



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA

“Dispositivo de fibra óptica para la detección de
deformación en estructuras metálicas”

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ING. MADGLENIS BEATO DOMINGUEZ

ASESORES:

DR. JULIÁN M. ESTUDILLO AYALA

DR. JOSÉ R. REYES AYONA

SALAMANCA, GUANAJUATO

SEPTIEMBRE 2024

DEDICATORIA

A mis padres, Sra. Justina Domínguez Hernández y Sr. Oreste Beato Diaz por siempre apoyarme e impulsarme a ser una mejor persona.

A mi esposo Armando Medina Villa.

A mis hijas Natali Medina Beato y Melisa Medina Beato que son mi razón de ser.

A mi hermana Milena Beato Domínguez.

A toda mi familia y amigos cercanos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profunda gratitud a mis padres por su constante apoyo, cuidado y motivación. Su impulso me ha traído hasta aquí. Este logro es tanto de ellos como mío, y estoy orgullosa de los excelentes padres que han sido. A mi hermana, gracias por su ayuda incondicional y por siempre creer en mí. Los amo a todos.

A mi esposo Armando, por estar siempre presente a lo largo de todo este proceso, por ser mi compañero de vida y de aventuras. Gracias por brindarme tu confianza y apoyo incondicional, por motivarme cada día a seguir adelante en este camino que he elegido, por cuidarme y ayudarme a ser una mejor persona. Te amo profundamente.

A mis queridas hijas Natali y Melisa, gracias por estar a mi lado y formar parte de este logro. Las amo con todo mi corazón.

A mi asesor, el Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala, por compartir sus conocimientos, experiencias y su tiempo. Estaré siempre muy agradecida.

A Dr. Juan Carlos Hernández, Dr Roberto Rojas Laguna y Dr. José R Reyes Ayona y demás Drs. y estudiantes del capítulo IEEE Photonics.

A todos mis profesores en el periodo de maestría, por compartir sus conocimientos.

A todos mis compañeros de la maestría, en especial a mis amigos Luis, Jesús y Yuli. Gracias por su compañerismo y apoyo constante.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, por cultivar en mí los valores que la caracterizan y por moldearme como una persona íntegra y profesional con aspiraciones de éxito.



Agradezco a la División de Ingenierías del Campus Irapuato Salamanca de la Universidad de Guanajuato por permitirme completar con éxito mi Maestría en Ingeniería Eléctrica. Valorando especialmente la calidad de sus profesores, laboratorios completamente equipados y la excelencia en sus servicios, los cuales siempre respondieron a mis necesidades de manera excepcional.

Agradezco a la DAIP por el proyecto CIIC 176/2024.



Al honorable Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología CONAHCYT por el apoyo brindado con el número de becario 148527 y CVU 1252794, durante los dos años de la maestría.

A la Oficina del Abogado General, especialmente a la Lic. Fátima Espinoza Hernández, Coordinadora de Trámites Migratorios.

A todo el Cuerpo Académico de Telecomunicaciones y fotónica, especialmente a mi asesor Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala por toda la ayuda que me brindó durante estos años.

Resumen

Este trabajo de tesis se enfoca en la implementación y caracterización de dispositivos interferométricos de fibra óptica con el propósito de detectar deformaciones temporales en estructuras metálicas. Para ello se ha desarrollado una metodología que comprende la fabricación de varios interferómetros todo de fibra del tipo Mach- Zehnder empleando diferentes configuraciones y longitudes de fibra sin núcleo (NCF). Es importante resaltar que la técnica propuesta para la fabricación de estos dispositivos cuyo funcionamiento se basa en el principio de interferencia de la luz, no resulta compleja, además es posible implementarla con fibras no tan costosas. Como parte de la caracterización realizada se analizan de forma exhaustiva los patrones de interferencias resultantes con el objetivo de obtener información precisa para incrementar la sensibilidad, visibilidad y rango libre espectral (FSR) de los interferómetros fabricados. Se observaron patrones con una sobre modulación de franjas donde varía el FSR de acuerdo con las diferentes longitudes empleadas de la fibra sin núcleo y la fibra estándar. También, se comprobaron los resultados obtenidos experimentalmente con la simulación obteniéndose comportamientos muy similares. Luego se procedió a la ejecución del arreglo experimental con aquellos interferómetros que ofrecieron mejores parámetros para el sensado. Estos se fijaron a una viga metálica en una prensa hidráulica y se sometieron a una fuerza externa vertical. Finalmente se analizaron los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas en la detección de deformaciones en la estructura metálica, observándose desplazamientos en longitudes de onda y de amplitud.

PALABRAS CLAVES: Interferómetro, fibras ópticas, patrones de interferencia, deformación.

Abstract

This thesis focuses on the implementation and characterization of fiber optic interferometric devices with the purpose of detecting temporal deformations in metallic structures. For this purpose, a methodology has been developed that includes the fabrication of several all-fiber interferometers of the Mach-Zehnder type using different configurations and lengths of coreless fiber (NCF). It is important to highlight that the proposed technique for the fabrication of these devices, whose operation is based on the principle of light interference, is not complex and it is possible to implement it with inexpensive fibers. As part of the characterization carried out, the resulting interference patterns are exhaustively analyzed to obtain precise information to increase the sensitivity, visibility and spectral free range (FSR) of the interferometers manufactured. Patterns were observed with an over modulation of fringes where the FSR varies according to the different lengths used of the coreless fiber and the standard fiber. Also, the results obtained experimentally were checked with the simulation, obtaining very similar behaviors. The experimental setup was then carried out with those interferometers that offered the best parameters for sensing. These were fixed to a metal beam in a hydraulic press and subjected to a vertical external force. Finally, the results obtained from the tests carried out in the detection of deformations in the metallic structure were analyzed, observing displacements in wavelength and amplitude.

KEYWORDS: interferometer, optical fibers, interference patterns, deformation.

Contenido

Resumen	5
Abstract.....	6
Índice de figuras.	10
Índice de tablas.	12
Capítulo 1	14
1.1 Introducción.....	14
1.2. Objetivos.....	15
1.2.1. Objetivo general	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. Justificación	15
1.4 Antecedentes.....	16
1.5 Estructura de la investigación.....	18
Capítulo 2	20
2.1 Introducción.....	20
2.2 Ecuaciones de Maxwell.	20
2.3 Ecuación de onda.....	23
2.4 Modos en las fibras ópticas	24
2.5 Fibra monomodo	27
2.6 Fibra multimodo. Fibra sin núcleo (NCF)	27

2.7 Interferencia.....	28
2.8 Interferómetro Mach Zehnder (MZI)	30
2.9 Sensores de fibras ópticas.....	34
2.9.1 Sensores extrínsecos	35
2.9.2 Sensores intrínsecos.....	36
2.10 Clasificación de los sensores ópticos	37
2.11 Parámetros presentes en las fibras ópticas.....	40
2.11.1 Expansión térmica y efecto termo-óptico	40
2.11.2 Efecto elasto-óptico	41
2.12 Características estáticas de un sensor	42
2.13 Ventajas de los sensores de fibras ópticas.....	44
Capítulo 3	45
Introducción.....	45
3.1 Fabricación de los interferómetros.	45
3.1.1 Software Kinesis.....	46
3.1.2 Servomotor KDC101	48
3.1.3 Actuador monitorizado Z812B.....	49
3.1.4 Cortadora milimétrica Fujikura CT-04B	49
3.1.5 Empalmadora Fujikura FS100M	49
3.2 Procedimiento para la fabricación	50
3.3 Caracterización de los interferómetros.	52
3.3.1 Fuente de luz de amplio espectro.	52

3.3.2 Analizador de espectros ópticos (OSA).....	55
3.4 Simulación en Matlab del interferómetro MZI con estructura SNS.....	60
Capítulo 4	64
Resultados.....	64
4.1 Esquema experimental del sensor de deformación.....	64
4.1.1 Perfil tubular Rectangular (PTR).....	65
4.1.2 Prensa hidráulica.....	66
4.2 Conceptos importantes relacionados con la mecánica de materiales.	67
4.3 Modelo matemático para calcular la deflexión en vigas.	68
4.4 Respuestas de los sensores ante variaciones de deflexión y peso aplicado.....	73
Conclusiones.....	76
Referencias	77

Índice de figuras.

Figura 1 Interferómetro Mach Zehnder de bulto.....	31
Figura 2 Interferómetro Mach Zehnder de fibra.....	31
Figura 3 Interferómetro Mach Zehnder en línea todo de fibra.....	32
Figura 4 Sistema de sensor de fibra óptica [33].	35
Figura 5 Sensor extrínseco.	36
Figura 6 Sensor intrínseco.....	37
Figura 7 Clasificación de los sensores de fibras ópticas.	37
Figura 8 Curva de sensibilidad de un sensor[37].	42
Figura 9 Curva de histéresis de un sensor.	43
Figura 10 Pasos para la fabricación del MZI.....	45
Figura 11 Esquema para la fabricación del MZI.	46
Figura 12 Ventana de configuración del software Kinesis.....	46
Figura 13 Parámetros de configuración mínimos que se pueden establecer con el software Kinesis.	47
Figura 14 Parámetros específicos establecidos en el software Kinesis durante la fabricación de los interferómetros.	48
Figura 15 Configuraciones del MZI. a) SNS, b) SNSNS.....	51
Figura 16 Láser SNP-70F-100.....	52
Figura 17 Esquema para caracterizar fuente de luz.....	53
Figura 18 Espectro de luz supercontinuo en los rangos 1000 a 1700 y de 1400 a 1600.	54

Figura 19 Esquema para caracterizar interferómetros.....	55
Figura 20 Espectros de transmisión y de frecuencias del interferómetro SMF-NCF-SMF de 1cm de fibra sin núcleo.....	56
Figura 21 Interferómetro SMF-NCF-SMF de 2 cm de fibra sin núcleo.....	57
Figura 22 Espectros de transmisión y de frecuencias de tres interferómetros de estructura SMF-NCF-SMF con diferentes longitudes de fibra sin núcleo.....	58
Figura 23 Espectro del interferómetro doble con 3mm de longitud de NCF 5 cm de SMF	59
Figura 24 Espectro de transmisión de interferómetro doble con 3mm de longitud de NCF y 10 cm de SMF.	59
Figura 25 Espectro de frecuencia de interferómetro doble de 1cm NCF- 6.3 cm de longitud de SMF	60
Figura 26 Espectro de salida del interferómetro de 1cm NCF experimental y simulado.	62
Figura 27 Esquema experimental para la detección de deformación en una viga metálica.	65
Figura 28 Perfil Tubular Rectangular (PTR) de acero. Sección cuadrada.	65
Figura 29 Prensa hidráulica de 12 TON.	67
Figura 30 Viga simplemente apoyada sometida a una carga concentrada P en el centro. a) esquema general b) diagrama de cuerpo libre.	69
Figura 31 Respuesta del dispositivo MZI a la deformación (a) espectros de transmisión a diferentes deflexiones; (b) desplazamiento de la amplitud en función de la deflexión..	74
Figura 32 Respuesta del dispositivo MZI al peso (a) espectros de transmisión a diferentes pesos (g); (b) desplazamiento de la longitud de onda en función del peso aplicado.....	75
Figura 33 Respuesta del dispositivo MZI al peso (a) espectros de transmisión a diferentes pesos (g); (b) desplazamiento de la longitud de onda en función del peso aplicado.....	75

Índice de tablas.

Tabla 1 Especificaciones de fibra SMF-28[24].....	27
Tabla 2 Especificación técnica de la fibra sin núcleo. FG125LA	28
Tabla 3 Parámetros utilizados en la empalmadora Fujikura FS100M para empalmar la fibra sin núcleo FG125LA y la fibra SMF-28.	50
Tabla 4 Especificación técnica del láser SNP-70F-100	53
Tabla 5 Propiedades del PTR.	66
Tabla 6 Especificaciones técnicas de la prensa hidráulica Modelo TY12002.	67

GLOSARIO DE TÉRMINOS

NCF NO CORE FIBER (FIBRA SIN NÚCLEO)

SMF SINGLE MODE FIBER (FIBRA MONOMODO)

FSR FREE SPECTRAL RANGE (RANGO ESPECTRAL LIBRE)

FOS FIBER OPTIC SENSOR (SENSOR DE FIBRA ÓPTICA)

PCF PHOTONIC CRYSTAL FIBER (FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO)

FBG FIBER BRAGG GRATING (REJILLA DE BRAGG EN FIBRA)

EFPI EXTRINSIC FABRY-PEROT INTERFEROMETER (INTERFERÓMETRO EXTRÍNSECO FABRY-PEROT)

MZI MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER (INTERFERÓMETRO DE MACH-ZEHNDER)

MMF MULTIMODE FIBER (FIBRA MULTIMODO)

RI REFRACTIVE INDEX (ÍNDICE DE REFRACCIÓN)

Capítulo 1

1.1 Introducción

La supervisión y control de la salud estructural hoy en día constituye un aspecto fundamental dentro de la ingeniería civil para garantizar la seguridad, eficiencia y durabilidad de las edificaciones. Evaluar en tiempo real estas estructuras permite identificar a tiempo los daños causados por fatigas o cargas ambientales [1]. Además, permite valorar el rendimiento y vida útil, para de esta forma establecer las acciones oportunas de mantenimiento preventivo y correctivo [2]. El monitoreo precisa medir parámetros tales como la tensión, deflexión, el desplazamiento, la rotación y la aceleración en varios puntos a lo largo de la estructura [3]. Las mediciones del parámetro de deformación constituyen un aspecto clave en la evaluación del comportamiento mecánico de una estructura. Debido a su enfoque localizado, las técnicas basadas en deformación se han empleado principalmente para supervisar la fatiga en puntos críticos específicos de la estructura. Durante décadas en la ingeniería estructural se han utilizado los métodos convencionales para medir la deformación en vigas metálicas. Estos métodos proporcionan datos esenciales para evaluar el comportamiento estructural bajo cargas y asegurar la integridad de las vigas. Debido al avance en la investigación, el campo de las mediciones de deformación ha experimentado un notable crecimiento gracias a la introducción de los sensores de fibra óptica (FOS). Estos sensores ofrecen ventajas significativas, como alta sensibilidad, inmunidad a interferencias electromagnéticas, durabilidad, capacidad de multiplexación, detección distribuida y potencial de integración en la estructura [4]. Debido a estas ventajas muchos han sido los trabajos de investigación que se han dedicado a los sensores de fibra óptica como un gran potencial para el monitoreo continuo en tiempo real de estructuras civiles, metálicas entre otras.

En la presente investigación se aborda la problemática de contar con una estructura interferométrica hecha toda de fibra del tipo Mach Zehnder para medir deformaciones presentes en las vigas metálicas sometidas a diferentes cargas.

