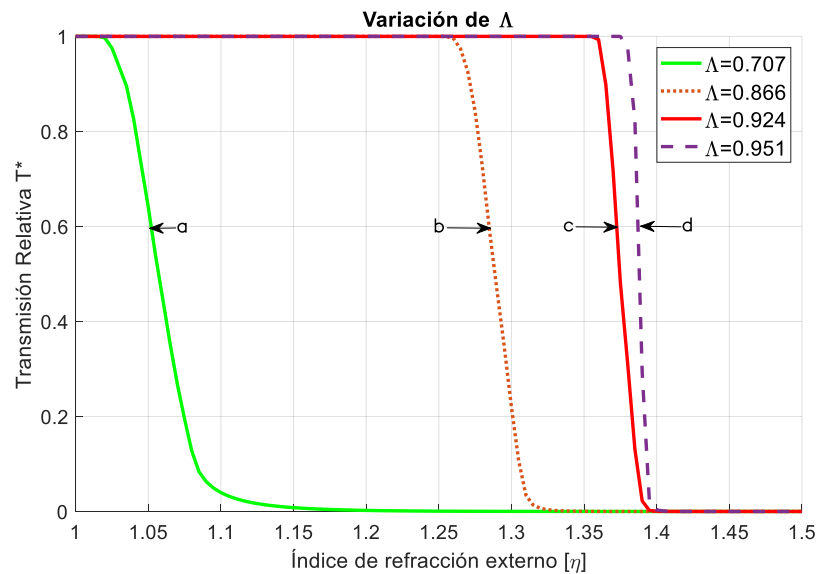


Fig. 32: Gráfica de T^* vs n con variación de Λ con $\Lambda(a) = 0.707$, $\Lambda(b) = 0.866$, $\Lambda(c) = 0.924$ y $\Lambda(d) = 0.951$.⁽¹⁾

También hay que recordar que el exceder las distancias máximas de transmisión puede tener como resultado pérdida de señal significativa, lo que produce una transmisión no confiable.

4.5. Software SRFO

El programa SRFO es un software con una interfaz gráfica agradable con el usuario, donde se puede simular el comportamiento del transductor que se quiere diseñar, esto se debe a que en la interfaz se colocan las características tanto de la fibra transmisora como las de la fibra receptora (apertura, perfil, diámetro), índice de refracción del material del elemento de detección, el número de rayos incidentes y un barrido del índice de refracción $n_{inicial} - n_{final}$.

Este software fue desarrollado en MS Visual Basic 6.0. Visual Basic es un lenguaje orientado a eventos, es decir, cuando un programa escrito en Visual Basic se ejecuta, lo único que hace es quedarse a la espera de las acciones del usuario, que en este caso son llamados eventos ⁽⁸⁾ y esto hace que la programación sea especialmente sencilla y agradable.

4.5.1. Interfaz grafica

La interfaz gráfica es la siguiente (Fig.33):

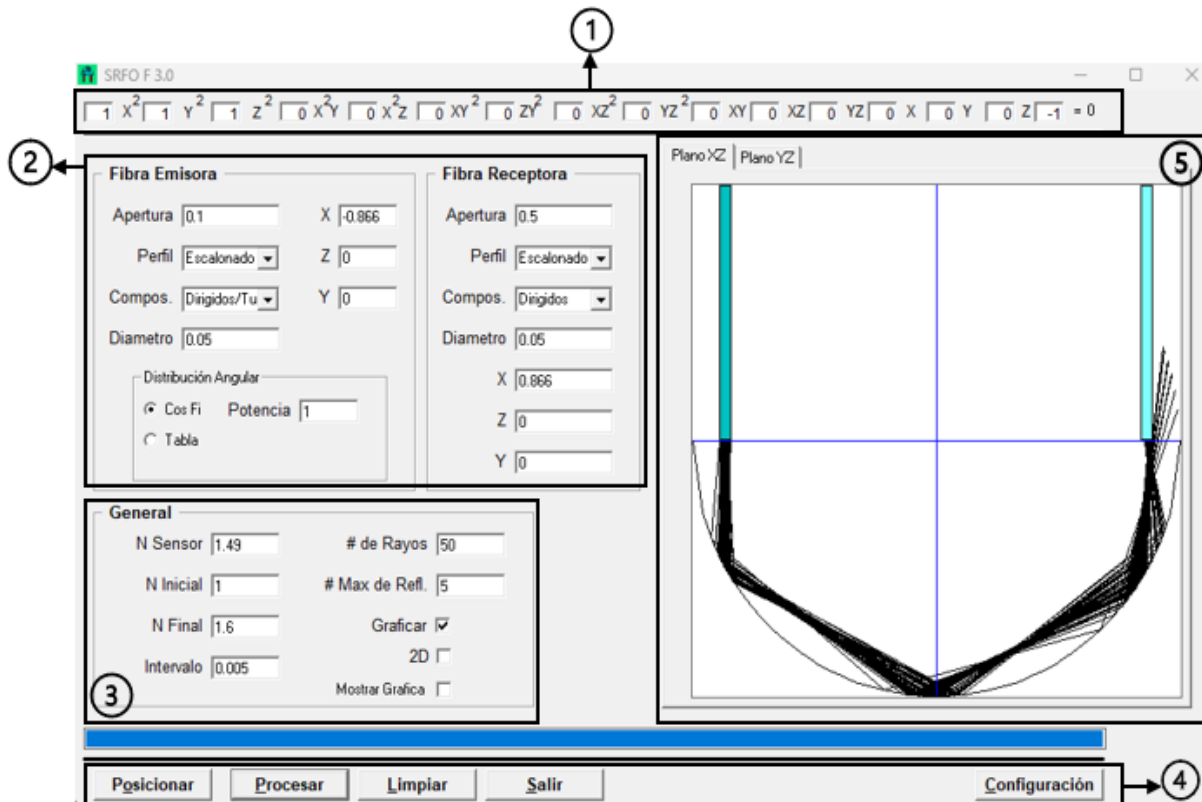


Fig. 33: Interfaz gráfica del software SFRO.

Donde:

① **Polinomio característico:** Este polinomio describe la superficie del elemento detector, aquí se cambian los coeficientes para poner la superficie deseada.

② **Parámetros fibra emisora y receptora:** Esta sección permite especificar las características de las fibras, como la apertura numérica, el diámetro, su perfil, y las coordenadas (x, y, z) que definen su posición. Cada vez que se cambian estos valores, automáticamente la ventana se actualiza.

Parámetros de simulación: Aquí se especifican las características del sensor (índice de refracción), así como los parámetros de simulación como intervalo de los índices de refracción a calcular ($n_{inicial} - n_{final}$), numero de reflexiones permitidas, pasos del mismo intervalo, varias opciones para graficar.

Botones de operación: Aquí se encuentran los botones que controlan la simulación. **Posicionar**, actualiza la ventana del despliegue. **Procesar**, inicia la simulación.

④ **Limpiar**, limpia el contenido de la ventana, así como las variables, **Salir**, termina la simulación y termina el programa. **Configurar**, configura la ruta para los archivos de datos.

Ventana del despliegue: Cuadro que despliega gráficamente el corte transversal del sensor en el plano XZ, así como las posiciones de las fibras. Después de realizada la simulación despliega las trayectorias de los rayos individuales si así ha sido solicitado por el usuario en el cuadro. ⁽⁸⁾

En cuanto a su funcionamiento, a continuación, se muestra un diagrama que lo describe en forma general (Fig.34) ⁽⁸⁾:

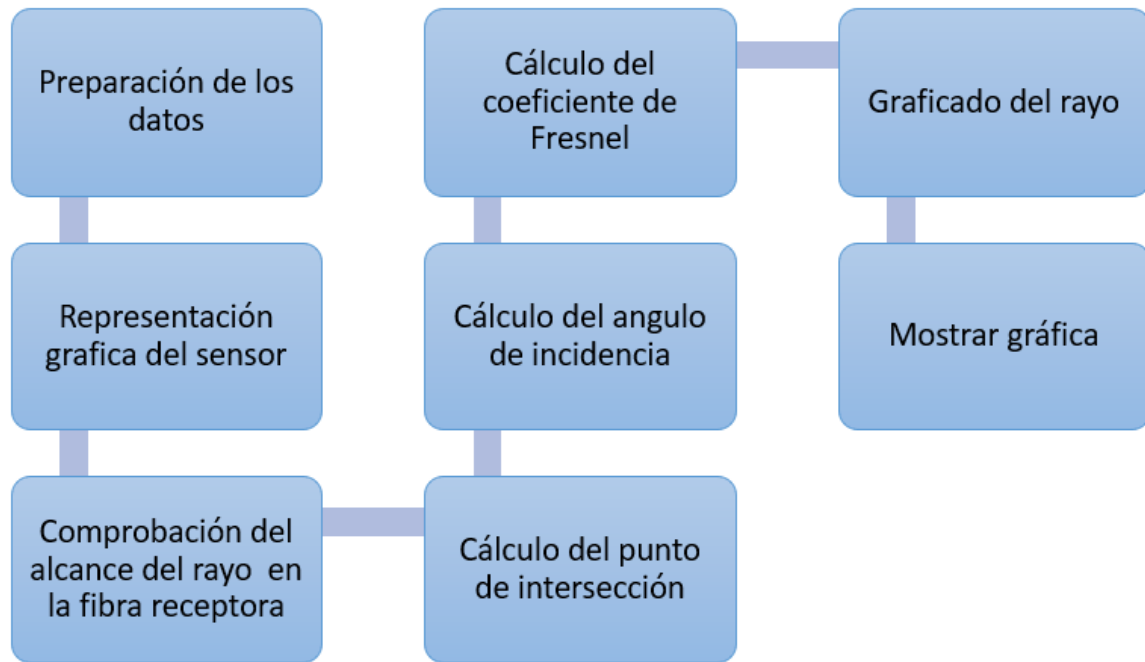


Fig. 34: Esquema del algoritmo de funcionamiento del software SRFO

4.5.2. Archivos generados

Después de que el programa procesa los datos introducidos por el usuario, este procede a realizar los cálculos y procedimientos necesarios en el intervalo de trabajo para poder así preparar los datos de salida y grabarlos en archivos para dárselos al usuario y este los pueda interpretar. Los archivos de salida más importantes son:

- **Archivo .PSR:** Este archivo contiene los resultados de la simulación final, consta de dos columnas. La primera columna es el índice de refracción, este va desde $n_{inicial}$ hasta n_{final} en intervalos dados por el usuario. La segunda columna contiene la transmisión absoluta.
- **Archivo .DSR:** Este archivo consta de 3 columnas, pues esta da las coordenadas cartesianas (x, y, z) del punto de salida del rayo desde la fibra óptica transmisora. Cada renglón corresponde a un punto distinto de salida.

4.6. Conclusiones del Capítulo 4

El modelado numérico de las características de un sensor refractométrico con transductor externo, implica la utilización de un modelo matemático que describa la interacción de la luz con el medio de prueba y el transductor externo. En general, estos modelos se basan en la teoría de la óptica. Una vez propuesto el modelo, para ver su comportamiento antes de su implementación experimental, es de vital importancia hacer las simulaciones necesarias para ver si será factible o no.

La simulación se tiene que hacer de los modelos propuestos. Estos modelos pueden ser útiles para entender el comportamiento del sensor en ciertas condiciones y para optimizar su diseño y funcionamiento. Para este caso en particular el hacer uso del software SRFO, es muy útil. Realmente la simulación en este entorno es muy sencilla, ya que, el usuario solo tiene que ingresar los datos geométricos de las fibras y características del detector.

La simulación en SRFO nos da la posible respuesta de nuestro sensor en diferentes condiciones. Es importante recalcar, que para nuestro interés en específico, el archivo .psr, que arroja el software, es el archivo que utilizaremos, este nos arroja la transmisión absoluta, esto importa ya que, el punto de interés es ver el comportamiento del sensor en el aire y ver qué pasa cuando se somete a una muestra. Lo único que se tiene que hacer es normalizar esta transmisión absoluta para convertirla en transmisión relativa, debido a que esta transmisión permite excluir la pérdida óptica intrínseca del rendimiento del transductor.

Referencias del Capítulo 4

- (1) Khotiaintsev, S, Svirid, V. (2002). *Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element*. Optical Engineering, pp. 779-787.
- (2) Khotiaintsev, S, Svirid, V. (2006). *Mathematical Modeling of Optical-Fiber Refractometric Device*. UNAM. México.
- (3) García, C. García, S. Khotiaintsev, S. Morales, J. Yam, L. (2012). *Optical Intensity Type Refractometer for Remote Measurements Via Fiber-Optic Cables*. Journal of Lightwave Technology. IEEE. Vol. 30, No. 8.
- (4) Khotiaintsev, S, Svirid, V. (2006). *Design of an optical-fiber refractometric transducer with hemispherical detection element*. Revista Mexicana de física UNAM. México.