En este capítulo se tratan los objetivos generales y específicos, así como la justificación, antecedentes y planteamiento del problema.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Implementar y caracterizar dispositivos de fibra óptica basados en interferencia intermodal para detectar deformaciones temporales en estructuras metálicas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar y fabricar interferómetros completamente de fibra mediante la unión de fibra monomodo SMF-28 y fibra óptica sin núcleo (NCF).
- Analizar los patrones de interferencias resultantes al realizar variaciones de la longitud de la fibra sin núcleo y de la fibra de comunicaciones.
- Obtener información precisa para incrementar la sensibilidad, visibilidad y rango libre espectral (FSR) de los interferómetros fabricados.
- Implementar arreglo experimental con un interferómetro modal basado en fibra óptica para detectar las deformaciones temporales en una viga metálica, la cual es sometida a una fuerza externa.
- Realizar pruebas en diferentes condiciones, sobre el funcionamiento del interferómetro para lograr repetibilidad de los dispositivos implementados, así como el incremento de la sensibilidad en los parámetros seleccionados.

1.3. Justificación

La detección oportuna de cambios en la integridad estructural de las vigas metálicas empleadas en las diversas construcciones civiles es de suma importancia para la toma de acciones preventivas y correctivas [5]. Estas medidas propician el bienestar y la seguridad de las personas que hacen uso de estas construcciones además de evitar reparaciones muy

costosas. La monitorización y la medición de estas deformaciones ofrecen información valiosa para un mejor diseño y confiabilidad de las estructuras [6].

Varias son las técnicas empleadas hoy en día para la medición de estas deformaciones entre las que se pueden mencionar los extensómetros mecánicos, ópticos, transductores de desplazamiento lineal de variable inductancia, medidores de carga, fotogrametría entre otros. En general estos dispositivos para obtener mediciones confiables requieren una adecuada instalación y preparación de la superficie, calibración precisa, compensación de temperatura e interferencia electromagnética y la estabilidad del ambiente de medición [7].

En la actualidad resulta ventajoso el empleo de los dispositivos interferométricos basados en el principio de interferencia modal debido a su alta precisión y sensibilidad. Estos dispositivos se basan en interferencia de ondas de luz o láser y pueden detectar desplazamientos y deformaciones que con otros dispositivos sería imposible detectar con gran exactitud y precisión. Además, el costo relativamente económico de los componentes necesarios para su fabricación, su portabilidad debido a su poco peso y pequeño tamaño además de ofrecer alta inmunidad a las interferencias electromagnéticas son otras de las razones para su uso.

En este trabajo se investiga un dispositivo interferométrico completamente de fibra óptica basado en el principio de interferencia intermodal que permita realizar mediciones y monitorear el control de la deflexión como parte de las deformaciones temporales presentes en vigas metálicas.

1.4 Antecedentes

En estructuras de hormigón y de acero, como edificios, puentes y algunas carreteras los ingenieros civiles han empleado sensores de deformación para monitorear deflexiones, tensiones y expansión térmica. Estos efectos se pueden suscitar en estas estructuras debido a la acción de agentes externos y la propia fatiga de las estructuras. En comparación con los sensores mecánicos y eléctricos tradicionales empleados para este fin, los sensores de fibra óptica poseen numerosas ventajas, como tamaño pequeño y peso ligero lo cual permite integrarse e incrustarse en las estructuras civiles. Su composición

dieléctrica resulta en una alta inmunidad a la interferencia electromagnética (EMI) y a la corrosión. Debido a esto desde hace varias décadas se ha prestado especial atención a la investigación sobre el funcionamiento y posibles aplicaciones de los sensores de fibras ópticas. Han sido varios los trabajos propuestos empleando los sensores de fibras óptica con la finalidad de vigilar la salud estructural de estas construcciones. (Masri et al., 1994) en este artículo los autores realizaron una revisión sobre las aplicaciones de los sensores de fibras ópticas en el campo de la mecánica estructural. Además, mostraron los resultados experimentales que obtuvieron al emplear un sensor extrínseco Fabry Perot para medir deformación en una estructura de hormigón armado sometida a cargas dinámicas cíclicas. Validaron las mediciones obtenidas con el sensor de fibra óptica con las mediciones obtenidas con galgas extensométricas colocadas en la misma posición de la estructura de hormigón.. (Bhatia Vikram et al., 1995) implementaron un sensor de deformación interferométrico extrínseco Fabry-Perot (EFPI) basado en fibra óptica. En el artículo proponen diferentes técnicas para mejorar las limitaciones del diseño del dispositivo.(Ye et al., 2018) propusieron un sistema de monitoreo de tensión basado en rejilla de fibra de Bragg (FBG) sobre un puente de arco con plataforma de acero ortotrópico. (Chen et al., 2014) propusieron un sensor de flexión formado por un segmento de 10 mm de fibra de cristal fotónico (PCF) empalmado entre dos segmentos de fibra monomodo (SMF). El dispositivo fue colocado sobre una lámina de cobre de 17.5 cm de longitud y conectado a un diodo de luz superluminicente. Con un controlador micrómetro se ejerció una fuerza a la lámina con la finalidad de medir curvatura según variara el desplazamiento. La sensibilidad alcanzada a 1586 nm fue de 0.53 nm/m-1. (Lu & Chen, 2010) expusieron un interferómetro Mach-Zehnder de fibra asimétrica (aFMZI) capaz de realizar mediciones de deformación axial y temperatura. (Bian et al., 2022) implementaron un sensor basado en rejillas de fibras de Bragg (FBG) para medir en tiempo real parámetros de deformación y temperatura. Este sensor fue incrustado en una estructura de aluminio durante el proceso de fundición resultando ser un método prometedor para el monitoreo de la salud estructural de estructuras metálicas. (Adnan Kadhim, 2015) propone un interferómetro Michelson para medir deformación empleando la técnica de modulación de fase. (Cibula & Donlagic, 2004) presentaron un sensor de deformación basado en Fabry-Perot (FP) intrínseco con cavidad de aire. (Xinyu Meng et al., 2015) implementaron un sensor basado en rejillas de fibras de Bragg de periodo largo inclinado y desplazado en fase para medir deformación y temperatura a la vez. (Wang et

al., 2021) propusieron un sensor de deformación de fibra monomodo basado en un interferómetro Mach-Zehnder de estructura curvada. (Li et al., 2015) presentan un sensor de fibra capaz de medir simultáneamente la deformación y la temperatura. La estructura del sensor está formada por un segmento de fibra sin núcleo (NCF) empalmada entre dos fibras monomodo (SMF-28). En la segunda fibra monomodo se inscribe una rejilla de Bragg (SMFBG). (Yoon et al., 2011) presentaron un sistema distribuido de sensores de fibras ópticas basados en el análisis de dominio de correlación de Brillouin para medir la deformación longitudinal en un rail bajo diferentes condiciones de carga. (Täljsten et al., 2008) presentan los resultados de una prueba inusual de salud estructural, “prueba hasta la destrucción” sobre un puente ferroviario de hormigón en desuso en Suecia. Para ello emplearon un sistema de sensores basados en rejillas de Bragg para el seguimiento de la medición de la deformación justo antes del colapso del puente. (PNG et al., 2018) presentaron un interferómetro todo de fibra en línea del tipo Mach Zehnder para detectar curvatura y monitorizar grietas en vigas estructurales de hormigón ligero. La estructura del sensor está formada por dos tapers bicónicos. (Zhou et al., 2014) propusieron un interferómetro todo de fibra del tipo Mach Zehnder empalmado de forma desalineada un segmento de fibra de núcleo delgado entre dos segmentos de fibra estándar para medir de forma simultánea deformación y temperatura.

En este trabajo se propone el estudio y fabricación de un dispositivo interferométrico todo de fibra óptica capaz de medir parámetros de deformación como deflexión en estructuras metálicas obteniendo un alto coeficiente de sensibilidad.

1.5 Estructura de la investigación

El proyecto de tesis está estructurado de la siguiente forma: en el Capítulo 2 se analizan los contenidos y expresiones matemáticas que constituyen la base teórica necesaria para comprender el principio de operación del dispositivo descrito en esta investigación. Inicialmente, se aborda el tema de las ecuaciones de Maxwell y ecuaciones de onda, fundamentales para la comprensión del comportamiento y propagación de la luz dentro de las fibras ópticas. Además, se trata el tema de principio de funcionamiento, clasificación y parámetros que caracterizan a los sensores de fibras ópticas. En el Capítulo 3 se realiza la descripción de la metodología seguida en el proceso de fabricación de los interferómetros de fibra óptica del tipo Mach Zehnder empleando la fibra monomodo

SMF-28 y la fibra sin núcleo (NCF). Durante el proceso de fabricación se realizaron variaciones en la longitud del segmento de la fibra sin núcleo, así como de la fibra de comunicaciones. También en este capítulo se realiza la caracterización de los diferentes interferómetros fabricados analizándose los parámetros de visibilidad y FSR. En el Capítulo 4 se describen los materiales y dispositivos que intervienen en el esquema experimental para realizar las pruebas de deformación en la viga metálica y se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas. Finalmente se presentan las conclusiones de esta investigación basadas en las pruebas realizadas.

Capítulo 2

2.1 Introducción.

En este capítulo, se abordan los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión del funcionamiento de los dispositivos fabricados. Se parte del análisis de las ecuaciones de Maxwell como base de la teoría electromagnética, las cuales son fundamentales para el diseño y operación de los sensores basados en fibra óptica. Se continúa con la deducción de las ecuaciones de onda para el campo eléctrico y magnético, esenciales para entender la propagación de ondas electromagnéticas en la fibra óptica. A continuación, se discutirá el funcionamiento y las características de los sensores de fibra óptica, así como los parámetros que los definen. Finalmente, se analizarán en detalle los sensores interferométricos, con un énfasis especial en el interferómetro Mach-Zehnder, destacando su diseño, principio de operación y aplicaciones prácticas.

2.2 Ecuaciones de Maxwell.

Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de cuatro expresiones matemáticas que constituyen la teoría básica del electromagnetismo. Estas ecuaciones unifican el campo eléctrico y el campo magnético en una teoría coherente, proporcionando una descripción completa de cómo las cargas y corrientes generan campos eléctricos y magnéticos y cómo estos campos interactúan entre sí. Las fibras ópticas funcionan mediante la transmisión de la luz, que es una onda electromagnética. Es por esto por lo que el estudio y entendimiento de las Leyes de Maxwell resulta crucial en el campo de las fibras ópticas para describir el comportamiento y propagación de la luz en el medio.

$$\text{Ley de Faraday} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\text{Ley de Ampere} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\text{Ley de Gauss} \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.3)$$

Ley de Gauss para el campo magnético $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ (2.4)

Donde

\vec{E} vector de campo eléctrico (V/m)

\vec{H} vector de campo magnético (A/m)

\vec{D} densidad de campo eléctrico (As/m²)

\vec{B} densidad del campo magnético (Vs/m²=T)

\vec{J} vector densidad de corriente (A/m²)

ρ_v densidad de carga. (As/m³)

\vec{D} y \vec{B} se pueden calcular a partir de \vec{E} y \vec{H} de acuerdo con las Ecuaciones 2.5 y 2.6. donde

ϵ_0 permitividad en el vacío 8.85×10^{-12} As/Vm

μ_0 permeabilidad en el vacío 1.26×10^{-6} Vs/Am

\vec{P} polarización eléctrica inducida

\vec{M} polarización magnética inducida [22].

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (2.6)$$

Para el caso de las fibras ópticas que están constituidas de un material dieléctrico, donde no existen cargas libres, $\rho_v = 0$ por tanto no circula corriente eléctrica, $\vec{J} = 0$ y además se cumple que $\vec{M} = 0$ debido a que es un medio no magnético, las ecuaciones quedarían como sigue:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.10)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.11)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.12)$$

Realizando una interpretación de estas leyes se puede decir que la ley de Faraday expresa que si existe una variación de campo magnético B entonces este provoca un campo eléctrico. El signo negativo explica que el sentido de la corriente inducida es tal que su flujo se opone a la causa que lo produce, compensando así la variación de flujo magnético. Por su parte la ley de Ampere indica que los campos magnéticos son generados tanto por corrientes eléctricas como por campos eléctricos variables en el tiempo permitiendo así la propagación de ondas electromagnéticas. Para el caso de la ley de Gauss explica la relación entre el flujo del campo eléctrico y una superficie cerrada. La forma diferencial de esta ley afirma que la divergencia del campo eléctrico en un punto es proporcional a la densidad de carga eléctrica en ese punto. En términos más simples, indica que las cargas eléctricas son fuentes de campos eléctricos y que el flujo eléctrico neto a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga encerrada dentro de esa superficie. La Ley de Gauss para el campo magnético indica que las líneas de los campos magnéticos deben ser cerradas. Esto expresa la inexistencia del monopolo magnético. Al encerrar un dipolo en una superficie cerrada, no sale ni entra flujo magnético, por lo tanto, el campo magnético no diverge, no sale de la superficie.

2.3 Ecuación de onda.

Para determinar cómo se propaga una onda electromagnética en el espacio libre según las ecuaciones de Maxwell, es necesario reorganizarlas. En la ecuación 2.12 se despeja el campo eléctrico \vec{H} quedando la expresión

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (2.13)$$

Se sustituye la ecuación (2.13) y (2.11) en la ecuación (2.8)

$$\nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} \right) = \frac{\partial(\epsilon_0 \vec{E})}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.15)$$

Se toma el producto cruz de la ecuación (2.7) y la dependencia del campo magnético eliminada, y usando la ecuación (2.8) reacomodada:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial(\nabla \times \vec{B})}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (2.16)$$

considerando un medio no dispersivo, donde ϵ_0 y μ_0 son constantes y no dependen de la frecuencia de la onda electromagnética. La ecuación anterior se puede reescribir:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.17)$$

Considerando la identidad.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (2.18)$$

Se tiene

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

Debido a que el espacio libre está libre de cargas ($\nabla \cdot \vec{E} = 0$), la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

De manera similar se puede realizar el mismo procedimiento para el campo magnético.

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

Las ecuaciones (2.20) y (2.21) son las ecuaciones de onda para el campo eléctrico y magnético en un medio no dispersivo.

2.4 Modos en las fibras ópticas

El modo de transmisión óptico está relacionado con una solución específica de la ecuación de onda que satisface condiciones de frontera específicas. Tiene la característica de que la distribución espacial del campo óptico no varía con la propagación. Los modos de transmisión pueden clasificarse en modos ópticos guiados, modos de fuga y de radiación. En el caso de las fibras ópticas la señal de transmisión es a través de únicamente los modos guiados [22].

En coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z) la Ecuación de Onda puede escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 E_z = 0 \quad (2.22)$$

Donde n corresponde con el índice de refracción y $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda en el espacio libre, y λ es la longitud de onda en el vacío.

Considerando una fibra óptica con perfil de índice de refracción escalonado y radio de núcleo a el índice de refracción es de la forma:

$$n = \begin{cases} n_1 & r \leq a \\ n_2 & r > a \end{cases} \quad (2.23)$$

se obtiene

$$E_z(r, \phi, z) = R(r)\Phi(\phi)Z(z) \quad (2.24)$$

Sustituyendo la ecuación (2.23) en la ecuación (2.21) se obtienen tres ecuaciones diferenciales.

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + \beta^2 Z = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2} + m^2 \Phi = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + (n^2 k_0^2 - \frac{m^2}{r^2} + \beta^2) R = 0 \quad (2.27)$$

Para 2.25 la solución es $Z = e^{i\beta z}$ donde β es la constante de propagación.