- (5) Romo, K. (2007). *Comparación y estudios de algunas estructuras sensoras con base en fibras ópticas*. UNAM, México.
- (6) Svirid, V. (2001). *Sensores refractométricos en fibra óptica*. UNAM, México.
- (7) Bass, M. (2002). *Fiber optics handbook: Fiber, devices and systems for optical communication*. Optical Society of America. New York, EUA: McGraw-Hill.
- (8) Khotiaintsev, K. (2005). *Desarrollo de una aplicación de simulación numérica de sensores refractométricos en fibras ópticas*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla.

CAPÍTULO 5. PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR REFRACTOMÉTRICO DETECTOR DE AGUA

5.1. Introducción

Una de las metas principales de este trabajo es determinar la mejor forma de un elemento de fibra óptica para servir de detector de agua, por lo que el diseño y caracterización experimental de un sensor óptico refractométrico es de vital importancia para lograr este fin.

Un sensor óptico refractométrico discriminador de aire y agua es un tipo de sensor que se utiliza para detectar la presencia de agua en un ambiente determinado. Cuando la luz pasa de un medio a otro con un índice de refracción diferente, se produce una refracción, lo que significa que la luz cambia su dirección y velocidad. Lo que se pretende es que la transmisión de la luz en el sensor varía en función de refracción que ocurre cuando la luz interactúa con medios externos diferentes – al aire y el agua, lo que permitirá determinar si el sensor está en presencia de agua o no.

Este sensor es muy útil, se puede utilizar en diversas aplicaciones, como la detección de fugas de agua de las tuberías, el ingreso de agua en ciertos espacios, etc.

A continuación, se describe una propuesta conceptual del sensor refractométrico óptico de acuerdo con las necesidades planteadas, la elección de los componentes elegidos para realizar el experimento, la instalación experimental y los resultados a los que se llegó.

5.2. Propuesta conceptual del sensor refractométrico detector de agua

Primero se necesita plantear las necesidades de este sensor en específico. Como se mencionó en la introducción, se necesita de un sensor que discrimine entre aire y agua. Para lograrlo, primero hay que hacer una evaluación y selección de los elementos necesarios para la elaboración de dicho sensor. Después de un análisis detallado de opciones existentes se llegó a la siguiente lista de componentes:

- **Transductor refractométrico:** Este es de vital importancia ya que este componente es el que será sometido al ensayo en este elemento es donde ocurrirá

reflexión total interna si está en el aire y cambiará al introducirlo al agua. Este elemento tiene que estar acoplado tanto a la fibra emisora como fibra receptora.

- **Fuente de luz:** Se necesita una fuente de luz coherente, ya que el haz de esta presenta una longitud de onda casi única (luz monocromática) y una baja divergencia. Además de que sea coherente, se necesita que sea que la fuente sea de onda continua, por lo que un láser de onda continua es perfecto para nuestro diseño. Este tipo de láser se bombea continuamente y emite luz de forma continua, es decir, que tiene una potencia de haz bastante estable.
- **Fibra óptica:** Es necesario el uso de dos fibras. La primera la fibra transmisora, pues será el medio por el cual de la luz de la fuente pase al transductor. También es necesario el uso de la fibra receptora, pues a esta le llegará la luz que arroje el transductor tanto si está en el aire como cuando es sometido al agua. Además, esta a su vez, estará conectada al foto receptor, para medir el nivel de señal óptica de salida.
- **Acopladores:** Para poder hacer uso del sensor, es necesario el uso de acopladores para poder acoplar la luz que proviene de la fuente a la fibra, de la fibra al receptor y también la luz que pasa por la fibra al transductor, entre mejor acoplamiento, más precisa será la medición.
- **Receptor:** Si se quiere hacer el detector de agua, es necesario medir el nivel de señal que llega, tanto cuando está en el aire, como cuando el transductor es sometido al agua y se necesita convertir la luz de salida en una señal eléctrica para poder observar el comportamiento de esta. Este dispositivo tiene que estar acoplado a la fibra receptora.
- **Desplazador mecánico de 3 ejes:** Este es necesario ya que el diseño se requiere una gran precisión de la posición de las fibras en el transductor, por lo tanto, este desplazador nos ayudará a mover las fibras milimétricamente, para llegar a la posición deseada, en los ejes, x , y , y z . Este desplazador también será necesario para acoplar la luz que salga de la fuente a la fibra óptica transmisora, debido a que debemos encontrar la posición de mayor acoplamiento óptico de la fuente y la fibra.

- **Indicador de desplazamiento de precisión:** Para saber cuánto se mueve la fibra en los ejes, gracias al desplazador anteriormente mencionado, se necesita considerar este componente que mida milimétricamente el desplazamiento de un objeto.
- **Osciloscopio:** Como se necesita medir el nivel de las señales, se necesita un osciloscopio para poder hacer una comparación entre la señal de entrada y la de salida.
- **Muestra de agua:** Pues para probar si el sensor funciona es necesario someterlo a la muestra de agua, en este caso en particular será un recipiente con unos 200 ml de agua destilada.

A continuación, se muestra el diagrama general de bloques de la instalación para ensayos del sensor y su monitoreo (Fig.35):

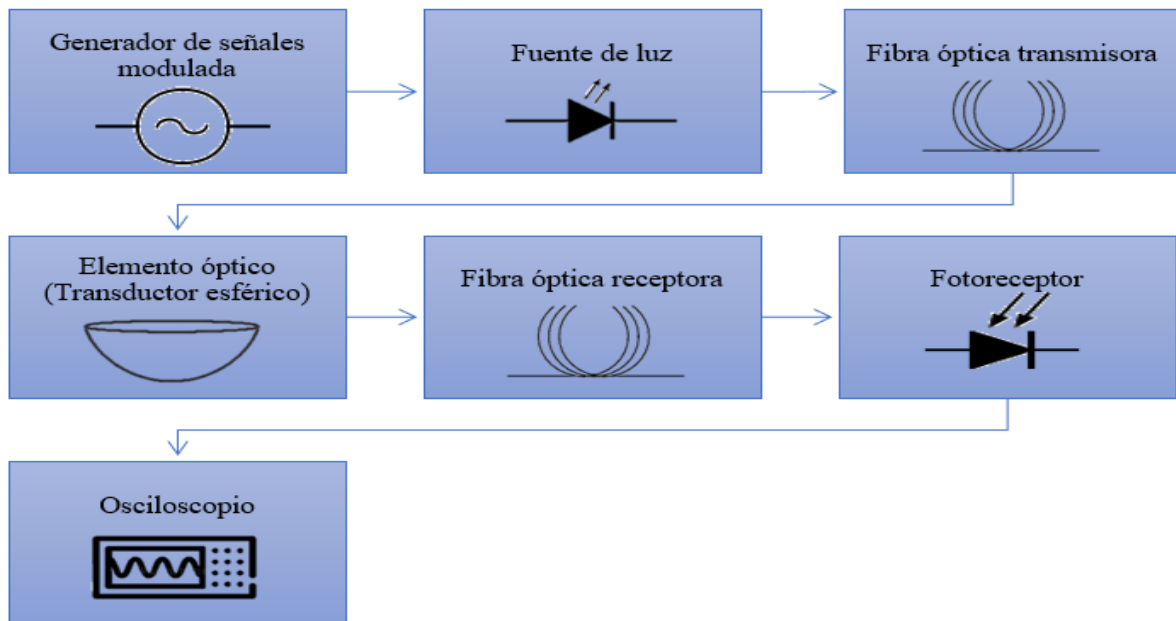


Fig. 35: Diagrama de bloques de la instalación para ensayos del sensor.

También, en la Fig. 36 se muestra un esquema de la instalación de ensayos del sensor óptico refractométrico propuesto:

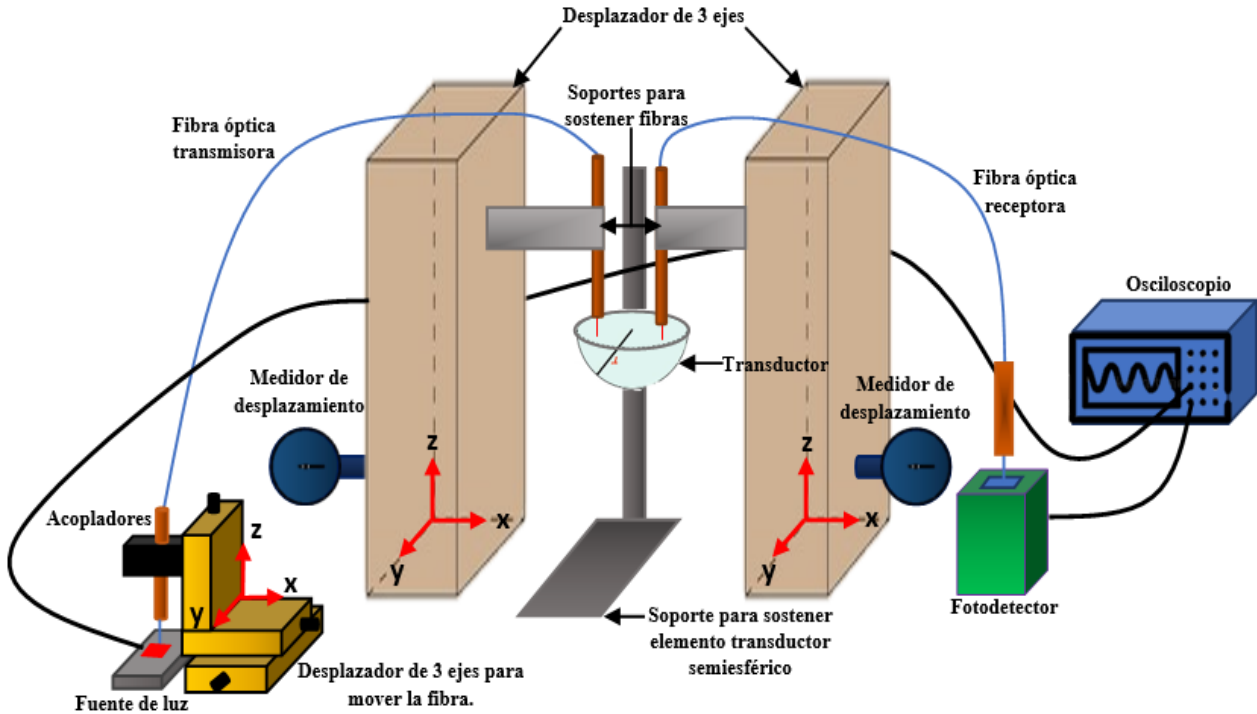


Fig. 36: Esquema de la instalación experimental.

5.3. Consideraciones sobre la elección de los elementos de la instalación para la experimentación con el sensor óptico refractométrico propuesto

Ahora bien, como ya se sabe lo que se necesita para la implementación del sensor, es necesario conocer las características específicas de los componentes de este sensor, por lo que, a continuación, se explica a detalle cada elemento.

5.3.1. Transductor refractométrico óptico

Para el transductor se tiene un elemento semiesférico con un diámetro de 16[mm]. El material es PMMA (acrílico) con un índice de refracción $n = 1.49$.

Su superficie está descrita por la ecuación:

$$x^2 + y^2 + z^2 - 1 = 0.$$



Fig. 37: Transductor refractométrico semiesférico

5.3.2. Fuente de luz

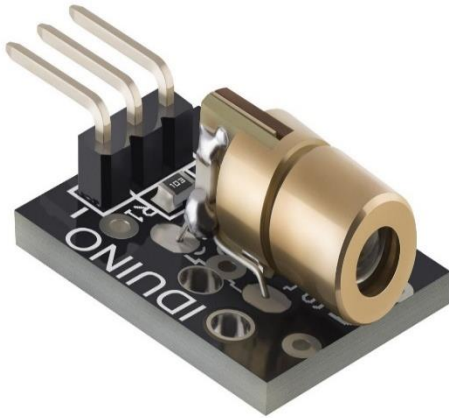


Fig. 38: Diodo laser

Para la fuente de luz, se eligió un diodo laser de color rojo (Fig.37) con una longitud de onda de 650 nm, con clasificación CLASE 3B, esto quiere decir que la visión directa del haz es siempre peligrosa, por lo que se debe tener cuidado cuando se hace uso de este tipo de laser. (Ver Anexo 1)

El diodo laser emiten luz por el principio de emisión estimulada, por lo que es utilizado muy comúnmente como fuente de alimentación lumínica para sistemas de telecomunicaciones vía fibra óptica. Sin embargo, para utilizar un diodo láser como fuente lumínica, es necesario diseñar un sistema de control que mantenga el punto de operación del sistema fijo, debido a que un corrimiento de este punto puede sacar al diodo fuera de operación o incluso dañarlo. Por ello, se hizo uso de un generador de pulso NE555 (Fig.38) con: 4 puentes, cada uno con un rango de frecuencia y 2 trimmers variables, así los usuarios pueden ajustar la onda de salida con estos componentes, para conseguir su onda ideal fácilmente. (Ver Anexo 2)



Fig. 39: Circuito NE555

5.3.3. Fibra óptica

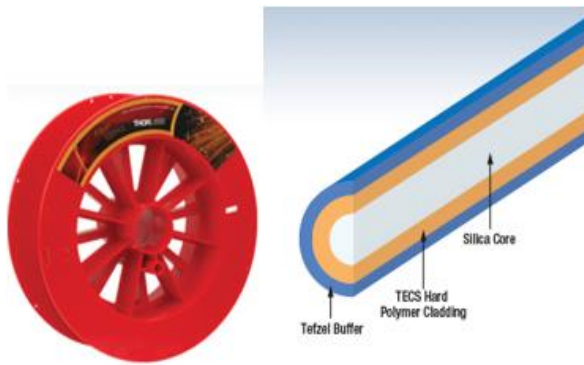


Fig. 40: Fibra óptica FT400EMT

La fibra óptica elegida fue la fibra multimodo FT400EMT, con un diámetro de $0.4[mm]$ de núcleo, $0.425[mm]$ de diámetro de revestimiento y $0.730[mm]$ de diámetro de recubrimiento. Tiene una apertura numérica de $NA = 0.39$, de índice escalonado, de la marca Thorlabs. (Ver Anexo 3)

Se escogió esta fibra primordialmente porque tiene una buena apertura numérica, esto facilita el acoplamiento del láser a la fibra, ya que, aumenta el ancho de las zonas de transmisión. Además, tiene una buena relación en tamaño con el elemento semiesférico utilizado.