Para la Ecuación 2.26 la solución es $\Phi = e^{im\phi}$. La constante m está restringida a tomar sólo valores enteros ya que el campo debe de ser periódico en ϕ con un periodo de 2π .

La Ecuación 2.27 se debe resolver a través de las funciones de Bessel. La solución general para la región del núcleo y el revestimiento están dada por:

$$R(r) = \begin{cases} AJ_m(pr) + A'Y_m(pr); & r \leq a \\ CK_m(qr) + C'I_m(qr); & r > a \end{cases} \quad (2.28)$$

Donde A, A', C, C' son constantes y J_m, Y_m, K_m, I_m son las funciones de Bessel. Los parámetros p y q se definen por:

$$p^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (2.29)$$

$$q^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (2.30)$$

La solución general de la ecuación 2.24 es:

$$E_z = \begin{cases} AJ_m(pr)e^{im\phi}e^{i\beta z}; & r \leq a \\ CK_m(qr)e^{im\phi}e^{i\beta z}; & r > a \end{cases} \quad (2.31)$$

De forma similar se realiza el análisis para encontrar el campo magnético H_z .

Un parámetro importante para determinar la condición de corte del modo de propagación es la frecuencia normalizada (V). Está determinada por el radio de la fibra (a), la longitud de onda de trabajo (λ) y la diferencia de los cuadrados de los índices de refracción del núcleo n_1 y del revestimiento n_2 .

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.32)$$

Una fibra con un valor $V < 2.405$ admite solo el modo fundamental y se le denomina fibra monomodo. Para fibras con $V > 2.405$ se les conoce fibras multimodo, por las cuales se propagan un mayor número de modos. Para las fibras de índice escalonado el número de modos se puede estimar con la ecuación:

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (2.33)$$

Los modos transversales determinan el perfil de radiación que se genera al viajar una onda electromagnética a través de una guía de onda. Estos modos se clasifican de la siguiente manera:

- Modo TE (Transversal Eléctrico): la componente del campo eléctrico en la dirección de propagación es cero.
- Modo TM (Transversal Magnético): la componente del campo magnético en la dirección de propagación es cero.
- Modo TEM (Transversal Electromagnético): tanto la componente del campo eléctrico como la del campo magnético en la dirección de propagación son cero.
- Modo Híbrido: en estos modos, hay componentes tanto del campo eléctrico como del campo magnético en la dirección de propagación.

2.5 Fibra monomodo

Las fibras monomodo sólo admiten el modo HE_{11} , conocido como modo fundamental. Está diseñada de tal manera que todos los modos de orden superior se cortan en la longitud de onda de funcionamiento. El núcleo de esta fibra es extremadamente pequeño, típicamente alrededor de 8 a 10 micrómetros (μm) de diámetro. Este tamaño reducido es lo que permite que solo un modo de luz se propague a través de la fibra, por lo que la luz viaja por un solo camino o patrón, eliminando la dispersión modal y permitiendo una transmisión más precisa y a mayores distancias.

Las especificaciones técnicas de la fibra monomodo estándar (SMF-28) se relacionan en la tabla 1.

Especificación técnica de la fibra monomodo. SMF-28	
Diámetro del núcleo	8.2 μm
Diámetro del revestimiento	125 μm
Apertura numérica	0.14
Índice de refracción efectivo	1.4682 a 1550 nm
Atenuación a $\lambda=1550$ nm	0.2 dB/km
Dispersión cromática a $\lambda=1550$ nm	16 ps/km. nm

Tabla 1 Especificaciones de fibra SMF-28[24]

2.6 Fibra multimodo. Fibra sin núcleo (NCF)

Las fibras multimodo (MMF, por sus siglas en inglés) son un tipo de fibra óptica por la cual viajan múltiples modos de luz simultáneamente, lo que permite una mayor capacidad de transmisión de información a través de la fibra. Tienen un núcleo más grande en comparación con las fibras monomodo, el cual puede ser de 50 o 62.5 micrómetros. Además, tienen una apertura numérica mayor, lo que permite una aceptación más amplia de la luz que entra en la fibra. Sin embargo, la principal desventaja de esta fibra es que

debido a los múltiples modos que pueden ser transportados, los cuales viajan a diferentes velocidades de propagación, provocan la dispersión modal. Esto a su vez limita el ancho de banda disponible en las fibras multimodo.

La fibra óptica sin núcleo FG125LA es un tipo especial de fibra óptica que se utiliza en diversas aplicaciones avanzadas. Carece de un núcleo tradicional, lo que la distingue de las fibras monomodo y multimodo convencionales. Está compuesta únicamente por el revestimiento y la capa protectora exterior. En lugar de guiar la luz a través de un núcleo de mayor índice de refracción, la fibra sin núcleo guía la luz mediante reflexiones totales internas en la superficie del revestimiento. [23].

Las especificaciones técnicas de la fibra sin núcleo (NCF) se relacionan en la tabla 2.2.

Especificación técnica de la fibra sin núcleo. FG125LA	
Rango de longitud de onda	400 - 2400 nm
Pérdidas de retorno	>65 dB con 0.25 m
Diámetro del vidrio	125 +1/-2 μm
Diámetro del revestimiento	250 $\mu\text{m} \pm 12.5 \mu\text{m}$
Índice de refracción	1.444 a 1550 nm
Temperatura de operación	-40 a 85 $^{\circ}\text{C}$

Tabla 2 Especificación técnica de la fibra sin núcleo. FG125LA

2.7 Interferencia.

El fenómeno de interferencia esta dado por la superposición coherente de dos o más ondas electromagnéticas en el tiempo y en el espacio. El campo eléctrico resultante será la suma vectorial de los campos individuales.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (2.34)$$

Cuando se trata el tema de interferencia es preferible considerar la irradiancia (W/m^2), en lugar de la amplitud de la onda. El término de irradiancia denotado por I está definido como la energía media por unidad de superficie y unidad de tiempo. Esta es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico lo cual significa que cualquier efecto de interferencia se manifestará claramente en la irradiancia.

Dentro de un dieléctrico lineal, homogéneo e isótropo, la expresión para la irradiancia se define por:

$$I = \epsilon v \langle E^2 \rangle_T \quad (2.35)$$

Donde ϵ es la permitividad eléctrica, v es la velocidad de la onda de luz en el medio y E es la amplitud del campo eléctrico [24].

Considerando dos ondas electromagnéticas monocromáticas con la misma frecuencia y polarización, pero con una diferencia de fase $\Delta\delta$, las amplitudes de las ondas E_1 y E_2 . La irradiancia total I en el punto de interferencia se puede expresar como:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta \quad (2.36)$$

donde I_1 e I_2 son las irradiancias individuales de cada onda, y $2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta$ es el término de interferencia que depende de la diferencia de fase. Esta ecuación muestra cómo la irradiancia resultante depende directamente de las irradiancias individuales y de la diferencia de fase, permitiendo un análisis claro del patrón de interferencia.

A partir de la ecuación (2.36) se puede observar que para $\delta = (0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \dots)$ la irradiancia es máxima. A este caso se le conoce como interferencia constructiva total. Cuando las ondas están desfasadas, de tal forma que $0 < \cos\delta < 1$, se dice que el valor de I se ubica entre $I_1 + I_2$ e I_{max} y existe interferencia constructiva. Por otro lado, cuando $\delta = (\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \dots)$ la irradiancia es mínima y se le conoce como interferencia destructiva total. A partir de $\delta = \frac{\pi}{2}$ el valor de I oscila entre $I_1 + I_2$ e I_{min} , se dice que existe interferencia destructiva. Cuando las irradiancias son iguales $I_1 = I_2 = I_0$ la irradiancia total es

$$I = 2I_0(1 + \cos\delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2.37)$$

Para fuentes puntuales que emiten ondas esféricas se obtiene una diferencia de fase de la siguiente forma.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n(r_1 - r_2) + (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2.38)$$

De la ecuación anterior se puede observar que la interferencia puede estar dada por la diferencia de caminos ópticos ($r_1 - r_2$) o por la diferencia de fase inicial entre las dos ondas ($\varphi_1 - \varphi_2$). Aquellas ondas para las cuales la diferencia de fase es constante se dice que las ondas y por tanto las fuentes son coherentes ya que mantienen una relación de fase constante entre sí a lo largo del tiempo y el espacio. Es precisamente la coherencia una de las condiciones que deben cumplir las ondas para generar el fenómeno de interferencia. Además, estas ondas deben tener la misma longitud de onda o frecuencia para así mantener la coherencia temporal y espacial. También la misma polarización o al menos componentes similares para que puedan interactuar entre sí.

2.8 Interferómetro Mach Zehnder (MZI)

En un interferómetro la luz de entrada se divide en dos haces, uno de los cuales está expuesto a la perturbación externa y el otro se aísla de la misma y se utiliza como referencia. Posteriormente en la salida los haces se recombinan e interfieren entre sí, dando lugar a un patrón de interferencia, el cual está relacionado con la diferencia de fase entre los dos caminos ópticos. De esta señal resultante es posible extraer la información del parámetro a medir.

De acuerdo con el principio de operación los interferómetros pueden ser por división de frente de onda y por división de amplitud. Ejemplo de este último es el interferómetro Mach Zehnder, el cual puede ser fabricado empleando espejos divisores de haz (conocido como de bulto) o empleando diferentes configuraciones y tipos de fibras ópticas.

Un interferómetro Mach-Zehnder de bulto es aquel donde una fuente de luz coherente emite un haz de entrada, el cual es dividido en dos haces por medio de un espejo divisor. Estos rayos de luz viajan por diferentes trayectorias ópticas y son reflejados por dos espejos antes de recombinarse en un cuarto espejo que actúa como acoplador. En el punto de recombinación, los haces interfieren entre sí, creando un patrón de interferencia

observable como franjas. Este patrón de interferencia puede modificarse de varias maneras. Una forma es rotando ligeramente uno de los espejos, lo cual cambia las longitudes de los caminos ópticos que recorren los haces. Otra forma es insertando un material en uno de los brazos del interferómetro. Este material tiene un índice de refracción mayor que el del aire, lo cual reduce la velocidad de fase del haz que lo atraviesa. Como resultado, se genera una diferencia de fase entre los dos rayos luminosos cuando se recombinan, alterando el patrón de interferencia observado. La Figura 1 muestra la configuración del interferómetro Mach Zehnder de bulto.

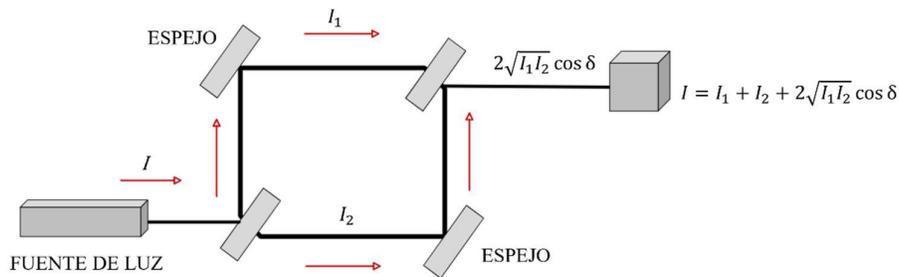


Figura 1 Interferómetro Mach Zehnder de bulto.

Por otra parte, la configuración del interferómetro MZI completamente de fibra puede realizarse de dos formas, la primera empleando dos acopladores de fibras ópticas y la segunda fusionando diferentes tipos de fibras. La estructura y el principio de funcionamiento de estas versiones son similares al descrito anteriormente. La Figura 2 muestra el esquema del interferómetro de fibra utilizando acopladores.

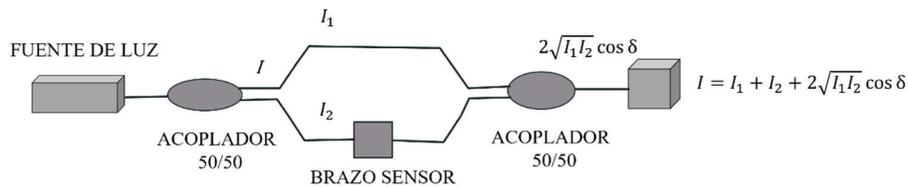


Figura 2 Interferómetro Mach Zehnder de fibra.

Como ya se había mencionado, la otra forma de presentarse un interferómetro Mach-Zehnder todo de fibra es en línea. Estos emplean la diferencia de camino óptico entre los modos que se propagan en el núcleo y el revestimiento en una fibra. Su fabricación puede estar basada en el empleo de tapers, rejillas de fibras de periodo largo, fibras de núcleo

delgado, desplazamientos de núcleos o combinación de estas [25]. La ventaja de estas estructuras en línea es su tamaño compacto, simplicidad en el proceso de fabricación y rango ilimitado de medición de longitud de onda [26] .

En este trabajo se propone la fabricación de un interferómetro en línea empalmando un segmento de fibra sin núcleo entre dos fibras monomodo idénticas. La fibra sin núcleo (NCF) juega un papel importante como región de detección. La misma exhibe una respuesta más sensible a los cambios en el entorno debido a la ausencia de una capa de revestimiento, ya que la propia fibra actúa como el núcleo mientras que el medio externo actúa como el revestimiento[27] . Esto sucede cuando el índice de refracción (RI) del medio circundante es menor que el de la fibra sin núcleo y la diferencia es relativamente pequeña. En estas circunstancias la fibra sin núcleo puede tratarse como una fibra multimodo (MMF) de guía débil con un perfil de índice escalonado. Así, se convierte en la estructura monomodo-multimodo-monomodo (SMS) convencional, pero con un tamaño de núcleo más grande. La estructura que se muestra en la Figura 3 es flexible, relativamente fácil de fabricar y de alta sensibilidad. El primer empalme en la interfaz SMF–NCF actúa como acoplador y divide el haz de entrada. El modo fundamental que se propaga por la SMF al interactuar con la fibra sin núcleo excita tanto los modos de orden superior como el modo fundamental en la fibra sin núcleo, resultando en un conjunto completo de modos guiados [28]. Si la fibra estándar y la fibra sin núcleo están alineadas axialmente en los puntos de empalme, la potencia se acoplará solo a los primeros modos circulares simétricos. Estos modos se propagarán a lo largo de la fibra sin núcleo de longitud L y estarán sujetos al efecto de interferencia multimodal en el segundo punto de empalme. En este punto los modos se reacoplarán a la segunda SMF.

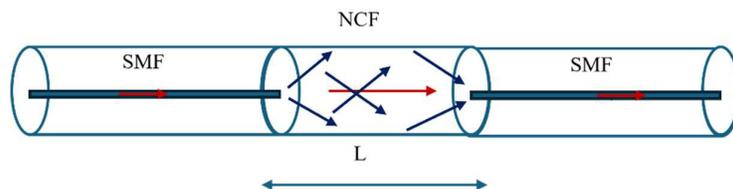


Figura 3 Interferómetro Mach Zehnder en línea todo de fibra.

La función principal del SMS propuesto puede explicarse teniendo en cuenta la teoría general del funcionamiento del principio del interferómetro modal. Asumiendo que dos haces de luz I_1 y I_2 interfieren únicamente, la intensidad resultante del Mach-Zehnder, I estaría dada por la Ec. (2.39)

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.39)$$

donde el término $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$ corresponde con el término de interferencia y δ es la diferencia de fase entre los modos que interactúan. La diferencia de fase ocurre por las diferentes constantes de propagación de cada modo.

$$\delta = \frac{2\pi(\eta_{eff\ 1} - \eta_{eff\ 2})L}{\lambda} \quad (2.40)$$

El $\eta_{eff\ 1}$ es el índice de refracción de los modos de propagación del núcleo y $\eta_{eff\ 2}$ es el índice de refracción de los modos que se propagan por la fibra sin núcleo. L es la longitud de la fibra NCF y λ longitud de onda de la señal en el vacío. Cuando se cumple que

$$\frac{2\pi(\eta_{eff\ 1} - \eta_{eff\ 2})L}{\lambda} = (2m + 1)\pi \quad (2.41)$$

Donde m es un entero y la longitud de onda del pico de atenuación de m -ésimo orden puede escribirse como

$$\lambda_{dip} = \frac{2(\eta_{eff\ 1} - \eta_{eff\ 2})L}{(2m+1)} \quad (2.42)$$

Se puede observar que los cambios en η_{eff} o en la longitud del sensor provocará el desplazamiento de los picos de atenuación de interferencia [29]. Y a partir de la Ec. (2.41), la separación entre dos mínimos de interferencia, rango libre espectral (FSR) por sus siglas en inglés, puede aproximarse como

$$FSR = \frac{\lambda^2}{(\eta_{eff\ 1} - \eta_{eff\ 2})L} \quad (2.43)$$

También es posible plantear como una representación general de la ecuación (2.39) la ecuación:

$$I = I_0[1 + V \cos \delta] \quad (2.44)$$

donde I_0 es la potencia óptica promedio ($I_1 + I_2$), δ es la diferencia de fase entre los dos caminos ópticos y V es la visibilidad o también conocida como contraste de las franjas de interferencia. Está definida por $\frac{I_{m\acute{a}x}-I_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x}+I_{m\acute{i}n}}$ y está dada por $\frac{2\sqrt{I_1I_2}}{I_1+I_2}$ [30]. La visibilidad va a estar determinada por la intensidad de la luz que se propaga por el núcleo y el revestimiento de la fibra. El valor máximo se alcanzará cuando $I_1 = I_2$ [31].

2.9 Sensores de fibras ópticas

En aplicaciones avanzadas en ingeniería civil, salud, transporte y diversas tecnologías industriales, donde la miniaturización, la alta sensibilidad y la medición remota son esenciales, las técnicas de detección basadas en fibra óptica pueden proporcionar soluciones innovadoras. Como resultado, la tecnología de sensores de fibra óptica (OFS) ha emergido como una tecnología poderosa y versátil que se aplica ampliamente en la actualidad[32]. El campo de los sensores ópticos está estrechamente vinculado a las comunicaciones ópticas por lo que se ha beneficiado de los avances en las fibras ópticas y los instrumentos optoelectrónicos. Gracias a la rápida evolución de los sistemas de comunicación por fibra óptica, el costo de los sistemas de sensores de fibra óptica se ha reducido significativamente por lo que se ha ampliado el uso de estos dispositivos en diversas áreas.

Un sensor de fibra óptica es un dispositivo que utiliza la fibra óptica como medio de detección para medir magnitudes físicas, químicas o biológicas y transformarlas en variables que puedan ser manipuladas y cuantificadas. En estos dispositivos un haz de luz se transmite a través de una fibra óptica, y en ciertos puntos a lo largo de su recorrido, las perturbaciones externas pueden influir en las propiedades de la fibra, alterando así las características de la luz, como la amplitud, la polarización, la fase o la frecuencia (longitud de onda). Al medir los cambios en estos parámetros de la luz, es posible determinar la magnitud de la perturbación externa, ya sea tensión, temperatura, presión, o deformación.

Generalmente un sistema de sensor de fibra óptica tal como se muestra en la Figura 4, consta de una fuente óptica que introduce la señal en una fibra óptica, la cual será

modulada en el elemento sensor y detectada posteriormente por un detector óptico para luego ser procesada en la unidad de procesamiento de señal.

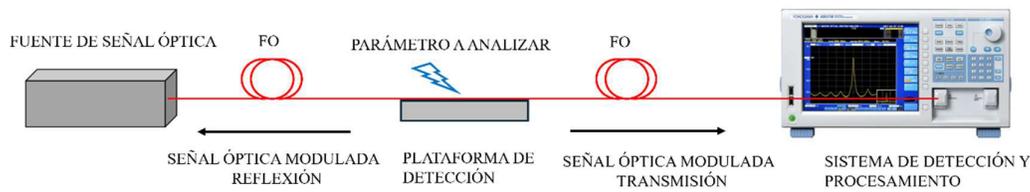


Figura 4 Sistema de sensor de fibra óptica [33].

Como resultado de los avances obtenidos en la investigación, estos dispositivos, se han empleados en diferentes campos tales como la aviación, medicina, salud estructural, industria entre otros. Su alta precisión, peso ligero, resistencia a la corrosión, inmunidad a las interferencias electromagnéticas son algunas ventajas que hacen que estos sensores de fibras sean altamente demandados en diversas aplicaciones[34].

De acuerdo con el principio de funcionamiento los sensores de fibras pueden clasificarse en extrínsecos e intrínsecos.

2.9.1 Sensores extrínsecos

Los sensores de fibra óptica extrínsecos son aquellos en los que la fibra óptica se emplea únicamente para transportar la luz hacia y desde un punto donde se encuentra el elemento sensor. En este caso, el sensor está ubicado fuera de la fibra óptica y generalmente utiliza componentes ópticos en miniatura, diseñados para modificar las propiedades de la luz en respuesta a cambios en el entorno debido a perturbaciones físicas de interés. En esta configuración, una fibra transmite la energía óptica al sensor, luego la luz es modulada y vuelve a acoplarse a través de una segunda fibra que la dirige hacia el detector óptico. El enlace flexible y dieléctrico que proporciona la fibra permite que estos dispositivos puedan emplearse en lugares de difícil acceso. Además, ofrecen una excelente protección de las señales de medición contra el ruido. Tienden a ser más costosos y se utilizan mucho en la industria aeroespacial y automovilística.

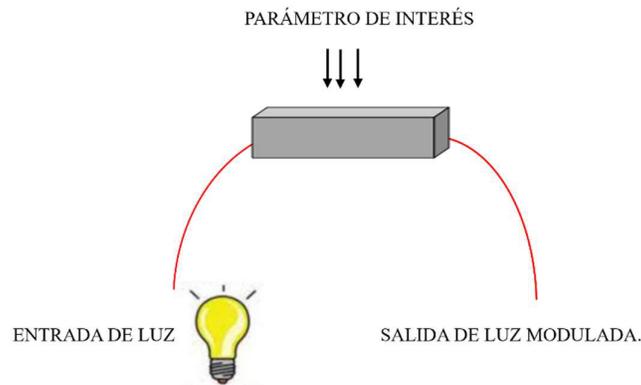


Figura 5 Sensor extrínseco.

2.9.2 Sensores intrínsecos

En un sistema de sensores de fibra óptica donde la modulación se realiza dentro de la fibra óptica mientras la luz es transmitida desde la fuente hasta el detector, se le conoce como sensor intrínseco. Estos sensores emplean directamente la fibra óptica tanto como estructura sensora como medio para transportar la señal óptica con la información del entorno de la perturbación a medir. Funcionan mediante la modulación directa de la luz guiada en la fibra óptica. La luz no escapa de la fibra, excepto en el extremo de detección. Estos sensores pueden utilizar configuraciones interferométricas, rejillas de Bragg en fibra (FBG), rejillas de fibra de período largo (LPFG) o fibras especiales diseñadas para ser sensibles a perturbaciones específicas. La intensidad de la luz es el parámetro más simple de manipular en sensores intrínsecos, ya que solo se requiere una fuente y un detector simples. Estos tipos de sensores de fibra en comparación con los extrínsecos son más atractivos y ampliamente investigados, ya que tienen muchas ventajas tales como su capacidad para detectar la luz, como su naturaleza dentro de la fibra y flexibilidad en el diseño de la estructura sensora de fibra.

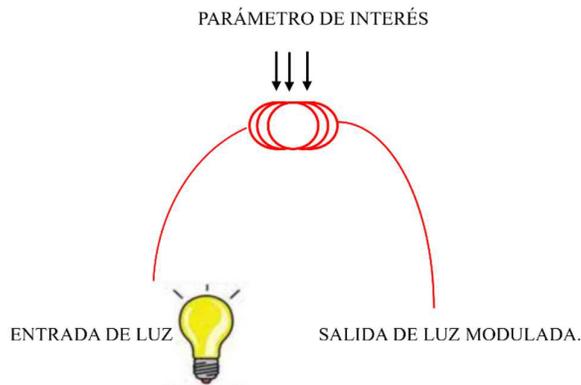


Figura 6 Sensor intrínseco.

2.10 Clasificación de los sensores ópticos

Los sensores de fibras ópticas pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios tales como tipo de modulación que presentan, distribución espacial, tipo de parámetro que mide. El diagrama siguiente resume como se clasifican los sensores de fibras atendiendo a los diferentes criterios de clasificación.

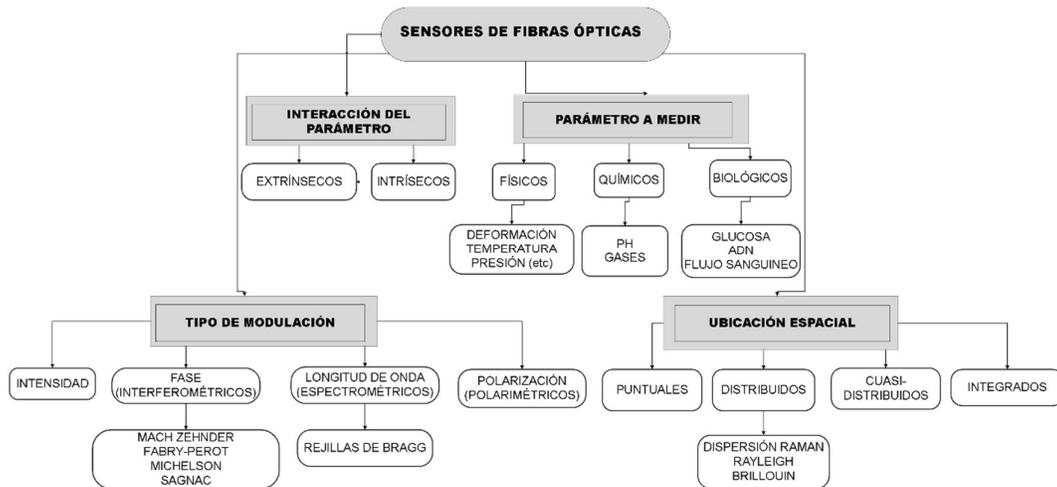


Figura 7 Clasificación de los sensores de fibras ópticas.

De acuerdo con el tipo de modulación estos pueden ser:

- Sensores basados en la modulación de la intensidad o amplitud: El valor de la intensidad de la luz en una fibra óptica varía debido a diferentes mecanismos, como la curvatura y la atenuación, en función de la magnitud a medir. La luz proveniente de una fuente óptica de intensidad constante se envía a través del elemento sensor, el cual modifica la intensidad de la señal lumínica al modular su amplitud (atenuación generada por absorción o dispersión). Este tipo de sensores presenta la ventaja de no requerir una fuente de luz coherente, ya que se mide la variación de la amplitud en lugar de la fase. Otras de las ventajas de estos sensores es su relativa facilidad de fabricación, simplicidad del sistema de detección y procesamiento de señales, y el bajo costo de implementación. Sin embargo, la principal desventaja de esta técnica es que factores como la flexión de la fibra óptica, desajustes de acoplamiento y fluctuaciones en la fuente de alimentación pueden causar atenuación o inestabilidad en la intensidad de la señal, lo que resulta en un sistema sensor menos confiable. Una solución para este problema es utilizar una fracción de la luz de entrada como referencia de intensidad para monitorear las fluctuaciones de la potencia de entrada y realizar la compensación correspondiente [32].
- Sensores basados en la modulación de la longitud de onda (espectrométricos): Estos sensores funcionan detectando cambios en la longitud de onda de la luz que viaja a través de la fibra óptica, resultantes de la variación del parámetro a medir. Los sensores basados en rejillas de Bragg son probablemente los más utilizados en esta categoría. Una de sus principales ventajas es la facilidad de multiplexación en una sola fibra, lo que permite su instalación en grandes estructuras e incluso su incorporación dentro de ellas, facilitando la monitorización de su integridad estructural.
- Sensores basados en la modulación de la fase (Interferométricos): Son sensores que funcionan basados en la diferencia de fase de la luz coherente que viaja por dos trayectorias diferentes, en la misma fibra o en fibras diferentes. Estos sensores suelen considerarse sensores de alta sensibilidad debido a su capacidad para responder a pequeños cambios en las perturbaciones externas. Los interferómetros

de fibra óptica Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot y Sagnac son los sensores más comúnmente empleados.

- Sensores basados en la modulación de la polarización (Polarimétricos): La dirección y evolución del campo eléctrico de la luz determinan su estado de polarización. A medida que la onda de luz se propaga a lo largo de la fibra óptica, su estado de polarización cambia debido a la diferencia en la velocidad de fase de los dos componentes de polarización en una fibra birrefringente. Las propiedades de polarización de la luz en una fibra óptica pueden ser afectadas por la tensión, deformación, presión y temperatura que actúan sobre la fibra. En un sensor polarimétrico de fibra, el cambio en el estado de polarización se mide y se utiliza para recuperar el parámetro de detección.

Según la distribución espacial los sensores pueden clasificarse en

- Sensores puntuales. Son dispositivos que utilizan la fibra óptica para medir parámetros físicos en puntos específicos a lo largo de la fibra. Gracias a la capacidad de multiplexación estos sensores pueden medir varios parámetros, como temperatura, presión, deformación, y más.
- Distribuidos. Proporcionan información espacial y temporal de la medición desde cualquier punto a lo largo de una única fibra con una resolución determinada. Fenómenos como la dispersión Rayleigh, Raman y Brillouin en la fibra son la tecnología base para este tipo de sensores.
- Cuasi distribuidos. Es posible realizar mediciones desde una serie de ubicaciones a través de una única fibra
- Integrados. Proporcionan una medición media de la perturbación a lo largo de la longitud de detección de la fibra.

Atendiendo al parámetro de medición pueden ser

- Sensores físicos. Temperatura, deformación, presión etc.

-
- Sensores químicos. PH, sensores de gas.
 - Biosensores. Flujo sanguíneo, ADN, glucosa.