5.3.4. Fotorreceptor

El receptor elegido fue un detector amplificado de silicio modelo PDA100A. Con rango de longitud de onda de $320-1100[nm]$, de marca Thorlabs. Suficiente para nuestra señal de entrada, ya que esta es de $650[nm]$. Con sensibilidades hasta potencias de femtovoltios. (Ver Anexo 4)

Este elemento es de gran importancia, ya que este es un mecanismo capaz de convertir la energía óptica de la luz que incide sobre una superficie sensora en energía eléctrica, por lo que nos ayuda a medir la señal de salida y observarla en el osciloscopio.



Fig. 41: Fotorreceptor PDA100A

5.3.5. Acopladores

Estos acopladores realmente son muy sencillos, son tubos milimétricos de metal, estos son para darle soporte y estabilidad a la fibra y sirven para que esta quede fija y no se mueva, ya que esta no es rígida. Es necesario desplazarla tanto para acoplarla en la fuente como en el elemento esférico y en el fotorreceptor, entonces esta adaptación de acopladores es muy útil.



Fig. 42: Acopladores

5.3.6. Desplazadores de 3 ejes

Estos ejes de desplazamiento son una herramienta que nos ayuda a cambiar la posición de la fibra nanométricamente. Esto es necesario en el experimento, ya que se necesita acoplar la fibra óptica a la fuente, al elemento esférico y al fotorreceptor. Nuestros elementos son pequeños, por lo que se requiere una gran precisión. El desplazador que se muestra en la Fig. 43. (a) es un desplazador de 1 eje, por lo que se tiene que hacer un arreglo de 3 de estos desplazadores para que quede de 3 ejes como se muestra en la Fig. 43. (b). Estos desplazadores son de la marca Thorlabs.

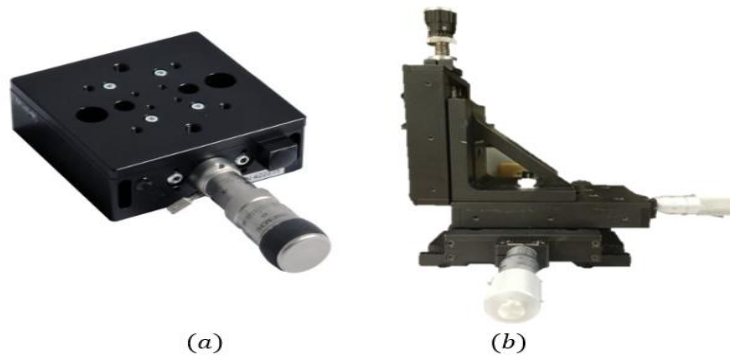


Fig. 43:(a) Desplazador de 1 eje (b) Desplazador de 3 ejes

5.3.7. Indicador de desplazamiento de precisión

Existe una gran variedad de indicadores de medición. El medidor que se eligió fue el mostrado en la Fig. 44. Cuando se desea mover la fibra se necesita tener una referencia, por lo que estos medidores son de gran ayuda. La peculiaridad de estos es que se ponen en la posición deseada (donde se requiera el cero de referencia) y a partir de ahí se empieza a medir. Teniendo ya la referencia establecida, una vuelta de 360° equivale a $1[mm]$ de desplazamiento.



Fig. 44: Indicador de desplazamiento

5.3.8. Osciloscopio

Finalmente se encuentra el osciloscopio. La elección de este osciloscopio no se hizo queriendo buscar alguna característica específica. Para el experimento basta con que tenga dos canales, uno para observar la señal de entrada y otro para observar la señal de salida, después de que la señal óptica haya pasado por el fotodetector, para así poder hacer una comparación. Solo se puede decir que este osciloscopio elegido fue de la marca Tektronik modelo MSO 2012.



Fig. 45: Osciloscopio Tektronik MSO 2012

5.4. Resultados teóricos

Antes de poder implementar y armar el sensor físicamente es importante obtener el comportamiento y rango de funcionamiento del sensor, por lo que se hicieron cálculos necesarios para poder obtener la mejor respuesta de este sensor.

5.4.1. Cocientes de reflexión en la interfaz de dos medios

Con el objetivo de estimar el rango de ángulos de incidencia del haz en la superficie del transductor, θ_i , con el que el sensor puede operar, se obtuvo y se graficó del cociente de reflexión de la luz no polarizada en la interfaz de dos medios basándose en la ecuación (3.9) (ver la Figura 46). Se utilizaron la ecuación (3.9) tanto para la interfaz de acrílico-aire, como para acrílico-agua. En resumen, lo que nos muestra la gráfica de la Fig. 46 son los valores del ángulo crítico a partir del cuales se presenta reflexión total interna:

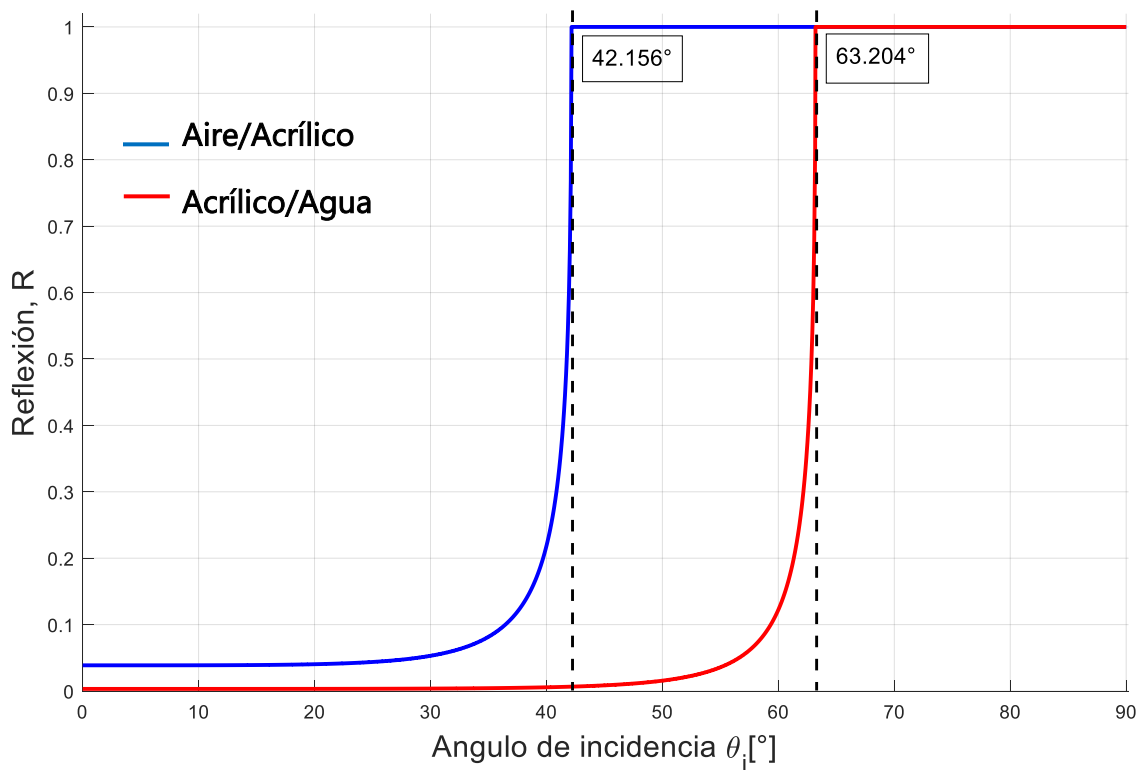


Fig. 46: Cocientes de reflexión, R , de interfaz aire-acrílico y acrílico-agua, respectivamente, contra el ángulo de incidencia del haz, θ , que se obtuvieron con base en las fórmulas de Fresnel.

En la Figura 46, la línea de color azul corresponde a la interfaz acrílico-aire, mientras que la línea roja corresponde a la interfaz acrílico-agua. La diferencia entre los respectivos ángulos críticos podemos llamarla $\Delta\theta$

Todos los valores angulares dentro de este rango, $\Delta\theta$, son valores válidos de θ_i para que el sensor presente transmisión hacia la fibra receptora gracias a la reflexión total interna, para el caso cuando el elemento se encuentra en contacto con el aire.

Entonces se tendría un margen de 22.029° para dirigir el haz de incidencia y encontrar la mayor transmisión de la fibra transmisora a la fibra receptora por medio de la reflexión total interna del haz en la superficie de trabajo del transductor.

5.4.2. Cálculos de parámetros adimensionales para la implementación del modelo matemático del sensor con el software SRFO

El capítulo anterior se mencionó que el software SFRO es un software con una interfaz gráfica muy fácil de utilizar, solo basta con introducir las características tanto de la fibra transmisora como las de la fibra receptora (apertura, perfil, diámetro), índice de refracción del material del elemento de detección, el número de rayos incidentes y un barrido del índice de refracción.

Este software utiliza medidas adimensionales, por lo que es necesario hacer algunos cálculos para introducir el diámetro adimensional del núcleo de la fibra, ϕ . Para saber esta medida adimensional se utiliza la siguiente formula ⁽¹⁾:

$$\phi = \frac{d}{R}, \quad (5.1)$$

donde d es el diámetro del núcleo de la fibra óptica a utilizar y R es el radio del transductor (sensor). Entonces sustituyendo los valores, se tiene:

$$\phi = \frac{0.4 [mm]}{8 [mm]} = 0.05.$$

Se eligió a probar la distancia adimensional de $\Lambda=0.866$ ya que esta corresponde a una de las “ventanas” en donde se presenta mayor transmisión entre las dos fibras del sensor. Los datos utilizados para hacer las simulaciones fueron los siguientes:

Tabla. 2. Parámetros utilizados en las simulaciones del sensor con el software SRFO.

Parámetro	Dato
Apertura numérica de la fibra óptica, NA	0.39
Diámetro adimensional del núcleo de la fibra óptica, ϕ	0.05
Distancia adimensional entre la fibra óptica y el eje central del sensor, Λ	0.86
Índice de refracción del sensor, n_s	1.49
Índice de refracción inicial del medio externo, n_i	1
índice de refracción final del medio externo, n_f	1.6
Incrementos (pasos) en el índice de refracción del medio externo, Δ_n	0.005

5.4.3. Simulación en software SRFO

Ya estando dentro del software, primero se introduce el polinomio que describe a la superficie de trabajo del transductor: la superficie refractométrica. En este caso se trata de una semiesfera, se tiene:

$$x^2 + y^2 + z^2 - 1 = 0. \tag{5.2}$$

Entonces, se introducen los cocientes en la sección correspondiente, como lo muestra la Fig. 47:

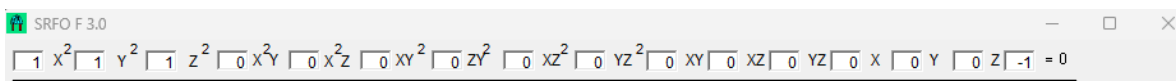


Fig. 47: Polinomio característico

Por consiguiente, se introducen los parámetros de los componentes ya calculados e ideados en la sección anterior (Fig. 48 y Fig.49):

The image shows two side-by-side panels for fiber parameters. The left panel is titled 'Fibra Emisora' and contains the following fields: Apertura (0.39), Perfil (Escalonado), Compos. (Dirigidos/Tu), Diametro (0.05), X (-0.86), Z (0), Y (0), and a sub-panel for 'Distribución Angular' with radio buttons for 'Cos Fi' (selected) and 'Tabla', and a 'Potencia' field set to 1. The right panel is titled 'Fibra Receptora' and contains: Apertura (0.39), Perfil (Escalonado), Compos. (Dirigidos), Diametro (0.05), X (0.86), Z (0), and Y (0).

Fig. 48: Parámetros necesarios para la simulación, parte 1.

The image shows a 'General' settings panel with the following fields: N Sensor (1.49), # de Rayos (100000), N Inicial (1), # Max de Refl. (5), N Final (1.6), Graficar (checked), Intervalo (0.005), 2D (unchecked), and Mostrar Grafica (unchecked).