2.11 Parámetros presentes en las fibras ópticas.

El desarrollo e implementación de los sensores de fibras ópticas se basa en los parámetros presentes en las fibras ópticas. Estos pueden dividirse en los efectos que se emplean para la modulación causada por la influencia de alguna perturbación externa sobre el haz de luz que se propaga y por otro lado los efectos de esparcimiento inelástico de la luz. Las propiedades de la fibra óptica son altamente sensibles a variaciones de temperatura, debido a la expansión térmica y el efecto termo-óptico, y a deformaciones a causa del efecto elasto-óptico. Estos parámetros pueden inducir cambios en la amplitud, fase, polarización.

2.11.1 Expansión térmica y efecto termo-óptico

Los parámetros presentes en las fibras que provocan un cambio en las características de estas al variar la temperatura son la expansión térmica y el efecto termo-óptico.

El primero está relacionado con los cambios de longitud y diámetro que puede experimentar la fibra con variaciones de la temperatura y está definido por la expresión:

$$\Delta L = aL\Delta T \quad (2.45)$$

donde a es el coeficiente de expansión lineal térmico, L es la longitud de la fibra y ΔT es la variación de la temperatura.

El efecto termo-óptico está relacionado con los cambios en el índice de refracción efectivo de la fibra al variar la temperatura y la expresión que lo describe es:

$$\Delta n_{eff} = \Upsilon n_{eff} \Delta T \quad (2.46)$$

donde Υ es el coeficiente termo-óptico [34].

2.11.2 Efecto elasto-óptico

El efecto foto elástico es el fenómeno donde las propiedades ópticas de un material cambian en respuesta a la aplicación de un estrés mecánico. Las deformaciones que pueden presentarse en la fibra óptica inducen cambios en el índice de refracción, los cuales se traducen en variaciones de fase de la luz que se propaga.

La dependencia del índice de refracción de la fibra óptica con la temperatura y la deformación puede definirse como sigue [35]:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) p \Delta T + \frac{\delta n}{n} \quad (2.47)$$

donde n es el índice de refracción de la fibra, Δn es la variación del índice de refracción, $\left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) p$ es la derivada parcial de la temperatura, y el término $\frac{\delta n}{n}$ es el cambio en el índice de refracción debido al efecto foto elástico.

Durante el efecto foto elástico, el índice de refracción δn cambia y puede describirse mediante la ecuación que incluye el efecto Pockels p_{ij} (coeficientes de Pockels)

$$\delta n = -\frac{n^2}{2} (p_{11}\varepsilon_1 + p_{21}\varepsilon_2 + p_{12}\varepsilon_z) \quad (2.48)$$

Aquí ε_1 y ε_2 es la deformación relativa en el área de la sección transversal de la fibra, ε_z es la deformación axial:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.49)$$

donde Δl son los cambios en la longitud del segmento l de fibra.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \nu \varepsilon_z \quad (2.50)$$

el valor de ν se refiere a la tasa de Poisson.

Sustituyendo la ecuación (2.50) en la (2.48) se obtiene [36]:

$$\delta n = -\frac{n^3}{2}(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}))\epsilon_z \quad (2.51)$$

2.12 Características estáticas de un sensor

Para el diseño, implementación y optimización de los sensores de fibra óptica en diversas aplicaciones, es fundamental comprender los principales parámetros que los caracterizan. Estos parámetros permiten cuantificar la respuesta del sensor y determinar la idoneidad del dispositivo para una aplicación específica. Entre las características estáticas se incluyen la sensibilidad, la resolución, el rango dinámico espectral y la histéresis.

Sensibilidad. Está definida por la relación entre la señal física de entrada y la señal eléctrica de salida. También puede estar expresada como la derivada de la función de transferencia con respecto a la señal física. En la Figura 6 la sensibilidad del dispositivo está determinada por la pendiente de la curva de calibración. En este ejemplo, para valores del parámetro físico mayores que X_0 , la curva de calibración disminuye su sensibilidad hasta alcanzar un valor límite en la señal de salida.

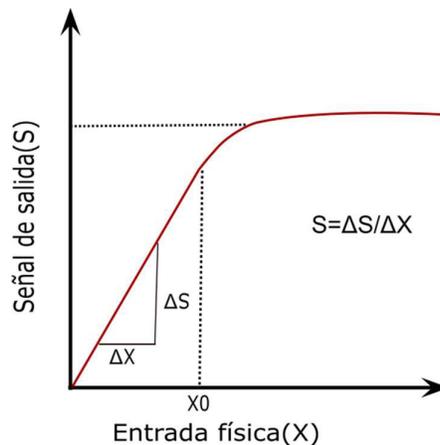


Figura 8 Curva de sensibilidad de un sensor[37].

Resolución: La resolución es la especificación que determina el cambio incremental más pequeño en el parámetro de entrada que puede ser detectado en la señal de salida. Especifica el nivel más fino de detalle que el sensor puede distinguir. Puede expresarse

como una proporción de la lectura actual (o de la lectura a escala completa) o en términos absolutos. Está relacionada con la precisión con que la medición se realiza.

Rango dinámico espectral: El rango de un sensor se refiere al intervalo de valores de la magnitud de entrada que el sensor es capaz de medir, abarcando desde el valor mínimo hasta el valor máximo detectable.

Histéresis: Un sensor debe ser capaz de responder a los cambios del parámetro de entrada sin importar la dirección en que ocurran; la histéresis es la incapacidad del sensor para mostrar los mismos valores de salida para un valor dado del parámetro a medir. Esto se manifiesta como un error en la señal de salida cuando se invierte la dirección de variación de dicho parámetro en la curva de calibración. La Figura 7 muestra la histéresis en un sensor donde el eje x representa la variable de entrada como puede ser el caso de deformación, presión mientras que el eje vertical representa la salida del sensor, como puede ser la señal de voltaje o corriente que genera en respuesta a la entrada. La curva azul es la curva ideal que indica cómo debería ser la salida $F(x)$ en función de la entrada x en ausencia de histéresis. La línea roja con flechas muestra el ciclo de histéresis real del sensor, indicando cómo la salida $F(x)$ varía en función de x durante un ciclo completo de incremento y decremento de la entrada.

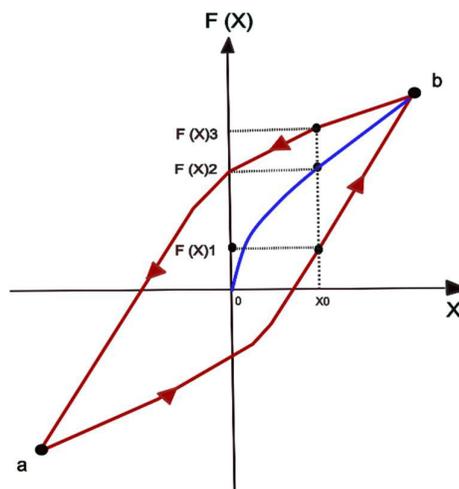


Figura 9 Curva de histéresis de un sensor.

Precisión: Se refiere a la capacidad del sensor para proporcionar mediciones exactas y consistentes. Implica dos aspectos claves:

-
1. Exactitud: La proximidad de las mediciones del sensor al valor real del parámetro medido. Un sensor con alta exactitud dará resultados muy cercanos al valor verdadero.
 2. Repetibilidad: La capacidad del sensor para ofrecer las mismas mediciones bajo las mismas condiciones en repetidas pruebas. Un sensor con alta repetibilidad producirá resultados consistentes en cada medición.

2.13 Ventajas de los sensores de fibras ópticas

Los sensores de fibra óptica comparten todos los beneficios de las fibras ópticas y son excelentes para monitorizar cambios ambientales/externos. Algunas de las ventajas de los sensores de fibra sobre los sensores electrónicos convencionales se enumeran a continuación:

- Ligeros
- Pasivos/baja potencia
- Resistentes a interferencias electromagnéticas
- Alta sensibilidad y ancho de banda
- Robustez medioambiental
- Complementario para telecomunicaciones/optoelectrónica
- Capacidad de multiplexación
- Posibilidad de detección multifuncional
- Fácil integración en una amplia variedad de estructuras
- Robusto, más resistente a entornos adversos

Capítulo 3

Introducción

En este capítulo, se detallan los materiales y dispositivos necesarios para el desarrollo de este proyecto. Además, se describe el proceso de diseño y fabricación de los interferómetros desarrollados. Para ello se emplearon diversas configuraciones y longitudes de fibra sin núcleo FG105LCA y fibra monomodo estándar SMF-28. Durante la fabricación, se empleó una empalmadora Fujikura FS100 y la técnica de empalme por fusión. Resulta de interés mencionar que para obtener de forma precisa segmentos muy pequeños de fibra sin núcleo, se utilizó la cortadora milimétrica CT-04B y un motor de desplazamiento KDC101. Posteriormente, se realizó una caracterización exhaustiva de los dispositivos fabricados, analizando la respuesta espectral para observar la formación de franjas y las variaciones en el rango espectral libre. Luego, se seleccionaron los dispositivos que presentaron los mejores parámetros de visibilidad y rango espectral libre (FSR) para ser probados en la aplicación que se propone en esta investigación.

3.1 Fabricación de los interferómetros.

En el esquema de la Fig. 10 se muestran de forma general los pasos que se tuvieron en cuenta durante el proceso de fabricación de los interferómetros propuestos.

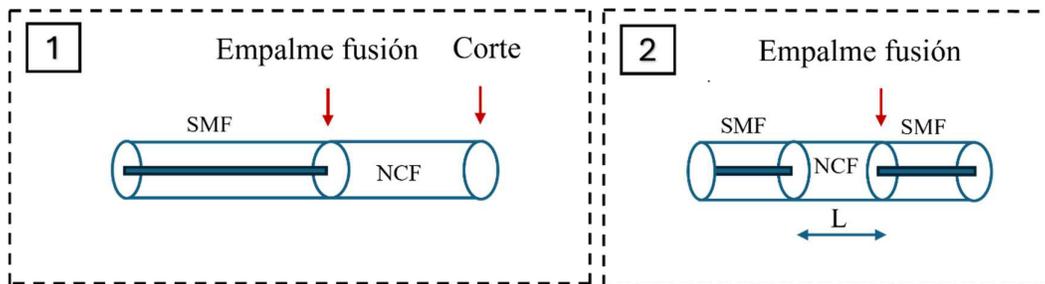


Figura 10 Pasos para la fabricación del MZI.

Primeramente, se fusiona un segmento de longitud L de fibra sin núcleo con un segmento de fibra SMF-28 de diámetro $8.2 \mu\text{m}$ previamente preparado. Luego el extremo de la fibra NCF se empalma con otro segmento de fibra SMF-28 para de esta forma obtener el interferómetro Mach Zehnder con configuración SMF-NCF-SMF.

El esquema que muestra la Figura 11 fue utilizado para la fabricación de los interferómetros propuestos en este trabajo de investigación. Se detallan a continuación las partes que lo integran, así como el procedimiento seguido para la fabricación de estos dispositivos.

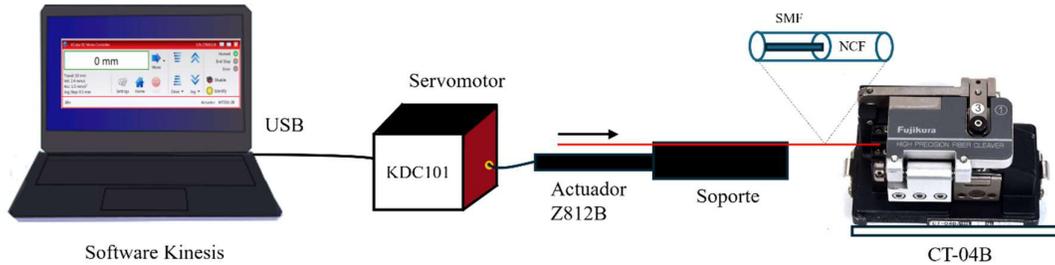


Figura 11 Esquema para la fabricación del MZI.

3.1.1 Software Kinesis

El software Kinesis es un entorno de control avanzado desarrollado por Thorlabs, que proporciona una interfaz de usuario intuitiva para controlar y gestionar el servomotor KDC101. Por medio de este software es posible realizar un ajuste de velocidad, posición, y secuencias de movimiento de forma automatizada como se puede apreciar en la Figura 12. Además, permite la repetición de operaciones consistentes, lo que es fundamental para realizar múltiples cortes con iguales características.

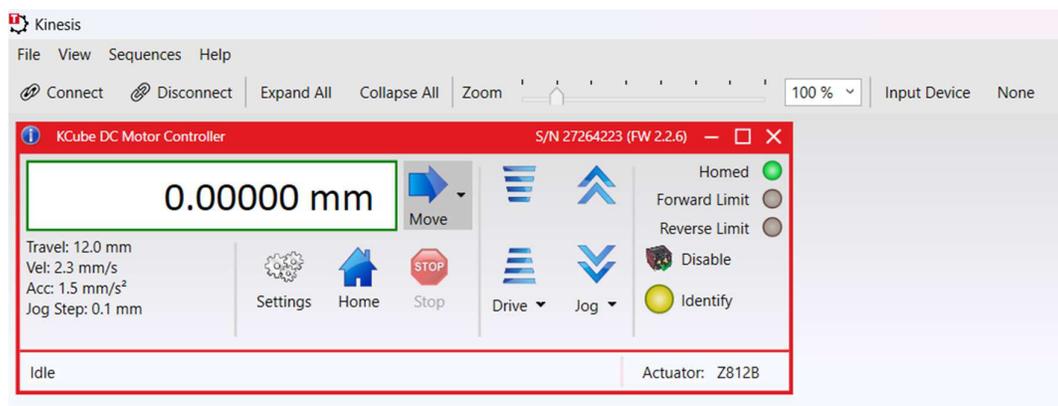


Figura 12 Ventana de configuración del software Kinesis.

Las Figuras 13 y 14 muestran los principales parámetros como unidades de posición, velocidad, tipo de paso y aceleración. En el caso de la Figuras 13 se reflejan los valores y unidades mínimas que se pueden establecer con el software para gestionar el motor KDC101 y la Figura 14 muestra los parámetros específicos que se utilizaron en este trabajo para la fabricación de los interferómetros.