Fig. 49: Parámetros necesarios para la simulación, parte 2.

Teniendo ya los parámetros establecidos, se procede a procesar la simulación (Fig. 50) y esperar a que esta termine para poder analizar el archivo .psr de los valores de la Transmisión del sensor, T . Hay que mencionar que el número de rayos utilizados en el modelado del haz de entrada tiene un efecto significativo sobre el valor de la transmisión T , a mayor número de rayos son más precisos los valores de la transmisión T , para este caso se hizo las simulaciones con el número de rayos 100,000.

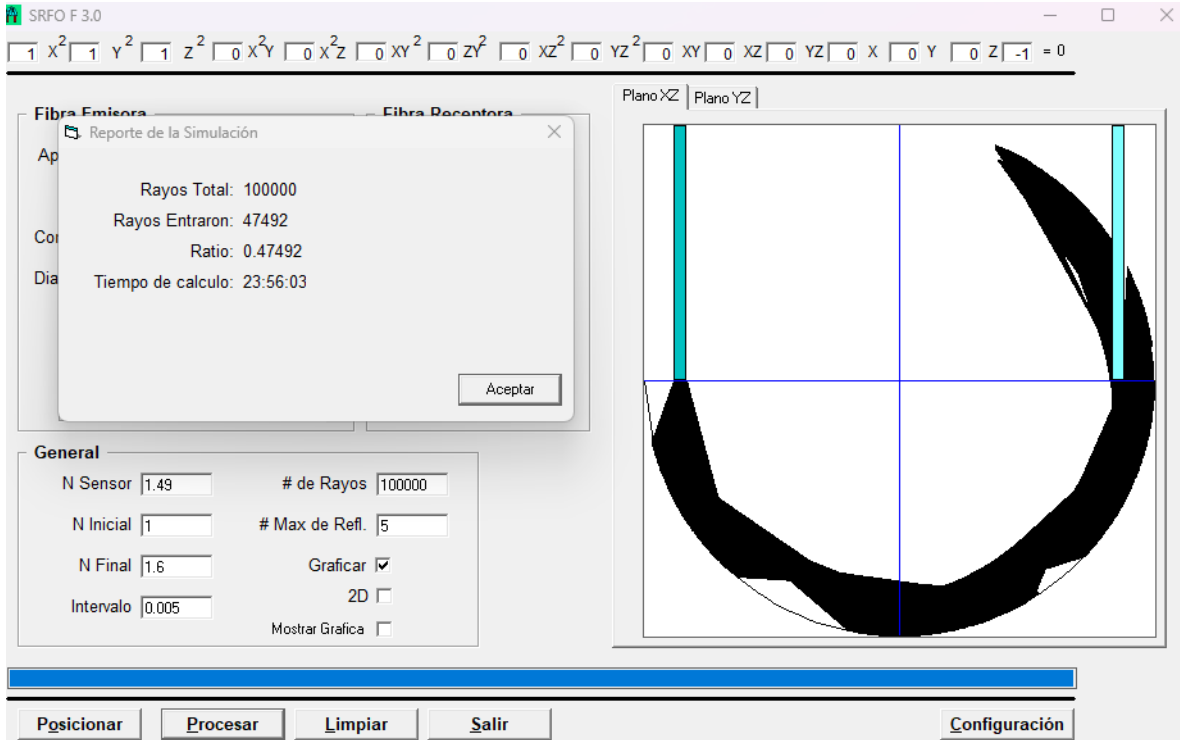


Fig. 50: Interfaz de usuario de SRFO con los resultados de la simulación de propagación de la luz en el sensor con los parámetros establecidos en la Tabla 2.

El archivo .psr arroja la transmisión absoluta T , pero hay que normalizar esta transmisión, y así convertirla en transmisión relativa T^* , ya que esta permite excluir la pérdida óptica intrínseca que no refleja el rendimiento refractométrico del transductor. Entonces lo que se hace es normalizar cada dato arrojado con la ecuación (5.3), es decir:

$$T^*(n) = \frac{T(n)}{T_{aire}}. \quad (5.3)$$

Haciendo este procedimiento, se obtuvo la gráfica que se presenta en la Fig. 51.

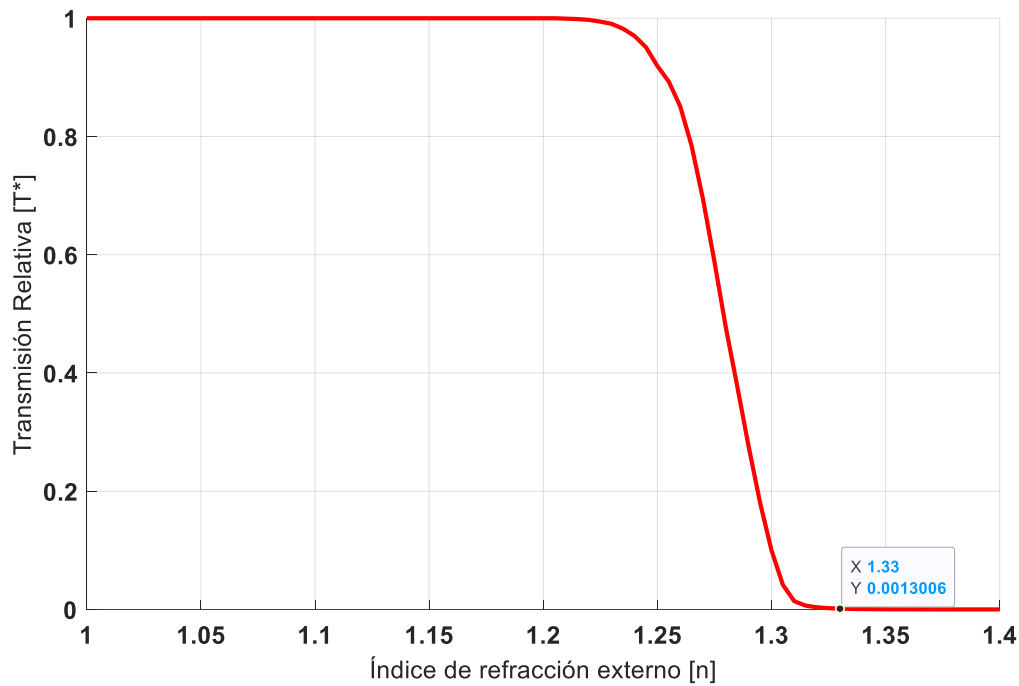


Fig. 51: Transmisión relativa teórica T^* vs n externo del sensor con los parámetros de la tabla. 2, obtenida con el software SRFO.

La grafica que se observa en la Fig. 51, demuestra el comportamiento refractométrico del sensor. Se puede observar que la transmisión relativa T^* se convierte prácticamente en 0 cuando el índice de refracción $n=1.33$ (agua). Entonces, desde esta simulación, con los parámetros y características establecidos de los elementos elegidos para el desarrollo del sensor, teóricamente se tendría una respuesta escalonada mostrada en la Figura 51. Cuando el sensor se encuentra en el aire ($n=1$) la transmisión relativa T^* es alta y cuando el sensor este sometido al agua la transmisión relativa T^* tiende a 0, es decir, la señal de salida desvanece drásticamente.

5.5. Descripción de la instalación experimental y metodología del experimento

A continuación, se describirá paso a paso como se hizo la instalación experimental para el estudio del funcionamiento del sensor y la metodología de trabajo.

5.5.1. Instalación

1. **Elemento transductor óptico semiesférico instalado en su soporte:** Se diseñó una base para colocar el transductor óptico en el soporte. Esta base se diseñó para que el elemento transductor se pudiera sostener en el aire y sumergir totalmente en el agua, además también tuviera facilidad de movimiento. Por lo que la base con el elemento quedó como lo muestra la Fig.52.

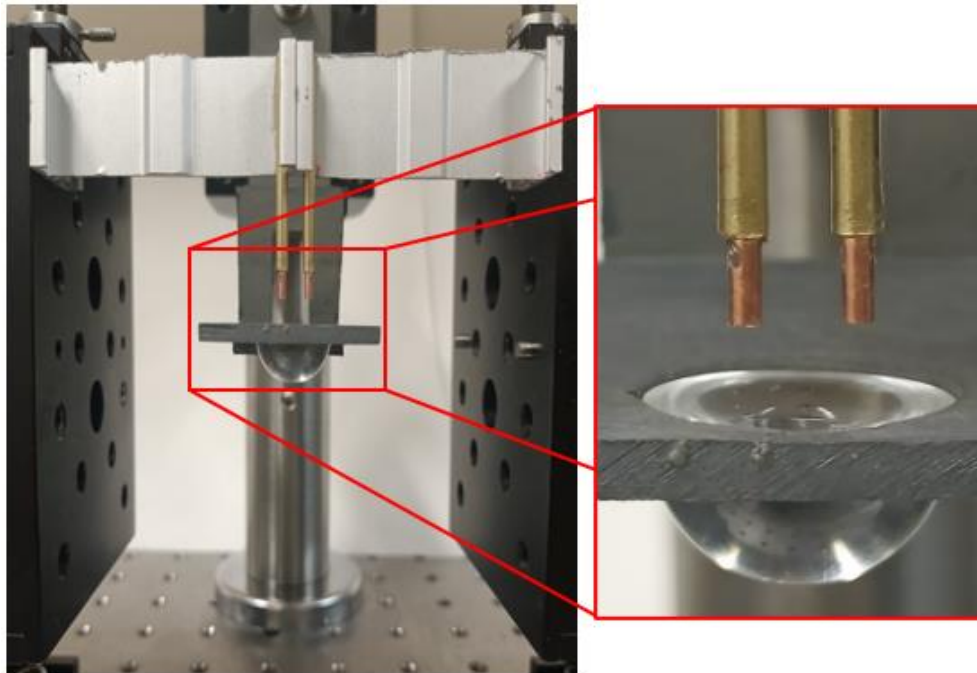


Fig. 52: Elemento transductor óptico semiesférico colocado sobre una base.

2. **Conexión y configuración de la señal de entrada al diodo laser:** Lo primero que se hizo fue conectar y soldar el circuito NE555 al diodo laser, ya que este generaba la señal modulada para alimentar al laser. La señal que se configuró fue de 1[kHz], suficiente para que la señal de salida fuera continua.

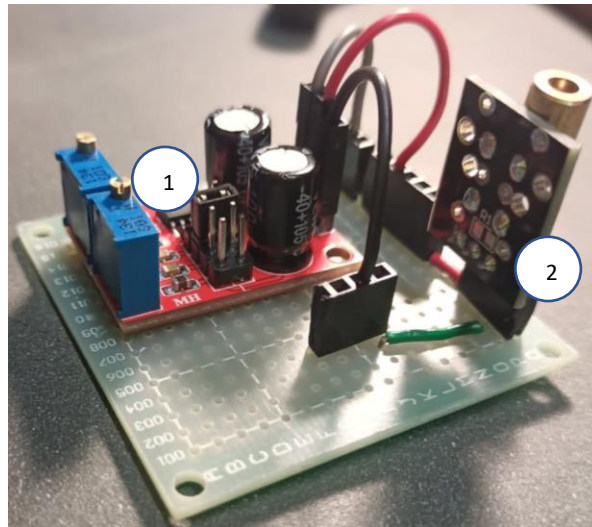


Fig. 53: Circuito completo, donde 1. Modulo NE555 y 2. Diodo laser.

A su vez, para alimentar al módulo NE555 se utilizó un eliminador.

- 3. Módulo de la fuente de luz:** Una vez armado el circuito, este se colocó en una placa, junto con el desplazador de 3 ejes (ya adaptado con el acoplador para la fibra óptica). Se colocaron en la misma placa para darle estabilidad, y así a la hora de acoplar fuera más sencillo.

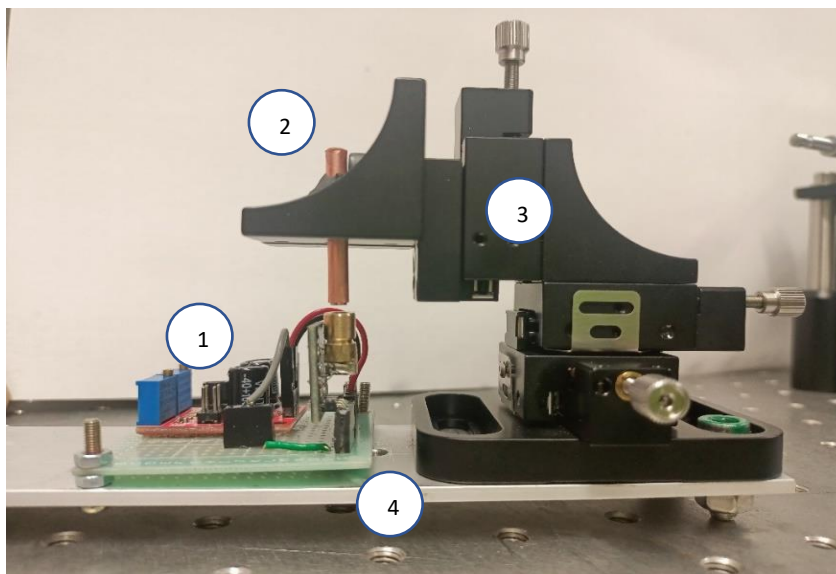


Fig. 54: El módulo de la fuente de luz: 1. Fuente, 2. Acoplador de la fibra óptica transmisora, 3. Desplazador de 3 ejes para la fibra, 4. Base metálica.

- 4. Instalación de los desplazadores de 3 ejes con los indicadores de desplazamiento de precisión:** Se procedió a instalar en la mesa del laboratorio dos desplazadores de 3 ejes, uno para cada fibra. Como se necesitaba un soporte para sostener la fibra, a cada desplazador se les adaptó un soporte, con el fin de tener estabilidad y un área mayor para el movimiento de fibra óptica. Y a estos soportes a su vez se les colocó un adaptador de tubo milimétrico, donde la fibra entrara sin problema, pero estuviera fija.

Después de haber instalado los desplazadores, a estos se les incluyó los indicadores de desplazamiento de alta precisión.

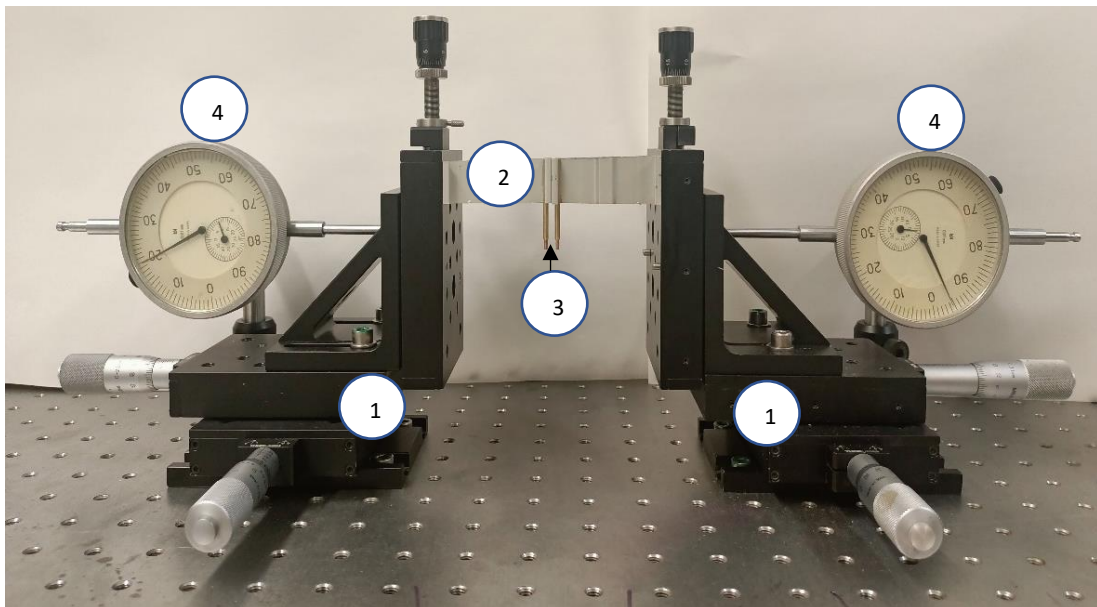


Fig. 55: Instalación de los desplazadores: 1. Desplazador de 3 ejes, 2. Soporte para fibra, 3. Acopladores para introducir la fibra, 4. Indicadores de desplazamiento de precisión.

- 5. Colación de fuente y soporte para el elemento de detección semiesférico en una base común:** Una vez que se instalaron los elementos anteriores, se colocó el soporte para sostener el elemento esférico, a una altura adecuada. Además, se posicionó la fuente en un lugar donde no interfiriera con el movimiento del desplazador derecho, como lo muestra la Fig. 56.

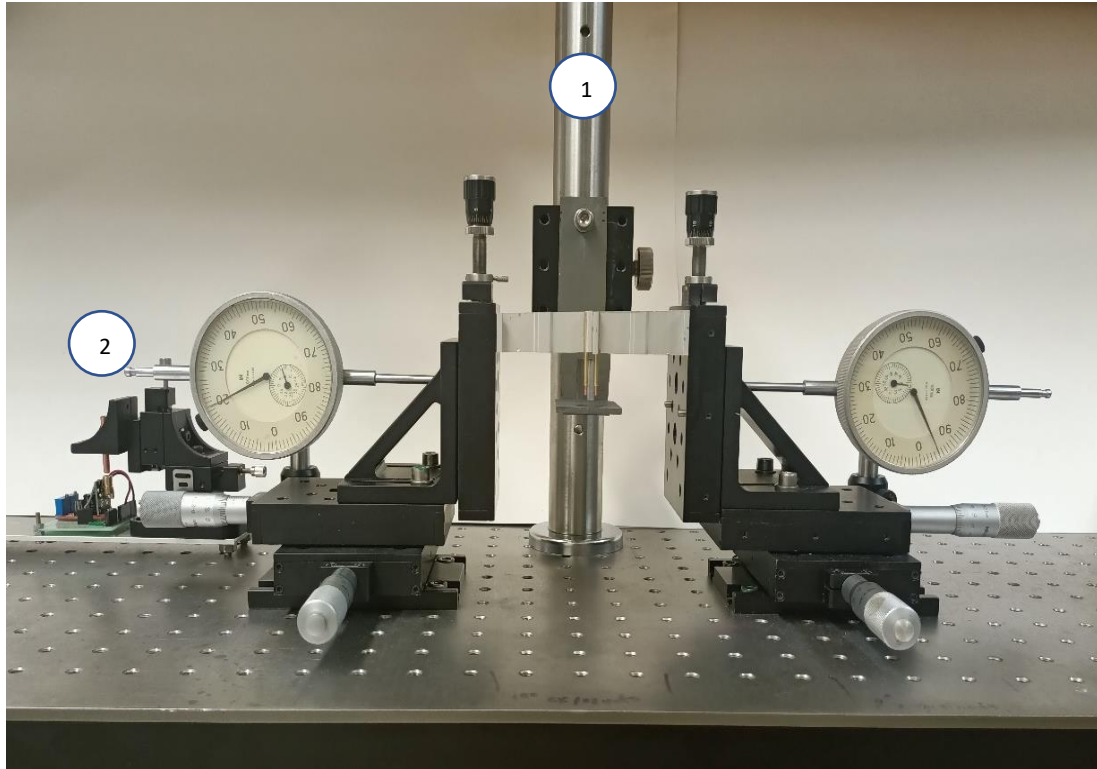


Fig. 56: Instalación con los elementos 1. Soporte para el elemento semiesférico y 2. Fuente.

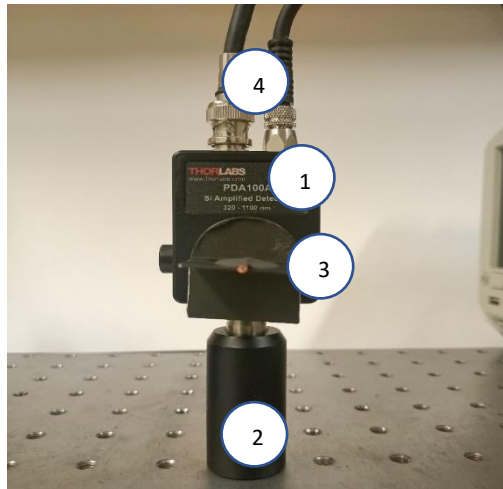


Fig. 57: Instalación del receptor: 1. Fotorreceptor, 2. Base para colocarlo en la mesa, 3. Acoplador para la entrada de fibra óptica receptora, 4. Cables de conexión para el osciloscopio y alimentarlo.

6. Instalación del fotorreceptor:

Posteriormente, en la mesa del laboratorio se colocó una base para poder posicionar el fotorreceptor, para que este estuviera fijo.

A este fotorreceptor también se le adaptó una base y un acoplador para que la fibra emisora no se moviera y la señal medida fuera lo más estable posible.

- 7. Conexión de fotorreceptor con osciloscopio:** Para finalizar la instalación de los componentes del sensor, se conectó el fotorreceptor al osciloscopio en el canal 2, para poder ver la señal del sensor en operación. En el canal 1 del osciloscopio se colocó la señal de salida del módulo NE555, esto se hizo con el fin de hacer una comparación.

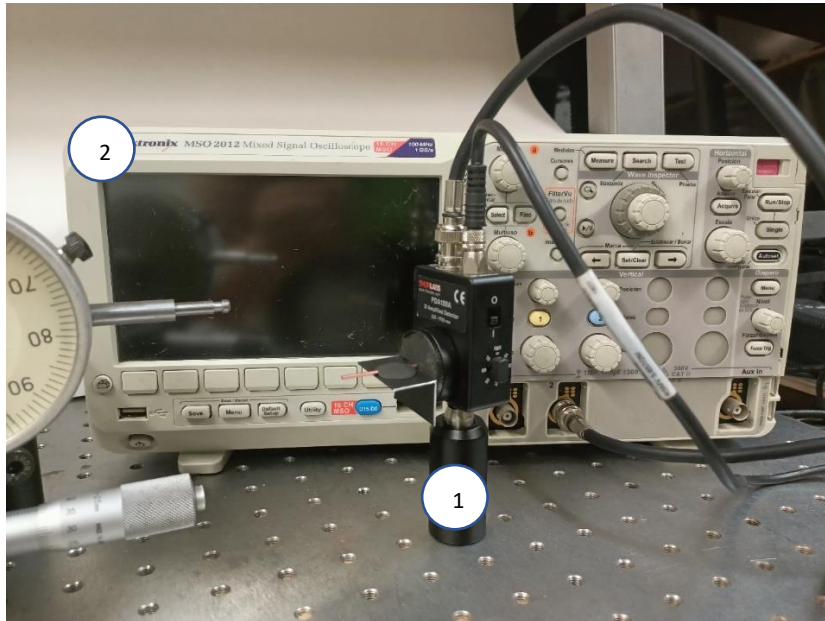


Fig. 58: Conexión de los elementos 1. Fotorreceptor y 2. Osciloscopio.

5.5.2 Configuración y acoplamiento

Una vez que se tuvo la instalación completa, era acoplar las fibras y configurar el sensor para que estuviera en operación. Para ello, lo primero que se hizo fue preparar la fibra elegida, en este caso en particular, la fibra marca ThorLabs modelo FT400EMT, de diámetro de núcleo y revestimiento de sílice de 400 μm y 425 μm , respectivamente, y de revestimiento de un diámetro de 730 μm de teflón.

Preparar la fibra significa cortar 2 segmentos, uno para la fibra transmisora y otra con la fibra receptora. Después de tener los dos segmentos, con herramienta especial de tipo tijeras se le retiró unos centímetros de recubrimiento, para que el hilo de sílice quedara libre. Con herramienta especial de tipo cuchillo se cortó y luego con papel lija fina se pulió el extremo de estas para una correcta transmisión y recepción de la señal.

Es importante tener un buen corte, para corroborarlo se hizo incidir luz en las fibras y se verificó el patrón de salida de cada extremo de cada fibra, cuando este patrón es regular y simétrico, es una indicación de que se tiene un buen corte.

Ya pulidas y preparadas las fibras, se procedió a colocarlas en sus respectivas posiciones sobre la parte plana del transductor óptico. Un extremo de la fibra transmisora se colocó en el acoplador de la fuente y el otro extremo en el primer soporte del desplazador derecho. Y para la fibra receptora, un extremo se colocó en el soporte del desplazador izquierdo y el otro extremo al fotorreceptor.

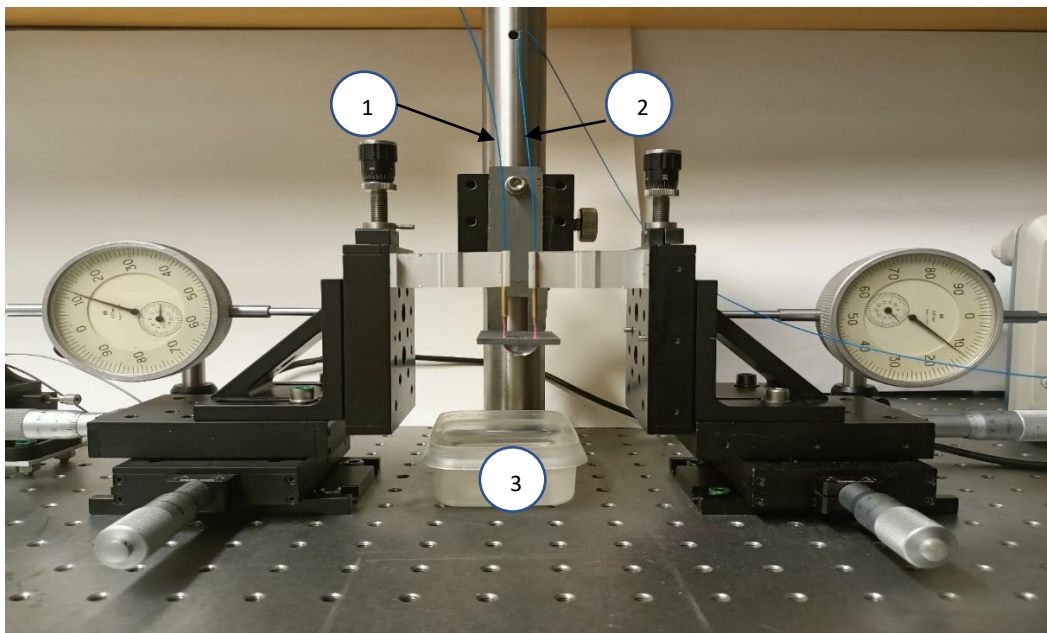


Fig. 59: Colocación de la fibra de: 1. Fibra receptora y 2. Fibra receptora. Además 3. Muestra de agua.