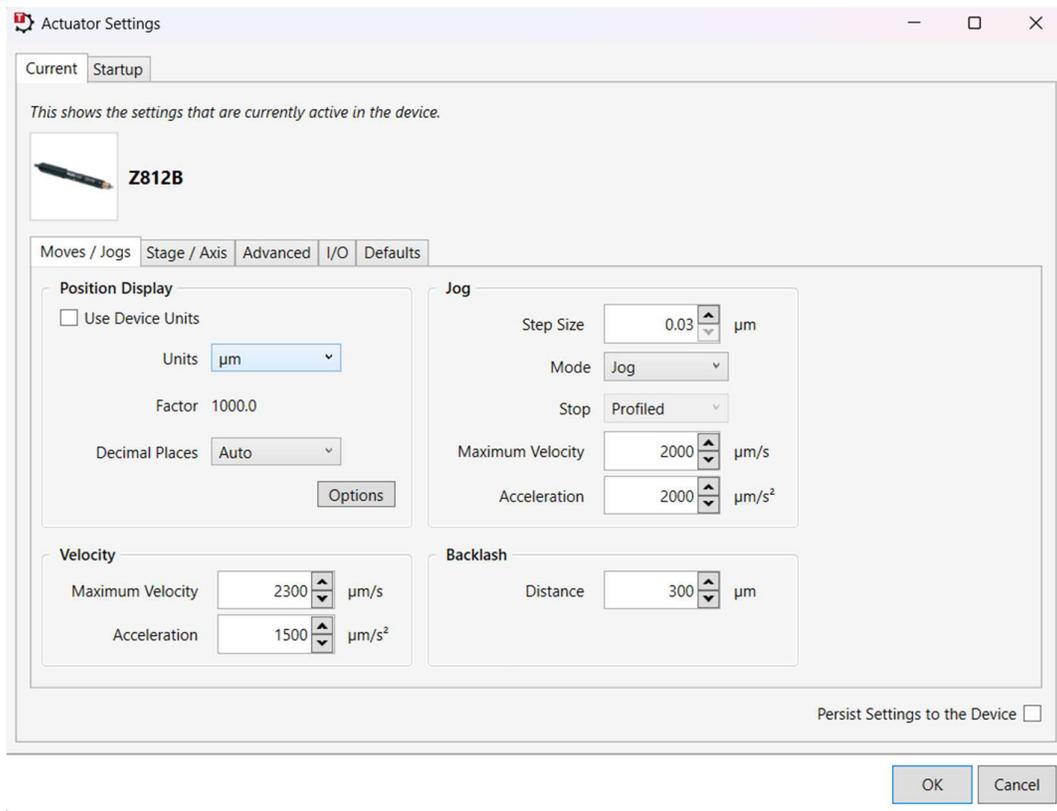


Figura 13 Parámetros de configuración mínimos que se pueden establecer con el software Kinesis.

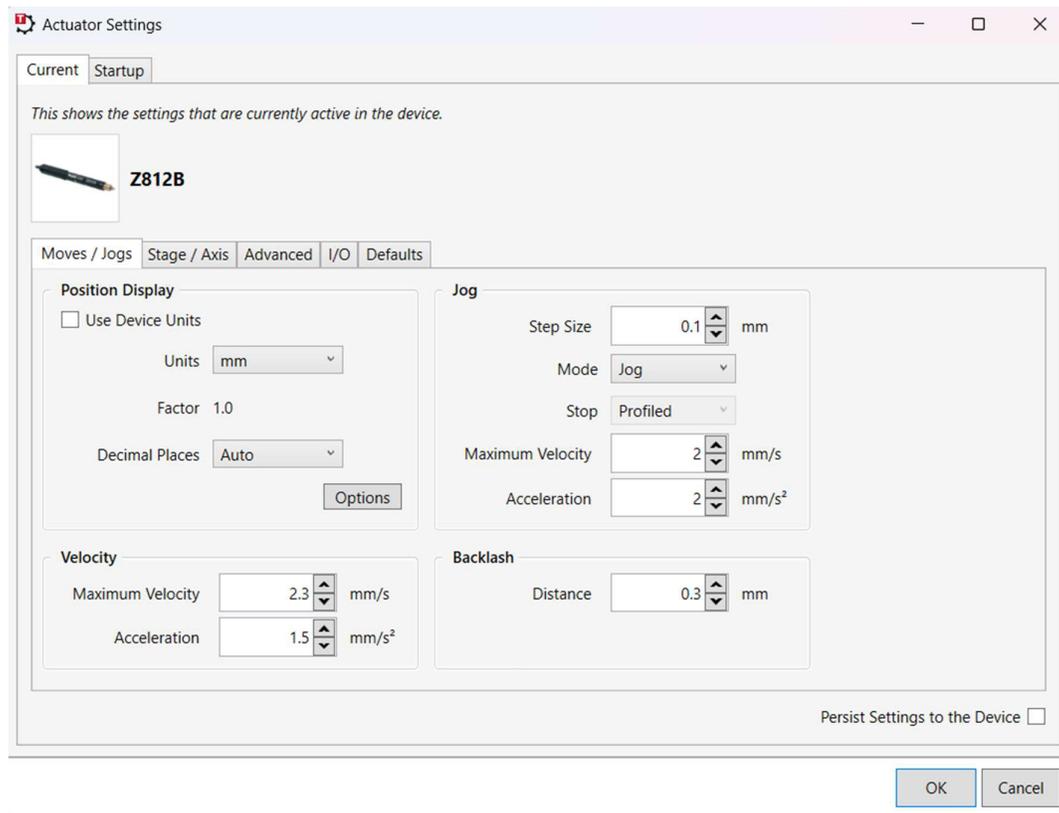


Figura 14 Parámetros específicos establecidos en el software Kinesis durante la fabricación de los interferómetros.

3.1.2 Servomotor KDC101

El cubo KDC101 DC controlador servo motor forma parte de la línea Kinesis® de Thorlabs de controladores de movimiento compactos de gama alta. Diseñado para proporcionar un fácil control manual y automático de servomotores. La unidad ocupa un espacio muy compacto y contiene un interruptor de alimentación situado en la parte frontal que, cuando se apaga, guarda todos los ajustes realizados por el usuario. Para mayor comodidad, el cubo KDC101 incluye un cable USB 3.0 que permite la conectividad a una PC con el software Kinesis previamente instalado. Este software controlara de forma automática y precisa la posición y velocidad de movimiento de la fibra óptica. La resolución de este servomotor es de 0.03micras.

3.1.3 Actuador monitorizado Z812B

Actuador motorizado de alta resolución desarrollado por Thorlabs para su uso en aplicaciones de alta precisión. La longitud máxima de recorrido es de 12,0 mm. Cuenta con topes duros integrados que cortan automáticamente la alimentación cuando alcanzan sus límites mecánicos. Este actuador está conectado a una base de traslación, que proporciona una plataforma estable y resistente para que descansa la fibra. Esta estabilidad es crucial para evitar cualquier movimiento indeseado durante el proceso de corte [38].

3.1.4 Cortadora milimétrica Fujikura CT-04B

La cortadora milimétrica de la marca Fujikura CT-04B está diseñada para cortar fibras ópticas monomodo y multimodo con alta precisión. Cuenta con dos ranuras, una para revestimiento de 250 micras sobre fibra desnuda de 125 micras, y la otra para revestimiento de 900 micras sobre fibra desnuda de 125 micras. Está equipada con una cuchilla afilada y un mecanismo de ajuste que permite realizar cortes en longitudes de micrómetros a milímetros. Utiliza una cuchilla rotativa o de corte por deslizamiento, e incluye un sistema de guía para asegurar un alineamiento exacto de la fibra con la cuchilla. Esta cortadora proporciona empalmes consistentes de menos de 0,5 dB de pérdida y es considerada una unidad robusta y autónoma diseñada para ofrecer cortes fiables y precisos [39].

3.1.5 Empalmadora Fujikura FS100M

La FS100M utiliza un método de fusión por arco eléctrico, donde las fibras se alinean con precisión y luego se fusionan los extremos de las fibras mediante un breve pulso de arco eléctrico que calienta y une las fibras creando una conexión óptica de bajas pérdidas. Para el caso de la fusión de la fibra monomodo SMF 28 y la fibra sin núcleo NCF se usó el programa 13 automático de dicha empalmadora [40].

Parámetros utilizados en la empalmadora Fujikura FS100M

Potencia de arco	STD-334 bit
Duración de arco	3000 ms
Potencia de prefusión	STD-30 bit
Tiempo de prefusión	150 ms

Tabla 3 Parámetros utilizados en la empalmadora Fujikura FS100M para empalmar la fibra sin núcleo FG125LA y la fibra SMF-28.

3.2 Procedimiento para la fabricación

Una vez identificadas las partes del esquema utilizado en la fabricación, se describirá el proceso seguido para obtener un interferómetro Mach-Zehnder completamente de fibra óptica. En este dispositivo la fibra NCF es el componente clave para excitar la interferencia multimodo y está hecha de sílice pura. En comparación con la fibra multimodo normal con núcleo y revestimiento, la NCF es capaz de excitar la onda evanescente con una mayor eficiencia debido a que al no tener revestimiento queda más expuesta al espacio libre, lo que conduce a una mayor sensibilidad.

Primeramente, como parte del proceso de preparación de las fibras se tomó como entrada una sección de fibra estándar (SMF-28, Corning) con un diámetro de núcleo de 8.2 μm , un diámetro de revestimiento de 125 μm y un RI de 1,4682 (a 1550 nm), la cual fue cuidadosamente limpiada y cortada de forma perpendicular. Luego se tomó un segmento de fibra sin núcleo del tipo FG125LA cuyo diámetro del revestimiento es de 125 μm y RI de 1,444 (a 1550 nm), la cual se limpió y se cortó debidamente para ser empalmada junto al segmento de fibra SMF-28. Seguidamente el extremo de la fibra sin núcleo después de limpiarse y prepararse se ubicó en la ranura del soporte cuidando que estuviera correctamente alineada y sujeta firmemente para evitar desplazamientos indeseados durante el proceso de corte. Posteriormente el servomotor KDC101 realizará movimientos en incrementos muy pequeños de acuerdo con los parámetros de velocidad y posición

indicados en el software Kinesis, para de esta forma lograr controlar y ubicar de forma precisa la dimensión exacta de esta fibra sin núcleo en la cortadora milimétrica de alta precisión CT-04B. Ya seguros de que la fibra está correctamente alineada y con la dimensión exacta indicada, se procede al corte. Cabe destacar que se emplearon longitudes muy pequeñas, del orden de micrómetros de fibra NCF. Finalmente, el extremo de salida de la sección NCF se empalmó con otro segmento de fibra SMF-28 tomado como salida. La empalmadora utilizada fue de la marca Fujikura, modelo FS100M, la técnica de empalme por fusión y el programa 13 automático. De esta manera quedó fabricado como se muestra en la Figura 12 a) la estructura monomodo- fibra sin núcleo- monomodo (SNS) empalmando un segmento de fibra sin núcleo entre dos segmentos de fibra estándar. Es importante resaltar que durante el proceso de fabricación se fue checando la potencia con el medidor de potencia con la finalidad de ir compensando las pérdidas al realizar los empalmes.

Además de esta configuración, se realizaron interferómetros colocando en cascadas dos interferómetros como los descritos anteriormente como se muestra en la Figura 12 b) obteniéndose estructuras con una mayor sensibilidad, de la forma SMF-NCF-SMF-NCF-SMF.

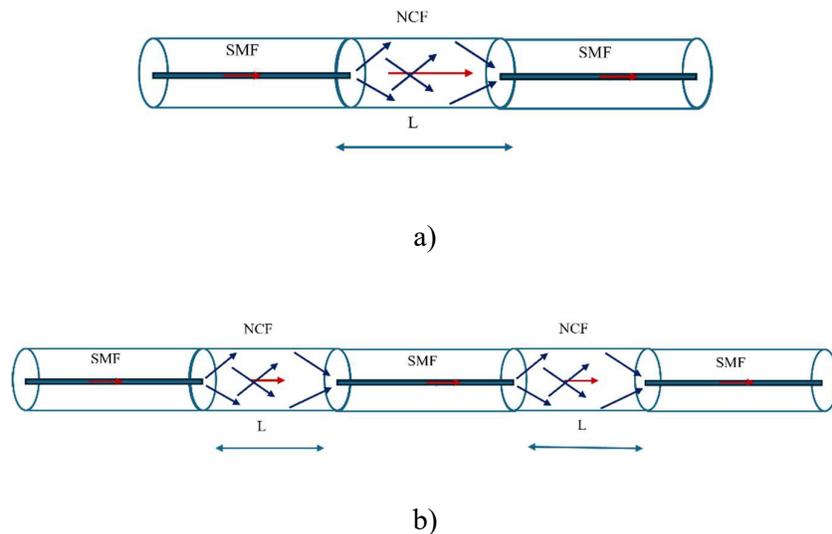


Figura 15 Configuraciones del MZI. a) SNS, b) SNSNS.

3.3 Caracterización de los interferómetros.

Para comprender el esquema utilizado en la caracterización de los interferómetros fabricados es conveniente detallar las características de la fuente de luz empleada, así como del analizador de espectros ópticos.

3.3.1 Fuente de luz de amplio espectro.

La fuente de luz utilizada tanto para caracterizar los interferómetros fabricados como para la aplicación que se investiga es la fuente de amplio espectro de luz supercontinuo. El láser SNP-70F-100 fue empleado como bombeo. Es un láser de fibra de alta potencia y precisión, de la serie Microchip diseñada para una mayor frecuencia de repetición y una duración de 700 ps. Este láser produce pulsos de 1064 nm que se generan directamente a partir del motor de microchip Nd: YAG de conmutación Q pasiva bombeado por diodo. Se considera un láser de gran estabilidad, fiabilidad, eficiencia y tamaño compacto lo cual lo hacen adecuado para una variedad de aplicaciones industriales y de fabricación. La Figura 16 y tabla 4 muestra el láser SNP-70F-100 y especificaciones técnicas del mismo respectivamente.



Figura 16 Láser SNP-70F-100.

Especificaciones técnicas del láser SNP-70F-100

Longitud de onda	1064 nm
Tasa de repetición	>65kHz
Rango del ancho del pulso	> 90mW
Duración del pulso	700 ps
Potencia de salida	>2kW
Perfil del haz	Gaussiano TEM00
Polarización	Lineal PER>20dB

Tabla 4 Especificación técnica del láser SNP-70F-100

El esquema de la Figura 17 fue empleado para caracterizar la fuente de luz utilizada.

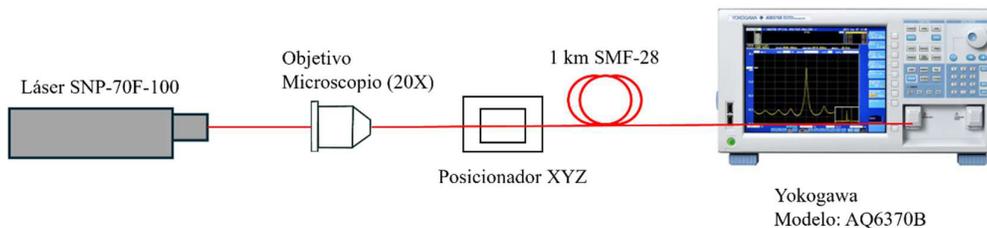


Figura 17 Esquema para caracterizar fuente de luz.

El láser SNP-70F-100 emite pulsos a 1064 nm con una duración de 700 ps y se acopla con un kilómetro de fibra monomodo estándar (SMF28), cuya longitud de onda de operación es de 1260-1600 nm. Esta fibra tiene una longitud de onda de dispersión cero (ZDW) de 1310 nm y se encuentra en el régimen de dispersión normal para una longitud de onda de operación de 1064 nm. Aspectos tales como el ancho del pulso, potencia de bombeo y la dispersión de la velocidad de grupo son factores de entrada (bombeo), que están relacionados con los fenómenos no lineales que se producen en la fibra óptica durante la generación del supercontinuo [41].

Para que el acoplamiento sea correcto y preciso se utiliza una lente de 20 X de objetivo microscópico y un posicionador XYZ para alinear el haz del láser con el eje óptico de la fibra. De esta forma los pulsos de alta intensidad interactúan no linealmente con el material de la fibra y así generan una amplia gama de longitudes de onda a través de la mezcla de frecuencias y otros procesos no lineales. Esto conduce a la formación de un espectro de luz extremadamente amplio que abarca desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, creando un supercontinuo óptico.