Después de colocar las fibras, se procedió a acoplar las fibras para tener una mayor transmisión de la luz por ellas. Primero se empezó con el diodo laser y la fibra trasmisora. Con el desplazador pequeño, se movió la fibra para que quedara en donde hay una mayor concentración de emisión del láser.

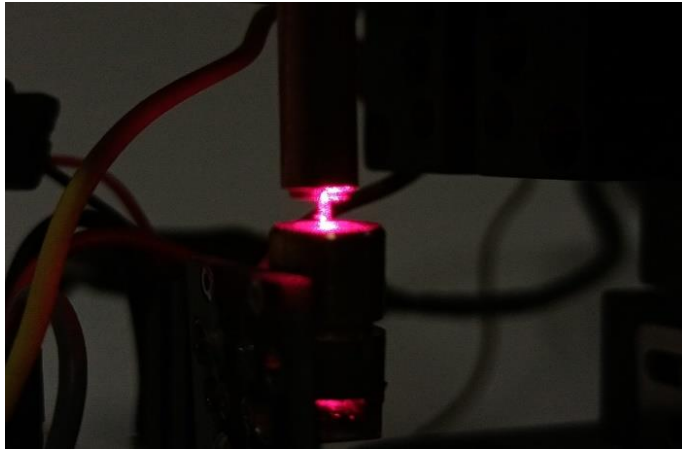


Fig. 60: Laser acoplada con la fibra receptora.

Para acoplar las fibras con el elemento semiesférico, es diferente el procedimiento. Como en el resultados teóricos encontramos que para este sensor una buena ventana de transmisión corresponde a una distancia adimensional de $\Lambda = 0.86$, con la ecuación (5.3)⁽¹⁾ podemos obtener la distancia del centro del elemento a la fibra, para tener esta ventana.

$$\Lambda = \frac{L}{R}. \quad (5.3)$$

Despejando se tiene:

$$L = \Lambda R = 0.86 \times 8[mm] = 6.88[mm].$$

Es difícil encontrar el centro del elemento transductor óptico, por lo que es más sencillo colocar las fibras en los extremos del elemento transductor óptico semiesférico y de ahí comenzar a mover las fibras con los desplazadores, entonces se tendría:

$$L = 8[mm] - 6.88[mm] = 1.12 [mm].$$

Entonces con los desplazadores se movieron las fibras hasta que los indicadores midieran $1.12 [mm]$.

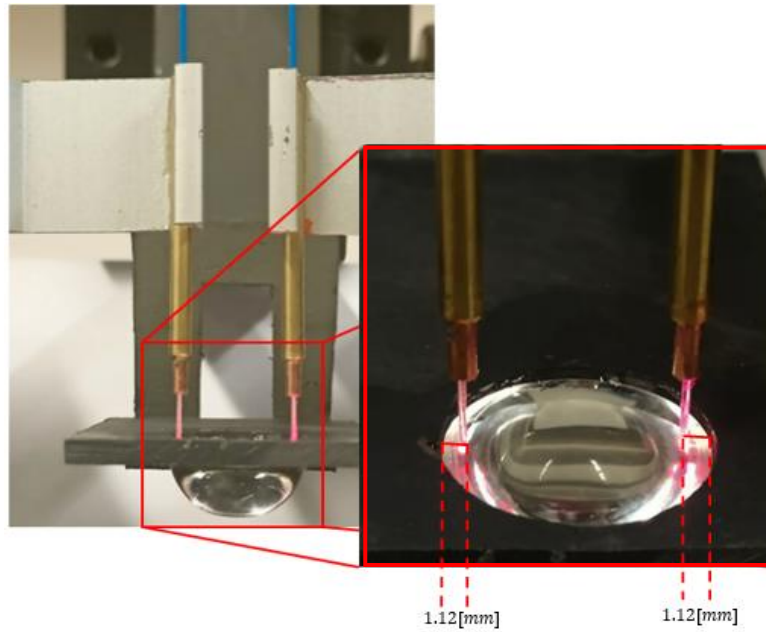


Fig. 61: Elemento semiesférico acoplado con las fibras ópticas.

5.5.3 Instalación final

Cuando se acoplaron las fibras y los demás elementos, se vio en el osciloscopio que justamente a esa distancia, se tenía la máxima transmisión. Entonces la instalación final quedó como lo muestra la Fig.62.

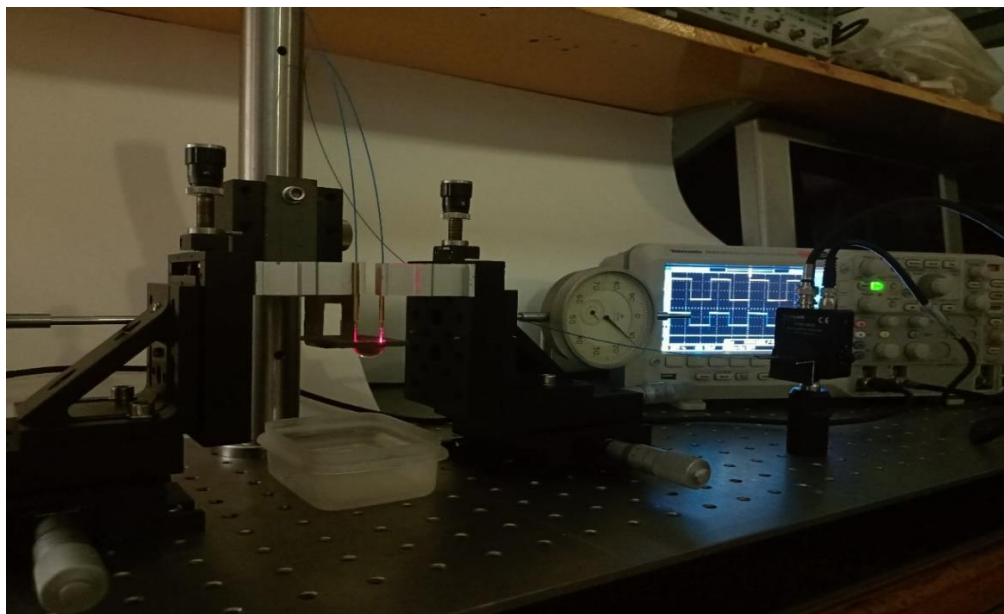


Fig. 62: Instalación experimental en forma final.

5.6 Resultados del experimento

Teniendo ya todo acoplado y en funcionamiento, se procedió a hacer las pruebas pertinentes.

Primero se tuvo el sensor en el aire, para este caso el osciloscopio mostraba 2 señales (Fig. 63): La primera (color amarillo) proveniente de la fuente con un voltaje $6.16 [V_{PP}]$, con una frecuencia de $1.013 [kHz]$ aproximadamente y la segunda la señal (color azul) de aproximadamente $500 [mV_{PP}]$, proveniente del fotorreceptor. El receptor se configuró con una ganancia de $20 [dB]$, con esta ganancia se asegura un nivel de entrada adecuado para realizar mediciones y para que el osciloscopio la detectara y se lograra ver un cambio a la hora de someter el sensor al agua.

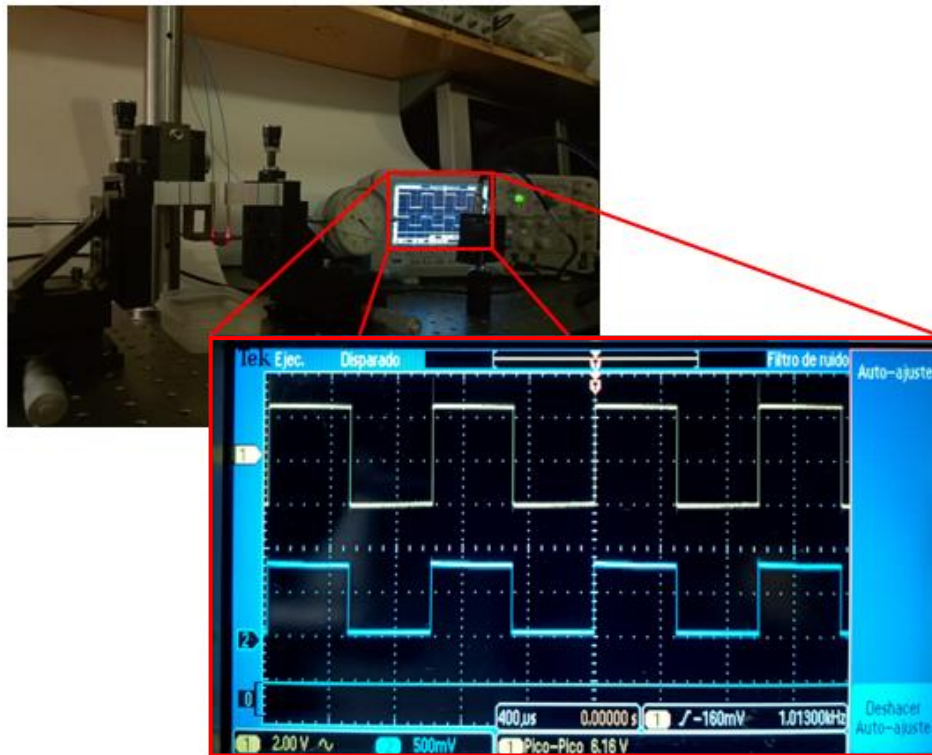


Fig. 63: Señal de entrada y salida con el sensor en el aire.

Después se procedió a someter el sensor al agua para ver la reacción que este tenía, como la muestra la Fig.64.

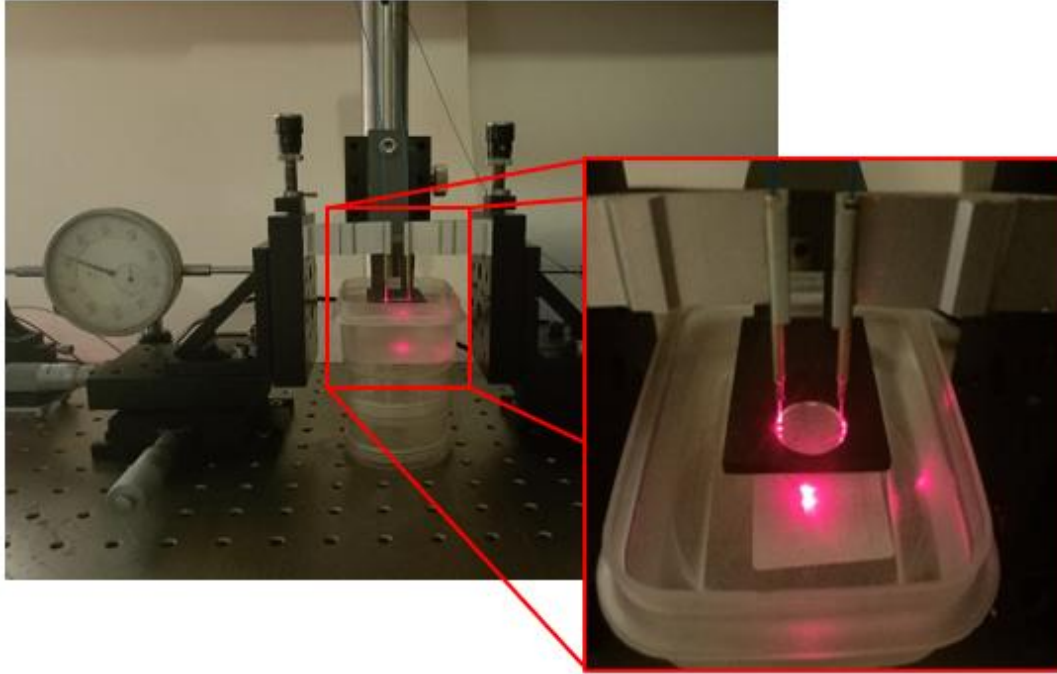


Fig. 64: Sensor sometido al agua.

En la Fig. 64 cuando el sensor fue sometido al agua, se pudo observar que el haz en lugar de hacer reflexión total interna dentro del elemento esférico salió de este. Cuando el sensor está en el aire, el índice de refracción externo es mucho menor que el del elemento transductor por lo que habrá reflexión interna total y existirá acoplamiento entre las fibras, esto provocará que gran parte de la potencia luminosa de la fibra óptica transmisora entre a la fibra óptica receptora, por lo que existe la presencia de señal de salida. Pero cuando el elemento de detección se encuentra sumergido en algún líquido (en este caso agua), el índice de refracción del medio externo se vuelve comparable con el del elemento transductor, por lo que la potencia óptica a la entrada de la fibra receptora disminuirá o desaparecerá por completo, en este caso se hizo lo suficientemente pequeña para que se viera una diferencia.

La señal de salida del osciloscopio fue la siguiente:

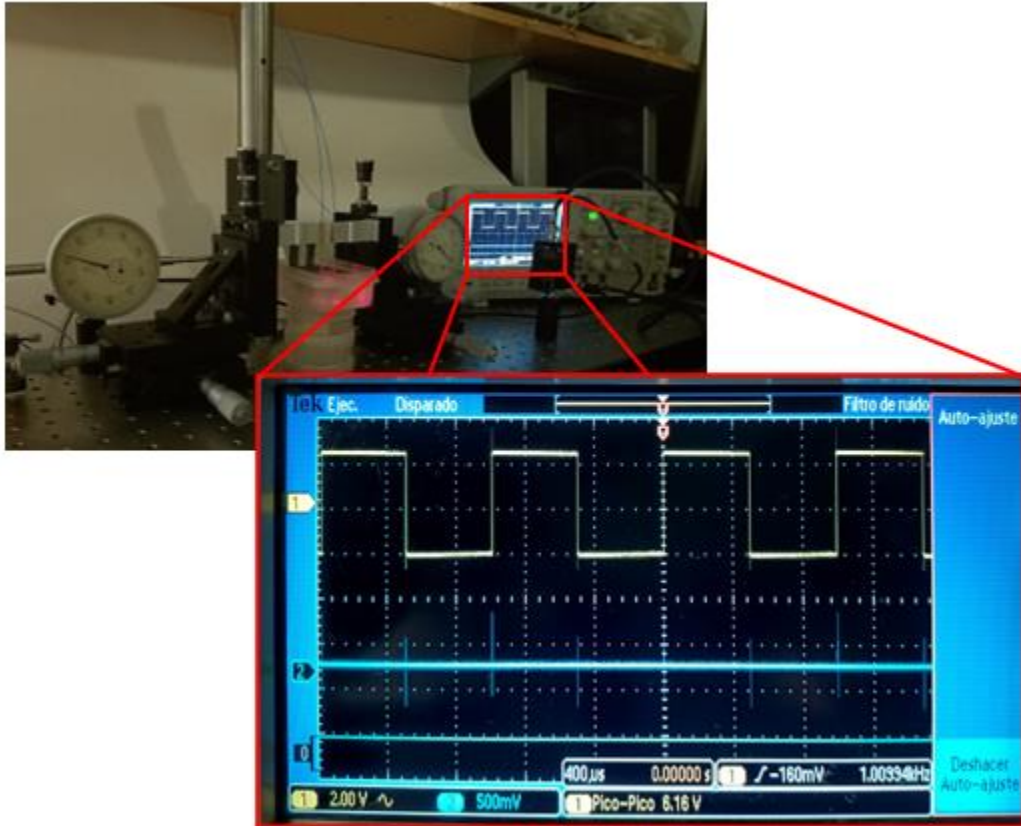


Fig. 65: Señal de entrada y salida cuando el sensor es sometido al agua.

5.7 Conclusiones del Capítulo 5

Con los resultados arrojados en el experimento, se puede concluir que el diseño e implementación experimental del sensor óptico refractométrico detector de agua, funcionó de manera correcta. Ya que, cuando este se encontraba en el aire existía una máxima transmisión y esta desapareció cuando fue sometido al agua. Justamente este fue uno de los objetivos a los que se quería llegar.

El correcto funcionamiento del sensor indica que se hizo un buen análisis al elegir los componentes que conforman este sensor, es decir, desde la fibra óptica, la forma del elemento transductor, la fuente e incluso la instalación para montarlo. También se puede concluir que el diseño previo del sensor facilitó la implementación y acoplamiento de este, dicho acoplamiento fue correcto ya que la señal de salida presentaba el voltaje necesario.

También fue de gran ayuda el software SRFO, ya que sin este no podríamos predecir si el sensor tuviese la respuesta idónea, entonces este software es muy útil antes de implementar algún sensor de este tipo, ya que, de no haber funcionado, desde este punto se podrían cambiar las características y buscar las ideales para el buen resultado.

La respuesta de este sensor se simplifica el algo tan sencillo como 0's y 1's, pues cuando está en el aire sería un 1 (transmisión de señal) y cuando estuviera en el agua sería un 0 (no transmisión de señal).

Referencias del Capítulo 5

- (1) García, C. García, S. Khotiaintsev, S. Morales, J. Yam, L. (2012). *Optical Intensity Type Refractometer for Remote Measurements Via Fiber-Optic Cables*. Journal of Lightwave Technology. IEEE. Vol. 30, No. 8.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES

Los sensores ópticos refractométricos son un área de estudio muy amplia debido a las aplicaciones que estos ofrecen en campos muy diversos, desde la monitorización de procesos químicos, hasta la medición de la calidad de agua potable. Por lo tanto, el diseño, caracterización e implementación de estos, presenta una tarea muy importante.

Este tipo de sensores ofrecen ventajas sobre otros, por ejemplo: la insensibilidad al ruido eléctrico y magnético (debido al acoplamiento óptico); operación segura en ambientes drásticos; su alta sensibilidad; también en el tamaño y poco peso presentan ventajas ya que, esto es muy útil en lugares de difícil acceso.

Por ello, en el presente trabajo se buscó hacer un estudio especializado enfocado a la obtención de datos teóricos y experimentales sobre este tipo de sensores basados en fibra óptica. Se comenzó describiendo el funcionamiento de la fibra óptica y se llegó hasta la descripción de operación de este tipo de sensores, para así tener una buena base de su diseño.

El objetivo específico de este trabajo se centró en el modelado numérico y análisis asistido por computadora, diseño e implementación práctica del sensor óptico refractométrico con transductor externo basado en fibra óptica. Esto debido a que este sensor presenta un gran interés práctico, por ser relativamente fácil de implementar y su costo es económico en comparación con otros sensores de su misma gama.

Además de un análisis teórico del funcionamiento de estos sensores, se hizo un modelado numérico de las características de funcionamiento de este sensor. Este modelado es una técnica muy valiosa para diseñar y optimizar sensores, así como para predecir su respuesta ante diferentes condiciones; la utilización de herramientas matemáticas y de simulación permite estudiar de manera precisa y eficiente el comportamiento de los sensores y su relación con las propiedades ópticas de los materiales utilizados. Sin este modelado no se podría hacer un análisis de los elementos que podrían ayudar al diseño de los sensores.

Dicho modelado, nos arroja datos como la trayectoria de los rayos, las características de operación y rendimiento del sensor. Asimismo, esta técnica fue útil, porque, se pudo notar que con la variación de los diferentes parámetros se puede mejorar la respuesta del sensor, estos parámetros pueden ser: la apertura numérica de la fibra, el diámetro de la fibra, así como la distancia entre ellas. Entonces para tener la mejor respuesta dependiendo lo que se quiera diseñar, se variarán dichos parámetros.

La elección de algunos materiales del sensor se basó en el modelado y simulación que se hicieron previamente. Para este sensor se obtuvo que el rango de operación es amplio,

pues con la gráfica de coeficientes de reflexión, se observó que tiene un margen de 22.029° para poder mover las fibras, en este margen todos los valores angulares son válidos para que el sensor presente transmisión hacia la fibra.

El experimento reveló que los materiales elegidos fueron correctos, ya que la respuesta fue la deseada, es decir, cuando el sensor estaba en operación en el aire, existía señal de salida, debido a que el haz de luz permanecía dentro del elemento semiesférico y llegaba a la fibra receptora; por lo contrario, cuando se sumergió en agua, la señal de salida desapareció, debido a que el haz de luz se difractaba y a la fibra receptora no le llegaba nada.

En resumen, se puede concluir que, gracias a todas las herramientas anteriormente descritas, se llegó a las metas propuestas al inicio de este trabajo.

Finalmente, se puede decir que a medida que la tecnología avanza y las aplicaciones de los sensores ópticos refractométricos se expanden, el futuro de estos dispositivos parece prometedor, debido a la gran necesidad de incluir este tipo de sensores en tecnologías y sistemas mucho más complejos.

ANEXO 1. HOJA DE DATOS DIODO LASER

OKY3301: Módulo transmisor láser de 650nm a 5 V, para Arduino.



Descripción: El módulo del transmisor láser KY-008, consta de un cabezal de diodo láser rojo que proporciona un haz intensivo pequeño de 650nm. Manipule con precaución y no mire directamente a la cabeza del láser.

Especificaciones:

Voltaje de alimentación:	5 V
Material:	PCB + Latón
Longitud de onda:	650 nm
Dimensiones:	15 x 24 mm
Profundidad:	8 mm
Peso:	3 g
Color:	Negro



Módulo láser. Un láser es un dispositivo que emite luz a través de un proceso de amplificación óptica basado en la emisión estimulada de radiación electromagnética. Los láser difieren de otras fuentes de luz porque emiten luz de forma coherente.

La coherencia espacial permite que un láser se enfoque en un punto apretado, lo que permite que aplicaciones como el corte con láser y la litografía, y un rayo láser se mantenga estrecho a largas distancias (colimación), lo que permite aplicaciones como el puntero láser. Los láseres también pueden tener una coherencia temporal alta que les permite tener un espectro muy estrecho, es decir, solo emiten luz de un solo color. Y su coherencia temporal puede usarse para producir pulsos de luz, tan cortos como un femtosegundo.

Conexión:

Solo necesita suministrar tierra y alimentación a este dispositivo como se muestra en la imagen a continuación:

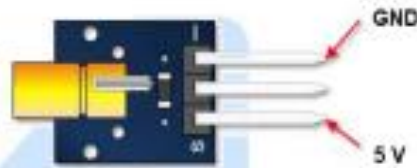


Diagrama de conexión a Arduino



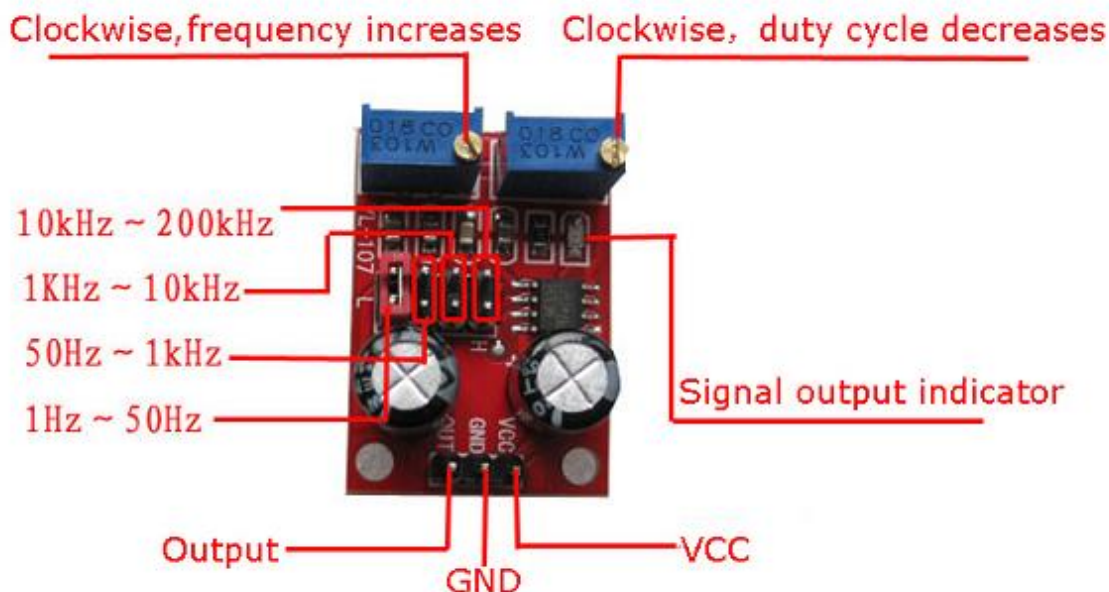
Código de ejemplo

```
int laser=9;
void setup() {
  pinMode(laser, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(laser, HIGH);
  delay(3000);
  digitalWrite(laser, LOW);
  delay(1000);
}
```

	AG Electrónica S.A. de C.V. República del Salvador N° 20 Segundo Piso Teléfono: 5130 - 7210		
	ACOTACIÓN: N/A	http://www.aguelectronica.com/	ESCALA: N/A
TOLERANCIA: N/A	Módulo transmisor láser de 650nm a 5V, para Arduino		
TOLERANCIA: N/A	Fecha: 28/08/2018	No. Parte:OKY3301	

ANEXO 2. HOJA DE DATOS DEL MODULO NE555



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Tamaño: 3.1 cm * 2.2 cm
- El chip principal: NE555
- Voltaje de entrada: 5V-15VDC. Cuando la corriente de salida 5 V fuente de alimentación 15mA; 12 V fuente de alimentación, la corriente de salida a 35MA alrededor.
- Corriente de entrada: 100mA
- Amplitud de salida: 4.2 V V-PP a 11.4 V V-PP. (de acuerdo a la diferente tensión de entrada, la salida será diferente)
- Corriente de salida máxima: 15mA (5 V fuente de alimentación, cuando V-PP es mayor que 50%), 35MA ≥ (12 V fuente de alimentación, cuando V-PP es mayor que 50%)
- Salida con indicador LED, no hay salida directa (bajo nivel LED, LED de alta y baja frecuencia de destellos del LED);
- Rango de frecuencia de salida Nivel es opcional, por lo que la frecuencia de salida se puede ajustar de forma continua;
- Frecuencia: 1Hz ~ 50Hz
- MF: 50Hz ~ 1 kHz
- HF: 1 kHz ~ 10 kHz
- HF: 10 kHz ~ 200 KHz
- Peso: 7 g

INFORMACIÓN ADICIONAL

Uso del Generador de ondas NE555

- Utilizar como un generador de señal de onda cuadrada, generar señales cuadradas utilizadas para el desarrollo experimental.
- Utilizado para conducir motores paso a paso una señal de onda cuadrada.
- Ajustable pulso generado para su uso por el MCU.
- Control de pulso ajustable.