La Figura 18 muestra el espectro obtenido del supercontinuo en el rango de los 1400 y 1600 nm con una alta densidad de potencia espectral de alrededor de los 40 dBm. Es posible observar como el espectro se amplía hacia las longitudes de ondas largas debido principalmente a la dispersión Raman. En la parte superior derecha se muestra el espectro completo del supercontinuo en el rango de los 1000 a 1700 nm donde se observa el pulso del láser a los 1064 nm y los efectos no lineales que generan el supercontinuo.

Contar con esta fuente de amplio espectro resulta fundamental para la caracterización de los interferómetros ya que posibilita una mejor observación de las franjas de interferencias que se forman con los interferómetros fabricados.

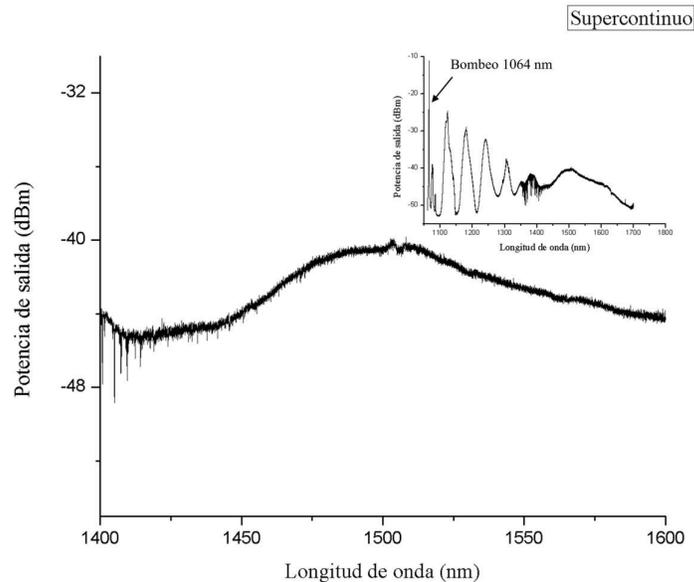


Figura 18 Espectro de luz supercontinuo en los rangos 1000 a 1700 nm y de 1400 a 1600 nm.

3.3.2 Analizador de espectros ópticos (OSA)

Se utilizó el analizador de espectros ópticos YOKOGAWA AQ6370B para la verificación y ajuste del proceso de fabricación de los interferómetros. Además, permitió visualizar las variaciones en la intensidad y longitud de onda dentro del sistema durante el proceso de caracterización de los interferómetros y del arreglo experimental que se propone en esta investigación. El rango de longitud de onda especificado fue de 1300 a 1600 nm, ya que es en este rango donde se apreciarán con mayor claridad el patrón de interferencia sobre la fuente de amplio espectro. La resolución utilizada fue de 0.2 pm.

El siguiente esquema fue implementado para la caracterización de los interferómetros fabricados.

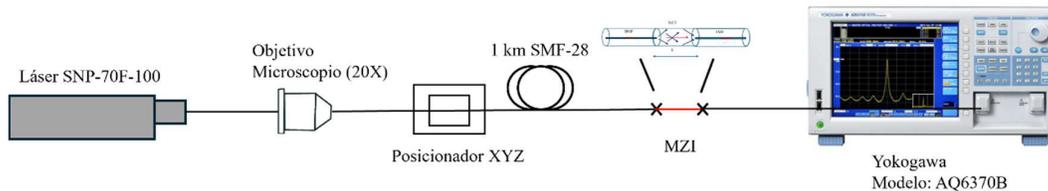


Figura 19 Esquema para caracterizar interferómetros.

Siguiendo los pasos explicados en la sección 3.2 se fabricaron interferómetros con diferentes longitudes del segmento de fibra sin núcleo. A continuación, se muestran los espectros de transmisión y espectro de frecuencia obtenido a través de la transformada rápida de Fourier (FFT) de dos estructuras de la forma SMF-NCF-SMF cuya longitud del segmento de fibra sin núcleo fue de 1cm (Figura. 20) y 2cm (Figura. 21).

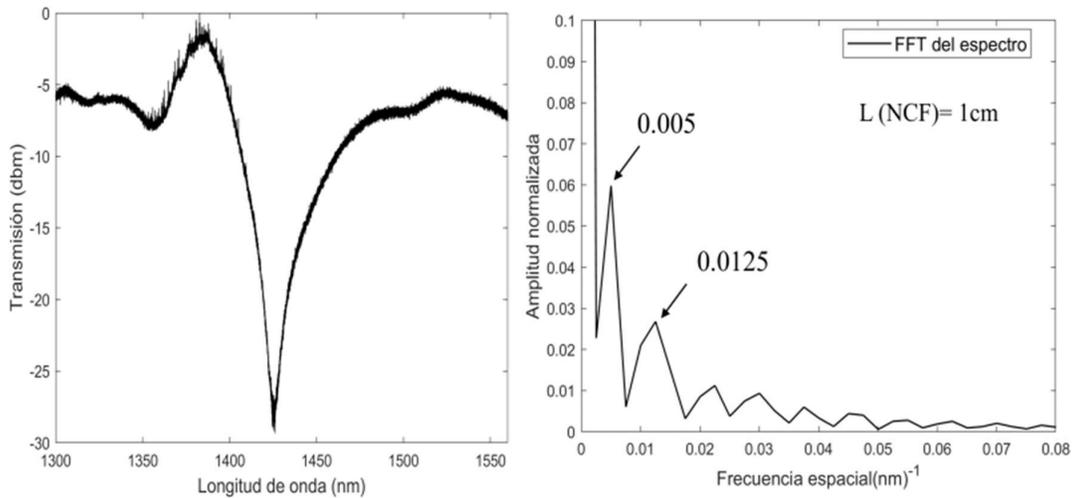


Figura 20 Espectros de transmisión y de frecuencias del interferómetro SMF-NCF-SMF de 1cm de fibra sin núcleo.

La gráfica de la izquierda muestra la transmisión en función de la longitud de onda, en el rango de 1300 a 1550 nm. Se observa un pico de atenuación de 27 dBm ubicado en 1425 nm aproximadamente. Es posible decir que en esa longitud de onda la interferencia es fuertemente destructiva, lo cual está relacionado con la diferencia de fase entre los modos que interfieren.

La gráfica de la derecha presenta la FFT del espectro de transmisión con el objetivo de investigar el número y la distribución de energía de los modos que interfieren. Se muestra la amplitud normalizada de las componentes de frecuencia en función de la frecuencia espacial. Se observa que además del modo fundamental hay dos modos dominantes ubicados en las frecuencias 0.005 y 0.0125 nm⁻¹.

En la Figura 21 se muestra el espectro de transmisión y de frecuencias de un interferómetro fabricado con un segmento de 2 cm de fibra sin núcleo entre dos segmentos de SMF-28. En el patrón de franjas mostrado en la gráfica de la izquierda en el rango de 1400 a 1600 nm se observa la aparición de nuevos picos de atenuación en las longitudes de onda aproximada de 1429 nm, 1491 nm y 1597 nm con una profundidad de 7 dBm, 10 dBm, y 13 dBm respectivamente. Observándose así que al aumentar la longitud del segmento de fibra sin núcleo aparecen nuevos mínimos ya que el (FSR) se reduce y la diferencia de camino óptico se hace mayor.

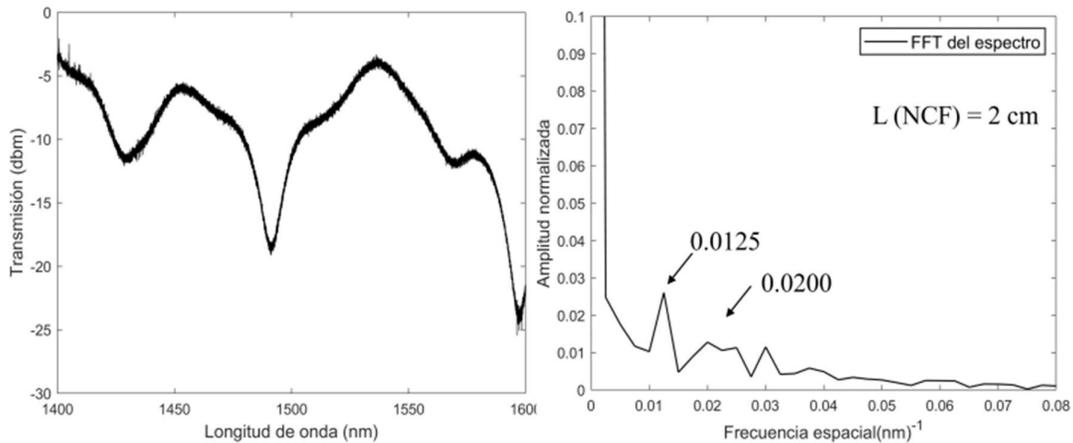


Figura 21 Interferómetro SMF-NCF-SMF de 2 cm de fibra sin núcleo.

Se puede observar en las gráficas correspondientes al espectro de frecuencia tanto para el interferómetro de $L(NCF) = 1\text{ cm}$ como para el de $L(NCF) = 2\text{ cm}$, que al aumentar la longitud del segmento de fibra sin núcleo aumenta la frecuencia de los picos dominantes y a su vez disminuye la amplitud de estos.

En la Figura 22 se muestra una comparación entre los espectros de transmisión y de frecuencias de tres interferómetros fabricados bajo las mismas condiciones descritas en la sección 3.2 pero variando la longitud del segmento de la fibra sin núcleo. El intervalo de la longitud de onda que se analiza es de 1400 a 1600 nm y las longitudes de la fibra sin núcleo fueron 1cm, 2cm, 3cm. Es posible observar que al aumentar la longitud del segmento de fibra sin núcleo aumenta el número de valles, reduciéndose así la separación entre dos valles consecutivos (FSR). Esto se debe a que existen un mayor número de modos de alto orden interactuando. De igual forma en el espectro de frecuencias se aprecia que al aumentar la longitud del segmento de fibra sin núcleo los modos se van desplazando hacia la derecha.

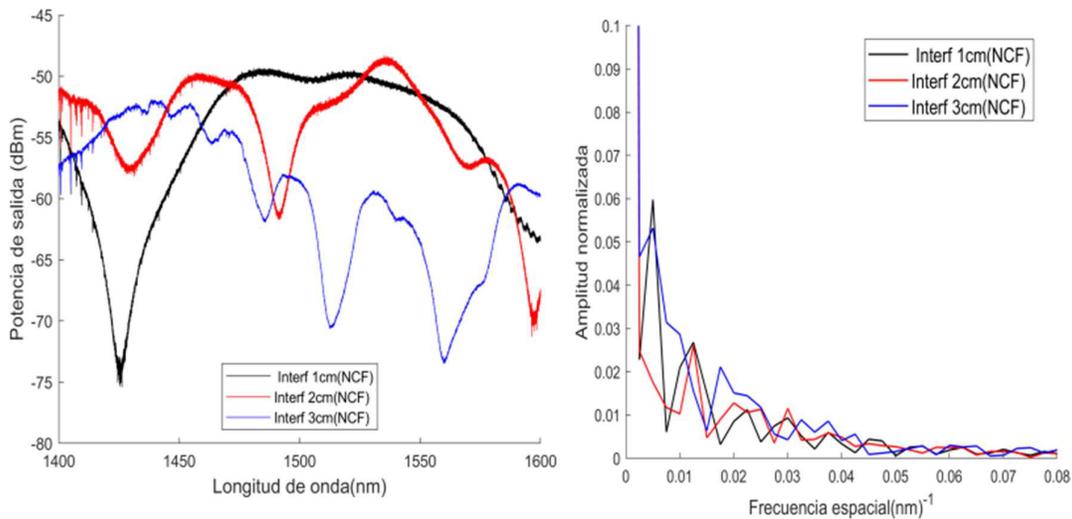


Figura 22 Espectros de transmisión y de frecuencias de tres interferómetros de estructura SMF-NCF-SMF con diferentes longitudes de fibra sin núcleo.

Con el avance en el estudio de las estructuras interferométricas, se han incorporado nuevas configuraciones en diversas aplicaciones. Estas nuevas estructuras conservan las ventajas de facilidad de fabricación y bajo costo característicos de las estructuras SMS convencionales. Además, tienen el potencial de mejorar el rendimiento en las mediciones al ser estructuras mucho más sensibles. Las estructuras que a continuación se presentan (interferómetro en cascada) se logran colocando en serie dos interferómetros de igual longitud del segmento de fibra sin núcleo, y separados por un segmento de fibra estándar. Los segmentos de la fibra sin núcleo son pequeños y juegan un papel importante en el acoplamiento de los modos en dicha estructura, permitiendo la observación de un patrón de interferencia claro. Además, de la incidencia de la longitud de la fibra sin núcleo en la formación de franjas de interferencia, en esta configuración se debe analizar las variaciones que ocurren al cambiar la longitud de fibra SMF-28 que separa los dos interferómetros que la conforman. Con la finalidad de analizar este último aspecto se muestran dos interferómetros dobles de igual longitud de NCF (3 mm) y diferentes dimensiones de SMF-28, 5cm y 10 cm respectivamente. Con estas configuraciones se persigue mejorar los índices de sensibilidad.

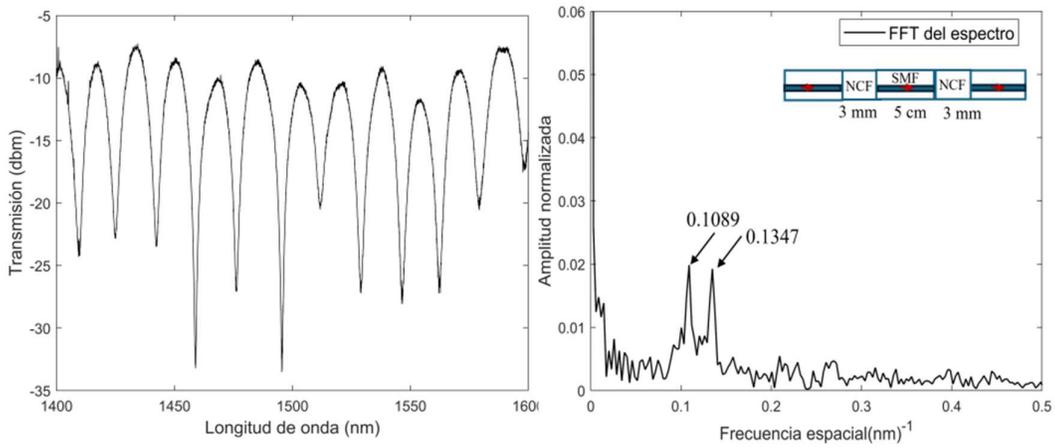


Figura 23 Espectro del interferómetro doble con 3mm de longitud de NCF 5 cm de SMF

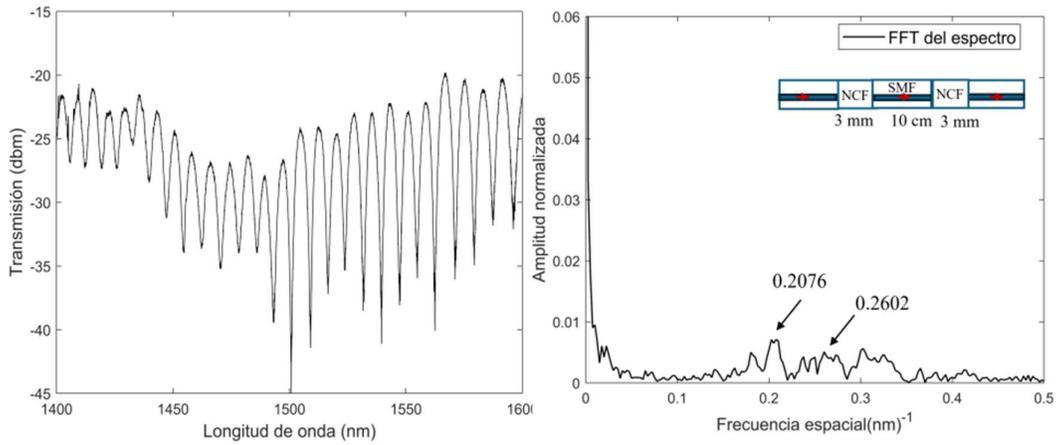


Figura 24 Espectro de transmisión de interferómetro doble con 3mm de longitud de NCF y 10 cm de SMF.