ANEXO 3. HOJA DE DATOS FIBRA ÓPTICA

THORLABS**0.39 NA TECS™ Hard-Clad,
Step-Index, Multimode Fiber****Description**

Thorlabs' 0.39NA TECS™ hard-clad, multimode, step-index fibers feature increased fiber strength and reduced static fatigue in humid environments. The high core-clad bonding prevents pistoning and provides more stable crimp-and-cleave or epoxy terminations.

Specifications

0.39 NA TECS™ Hard Cladding, Step-Index, Multimode Fiber	
Core / Cladding	Pure Silica / TECS™ Hard Cladding
Coating	Tefzel
Operating Temperature (Tefzel Coating)	-65 to 135 °C
Numerical Aperture (NA)	0.39



Visible to Near-IR Transmission (Low OH)


Item #	Core Diameter	Clad Diameter	Coating Diameter	Max Power Capability		Max Attenuation @ 808 nm	Bend Radius Short Term/ Long Term
				Pulsed	CW		
FT200EMT	200 ± 5 μm	225 ± 5 μm	500 ± 30 μm	1.0 MW	0.2 kW	10 dB/km	21 mm / 42 mm
FT300EMT	300 ± 6 μm	325 ± 10 μm	650 ± 30 μm	2.3 MW	0.5 kW	10 dB/km	32 mm / 64 mm
FT400EMT	400 ± 8 μm	425 ± 10 μm	730 ± 30 μm	4.0 MW	0.8 kW	10 dB/km	43 mm / 86 mm
FT600EMT	600 ± 10 μm	630 ± 10 μm	1040 ± 30 μm	9.0 MW	1.8 kW	10 dB/km	48 mm / 96 mm
FT800EMT	800 ± 10 μm	830 ± 10 μm	1040 ± 30 μm	16 MW	3.2 kW	10 dB/km	55 mm / 110 mm
FT1000EMT	1000 ± 15 μm	1035 ± 15 μm	1400 ± 50 μm	25.1 MW	5.0 kW	10 dB/km	69 mm / 138 mm
FT1500EMT	1500 ± 30 μm	1550 ± 31 μm	2000 ± 100 μm	56.6 MW	11.3 kW	18 dB/km	79 mm / 158 mm

UV to Visible Transmission (High OH)

Item #	Core Diameter	Clad Diameter	Coating Diameter	Max Power Capability		Max Attenuation @ 808 nm	Bend Radius Short Term/ Long Term
				Pulsed	CW		
FT200UMT	200 ± 5 μm	225 ± 5 μm	500 ± 30 μm	1.0 MW	0.2 kW	14 dB/km	21 mm / 42 mm
FT300UMT	300 ± 6 μm	325 ± 10 μm	650 ± 30 μm	2.3 MW	0.5 kW	14 dB/km	32 mm / 64 mm
FT400UMT	400 ± 8 μm	425 ± 10 μm	730 ± 30 μm	4.0 MW	0.8 kW	14 dB/km	43 mm / 86 mm
FT600UMT	600 ± 10 μm	630 ± 10 μm	1040 ± 30 μm	9.0 MW	1.8 kW	12 dB/km	48 mm / 96 mm
FT800UMT	800 ± 10 μm	830 ± 10 μm	1040 ± 30 μm	16 MW	3.2 kW	12 dB/km	55 mm / 110 mm
FT1000UMT	1000 ± 15 μm	1035 ± 15 μm	1400 ± 50 μm	25.1 MW	5.0 kW	12 dB/km	69 mm / 138 mm
FT1500UMT	1500 ± 30 μm	1550 ± 31 μm	2000 ± 100 μm	56.6 MW	11.3 kW	18 dB/km	79 mm / 158 mm

December 6, 2022

13832-S01, Rev H

Specifications Subject
to Change without Notice
 www.thorlabs.com/contact

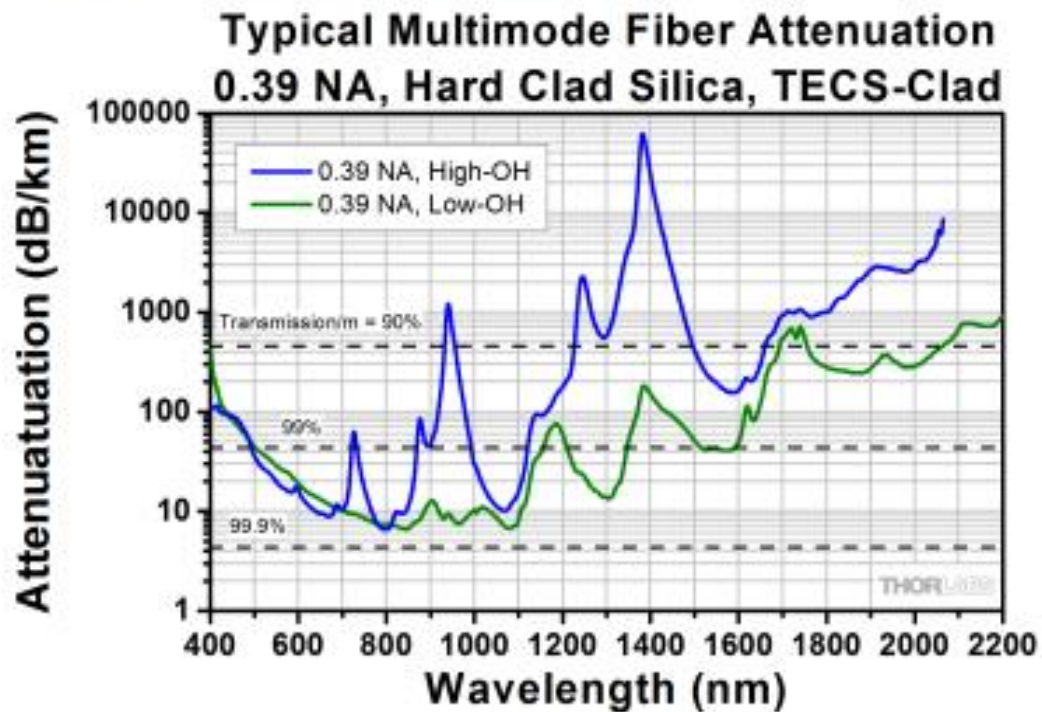


Specifications Cont.

Item #	Stripping Tool
FT200EMT	T12521
FT300EMT	T16531
FT400EMT	T21531
FT600EMT	T28546
FT800EMT	M37546
FT1000EMT	M44563
FT1500EMT	M63586

Item #	Stripping Tool
FT200UMT	T12521
FT300UMT	T16531
FT400UMT	T21531
FT600UMT	T28546
FT800UMT	M37546
FT1000UMT	M44563
FT1500UMT	M63586

Attenuation Curves



ANEXO 4. HOJA DE DATOS DE FOTORRECEPTOR

THORLABS

**PDA100A2
Si Switchable Gain
Detector**

User Guide



Chapter 6 Specifications

All performance specifications are typical, performed at 25 °C ambient temperature, and assume a 50 Ω load, unless stated otherwise.

Performance Specifications ²			
0 dB Setting		40 dB Setting	
Gain (Hi-Z)	1.51×10^3 V/A $\pm 2\%$	Gain (Hi-Z)	1.51×10^5 V/A $\pm 2\%$
Gain (50 Ω)	0.75×10^3 V/A $\pm 2\%$	Gain (50 Ω)	0.75×10^5 V/A $\pm 2\%$
Bandwidth ³	11 MHz	Bandwidth ³	90 kHz
Noise (RMS)	268 μV	Noise (RMS)	229 μV
NEP (@ λ _c)	7.17×10^{-11} W/√Hz	NEP (@ λ _c)	2.67×10^{-12} W/√Hz
Offset	±8 mV (Typ.) ±12 mV (Max)	Offset	±8 mV (Typ.) ±12 mV (Max)
10 dB Setting		50 dB Setting	
Gain (Hi-Z)	4.75×10^3 V/A $\pm 2\%$	Gain (Hi-Z)	4.75×10^5 V/A $\pm 2\%$
Gain (50 Ω)	2.38×10^3 V/A $\pm 2\%$	Gain (50 Ω)	2.38×10^5 V/A $\pm 2\%$
Bandwidth ³	1.4 MHz	Bandwidth ³	28 kHz
Noise (RMS)	195 μV	Noise (RMS)	271 μV
NEP (@ λ _c)	6.75×10^{-12} W/√Hz	NEP (@ λ _c)	4.2×10^{-12} W/√Hz
Offset	±8 mV (Typ.) ±12 mV (Max)	Offset	±8 mV (Typ.) ±12 mV (Max)
20 dB Setting		60 dB Setting	
Gain (Hi-Z)	1.5×10^4 V/A $\pm 2\%$	Gain (Hi-Z)	1.5×10^6 V/A $\pm 5\%$
Gain (50 Ω)	0.75×10^4 V/A $\pm 2\%$	Gain (50 Ω)	0.75×10^6 V/A $\pm 5\%$
Bandwidth ³	800kHz	Bandwidth ³	9 kHz
Noise (RMS)	219 μV	Noise (RMS)	423 μV
NEP (@ λ _c)	3.36×10^{-12} W/√Hz	NEP (@ λ _c)	6.24×10^{-12} W/√Hz
Offset	±8 mV (Typ.) ±12 mV (Max)	Offset	±8 mV (Typ.) ±12 mV (Max)
30 dB Setting		70 dB Setting	
Gain (Hi-Z)	4.75×10^4 V/A $\pm 2\%$	Gain (Hi-Z)	4.75×10^6 V/A $\pm 5\%$
Gain (50 Ω)	2.38×10^4 V/A $\pm 2\%$	Gain (50 Ω)	2.38×10^6 V/A $\pm 5\%$
Bandwidth ³	260 kHz	Bandwidth ³	3 kHz
Noise (RMS)	222 μV	Noise (RMS)	1.22 mV
NEP (@ λ _c)	2.83×10^{-12} W/√Hz	NEP (@ λ _c)	7.88×10^{-12} W/√Hz
Offset	±8 mV (Typ.) ±12 mV (Max)	Offset	±8 mV (Typ.) ±12 mV (Max)

² The PDA100A2 has a 50 Ω series terminator resistor (i.e. in series with amplifier output). This forms a voltage divider with any load impedance (e.g. 50 Ω load divides signal in half).

³ Tested at 650 nm wavelength. For NIR wavelengths, the rise time of the photodiode element will become slower which may limit the effective bandwidth of the amplified detector.

Electrical Specifications		
Detector	-	Si
Active Area	-	Ø9.8 mm (75.4 mm ²)
Wavelength Range	λ	320 to 1100 nm
Peak Wavelength	λ_p	960 nm (Typ.)
Peak Response	$\mathcal{R}(\lambda_p)$	0.72 AW (Typ.)
Amplifier GBP	-	600 MHz
Output Impedance	-	50 Ω
Max Output Current	I_{out}	100 mA
Load Impedance	-	50 Ω to Hi-Z
Gain Adjustment Range	-	0 to 70 dB
Gain Steps	-	8 x 10 dB Steps
Output Voltage	V_{out}	0 to 5 V (50 Ω) 0 to 10 V (Hi-Z)

General	
On/Off Switch	Slide
Gain Switch	8 Position Rotary
Output	BNC (DC Coupled)
Package Size	2.79" x 2.07" x 0.89" (70.9 mm x 52.5 mm x 22.5 mm)
PD Surface Depth ⁴	0.13" (3.3 mm)
Weight, Detector Only	0.10 kg
Accessories	SM1T1 Coupler SM1RR Retainer Ring
Operating Temp	10 to 40 °C
Storage Temp	-20 to 70 °C
AC Power Supply	AC - DC Converter
Input Power ⁵	6 W 100 V / 120 V / 230 V, 50 - 60 Hz

⁴ Measured from the front of the housing body.

⁵ Although the power supply is rated for 6 W, the detector's actual usage is <5 W over the full operating range.

6.1. Response Curve