En las Figuras 23 y 24 se puede observar que, al aumentar la separación entre los dos interferómetros colocados en cascadas, en el espectro de transmisión las franjas se hacen más estrechas, ya que el FSR disminuye. También en el espectro de frecuencias se observa como los modos de alto orden se recorren hacia la derecha y disminuyen en amplitud.

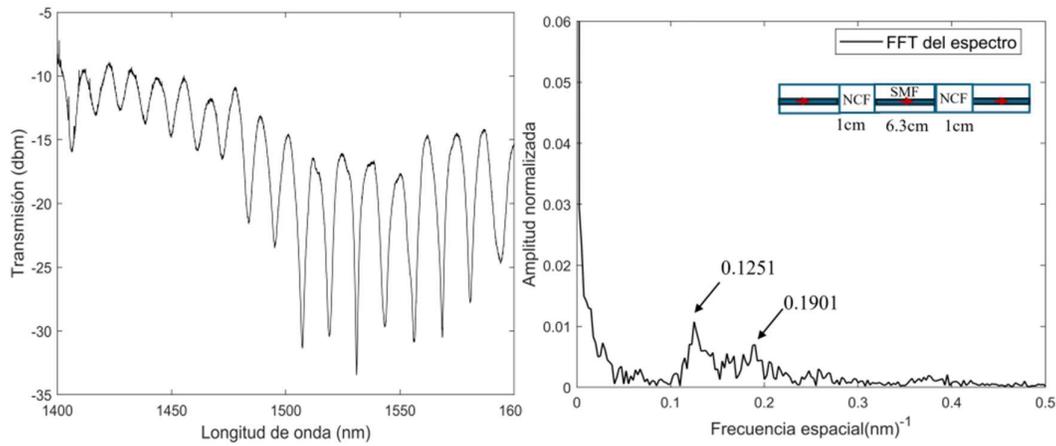


Figura 25 Espectro de frecuencia de interferómetro doble de 1cm NCF- 6.3 cm de longitud de SMF

Las deflexiones observadas en estos patrones de interferencias pueden ser tomadas como punto de medición en el proceso de sensado. Los resultados experimentales muestran que las longitudes de fibra sin núcleo tienen efecto sobre la interferencia multimodo del mismo modo que la fibra sin núcleo con diferente radio hace que la interferencia multimodo cambie. Además, se pudo observar en el caso de los interferómetros dobles de igual longitud de fibra multimodo, que mientras mayor fue la separación entre los interferómetros, mayor número de franjas y menor FSR, lo cual se traduce en dispositivos mucho más sensibles.

3.4 Simulación en Matlab del interferómetro MZI con estructura SNS.

Se realizó la simulación de las estructuras fabricadas (SMF-NCF-SMF) empleando el software de Matlab y el modelo de propagación de la luz basado en ecuaciones de ondas y constantes de propagación de cada sección del interferómetro. Esto con el objetivo de realizar un análisis comparativo de los resultados experimentales obtenidos con los simulados.

Primeramente, se consideran dos señales provenientes de la misma fuente, E_1 y E_2 , las cuales generan el fenómeno de interferencia al combinarse. Estas señales están definidas

por las ecuaciones (3.1) y (3.2), y dependen tanto de la amplitud como de la fase de la señal óptica.

$$E_1 = Ae^{i(\omega t + \delta_1)} \quad (3.1)$$

$$E_2 = Ae^{i(\omega t + \delta_2)} \quad (3.2)$$

donde ω (es la frecuencia angular del campo), t (el tiempo) siendo iguales para ambas señales, mientras que δ_1 y δ_2 son las fases de las señales.

La potencia de salida está dada por la magnitud del campo resultante al cuadrado.

$$P_{(salida)} = |E_{(salida)}|^2 \quad (3.3)$$

Se utilizaron como señal de entrada del programa desarrollado los datos espectrales del supercontinuo medido por el Analizador de Espectro Óptico (OSA). A partir de estos datos, se realizó la simulación considerando la constante de propagación β para cada sección de la fibra. Este parámetro está vinculado tanto al índice de refracción efectivo del modo de propagación dentro de la fibra como a la longitud de onda de la luz. Para cada longitud de onda de la fuente de entrada, se calculan las respectivas constantes de propagación en la fibra monomodo y en la fibra sin núcleo.

$$\beta_{SMF} = kn_{SMF} \quad (3.4)$$

$$\beta_{NCF} = kn_{NCF} \quad (3.5)$$

donde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el vector de onda y n_{SMF} , n_{NCF} son los índices de refracción en la fibra SMF-28 y fibras sin núcleo respectivamente[42]. Los índices de refracción utilizados en la simulación para la fibra monomodo y la fibra sin núcleo fueron 1.4682 y 1.444, respectivamente, ambos evaluados a una longitud de onda de 1550 nm [43]. Estos valores reflejan la capacidad de cada fibra para guiar la luz en dicha longitud de onda, siendo clave para determinar las propiedades de propagación y la interferencia en el sistema. Es importante destacar que, se seleccionaron estos índices de refracción para todas las longitudes de onda de las señales con el objetivo de reducir los tiempos de cómputo.

La diferencia de fase entre las dos señales que interfieren está dada por la siguiente ecuación

$$\Delta\delta_{1,2} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{SMF} - n_{NCF})L \quad (3.6)$$

donde L es la longitud del segmento que se analiza. Se tomó consideró la fibra SMF-28 a la salida de $1m$ y la longitud del segmento de fibra sin núcleo de $0.01 m$.

Posteriormente se modela la propagación de la luz a través de cada segmento de fibra utilizando las soluciones de onda en términos de fase acumulada a lo largo de la longitud de la fibra del segmento que se analiza. En la fibra sin núcleo, se considera la interferencia generada por la diferencia de fases entre las dos señales al pasar de una fibra monomodo a la fibra NCF. La interferencia final entre las señales se obtiene sumando las contribuciones de ambas ramas y calculando la potencia de salida empleando la ecuación (3.3).

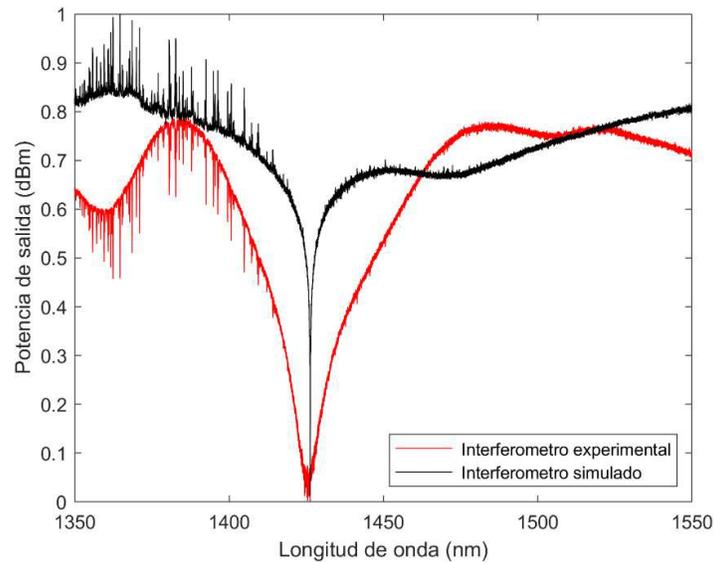


Figura 26 Espectro de salida del interferómetro de 1cm NCF experimental y simulado.

En la Figura 26 se observan los espectros de salida del interferómetro con la estructura (SMF-NCF-SMF) de 1 cm de longitud de NCF obtenidos experimentalmente y mediante simulación en Matlab. Se observa en ambas gráficas que el pico de atenuación tiene una profundidad similar además de coincidir en los 1425 nm. Las diferencias pueden estar

dadas a que la simulación se considera un proceso ideal donde se asume que no hay pérdidas en la propagación de la señal dentro de la fibra. Sin embargo, en la parte experimental, existen pérdidas debidas a la absorción en la fibra, los empalmes, y posibles imperfecciones en la fibra sin núcleo. Además, quiero recordar que para la simulación se consideró un índice de refracción efectivo para la fibra monomodo y uno para la fibra sin núcleo para todas las longitudes de ondas presente en nuestra señal, lo cual en la parte experimental no es así, ya que el índice de refracción cambia para cada longitud de onda durante la propagación de la señal en la fibra óptica, lo cual puede considerarse como un área futura para profundizar el trabajo al poder encontrar un vector de índices utilizando la ecuación de Sellmeier.

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j * \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \quad (3.7)$$

En el próximo capítulo se realizarán las pruebas empleando alguno de estos interferómetros con el objetivo de validar los dispositivos fabricados como sensores de deformación en vigas metálicas.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la implementación de alguno de los interferómetros fabricados como sensores de deformación en una viga metálica sometida a diferentes condiciones de carga. Se analizan las respuestas ópticas de los interferómetros ante la aplicación de fuerzas a través de una prensa hidráulica, así como las correlaciones entre la señal óptica y las deformaciones experimentadas por la viga. Los resultados permiten evaluar la sensibilidad y precisión de los sensores desarrollados, proporcionando información clave sobre su viabilidad para aplicaciones en monitoreo estructural.

4.1 Esquema experimental del sensor de deformación.

El esquema que se muestra en la Figura 27 es el sistema experimental diseñado para medir deformaciones en una viga metálica utilizando uno de los interferómetros Mach-Zehnder fabricados en este proyecto. En una prensa hidráulica se coloca primeramente un perfil tubular rectangular (PTR) de calibre 14, cuyas dimensiones son 39.5 cm y en un segundo momento otro PTR de igual calibre, pero de menor longitud, 19.8 cm de largo. En ambos casos las vigas son apoyadas libremente en dos bases separadas a una distancia de 19.5 cm una de la otra. Luego se fija el elemento sensor en la parte interna de la viga procurando que se encuentre en el centro donde acciona el cilindro que ejerce presión a la viga. Un extremo del interferómetro se empalma a la fuente de luz supercontinuo con un rango de longitud de onda de 1300 a 1650 nm y el otro extremo al analizador de espectros ópticos cuya resolución de medición fue de 0.2 pm. El haz incidente procedente de la fuente de luz de amplio espectro entra en el dispositivo y la salida espectral generada se dirige al OSA.

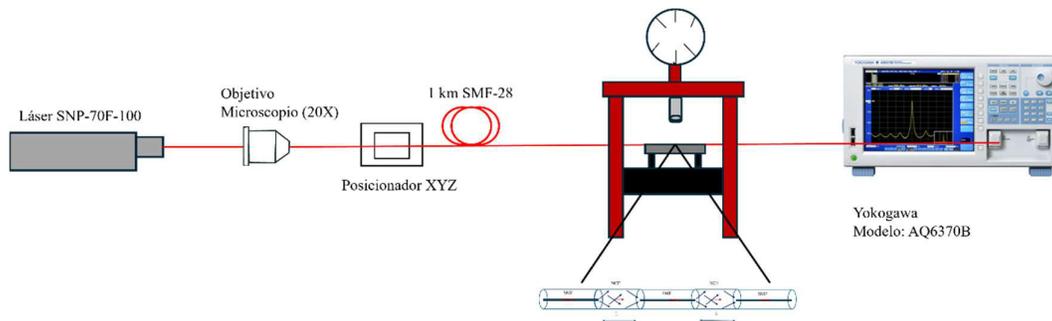


Figura 27 Esquema experimental para la detección de deformación en una viga metálica.

4.1.1 Perfil tubular Rectangular (PTR)

Es conveniente partir del concepto de vigas, las cuales son elementos estructurales sometidos a cargas laterales, donde las fuerzas o momentos tienen sus vectores perpendiculares al eje de la barra. El Perfil Tubular Rectangular (PTR) es un tipo de viga de acero caracterizado por su sección transversal rectangular o cuadrada y de estructura hueca. Fabricado principalmente de acero, aunque también puede encontrarse en hierro u otras aleaciones. El PTR es conocido por su versatilidad y eficiencia en aplicaciones estructurales y mecánicas. Son resistentes a las condiciones ambientales, humedad y corrosión y tienen la finalidad de regular, distribuir y soportar las cargas de construcción y peso de otros materiales. En la Figura 28 se muestra la sección transversal y la vista tridimensional del PTR empleado en nuestra aplicación. Además, en la tabla 5 se especifican las propiedades de este.

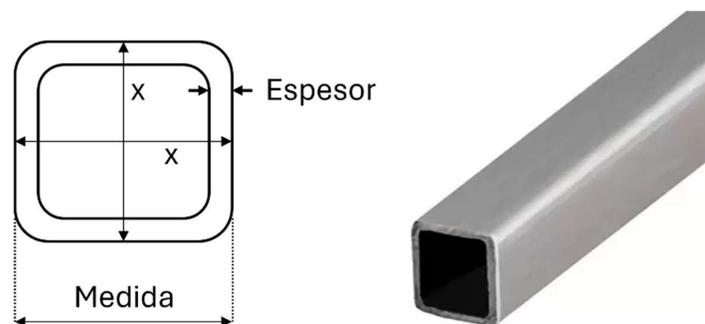


Figura 28 Perfil Tubular Rectangular (PTR) de acero. Sección cuadrada.

Propiedades del Perfil Tubular de sección cuadrada.

Medida	38 x 38 mm
Espesor	1.910 mm
Calibre	14
Peso	2.09 kg/m
Momento de inercia (I)	5.71 cm^4
Módulo de sección (S)	3 cm^3

Tabla 5 Propiedades del PTR.

4.1.2 Prensa hidráulica

La prensa hidráulica de 12 toneladas modelo TY12002 es una herramienta robusta y eficiente, diseñada para aplicar fuerzas de compresión controladas, típicamente utilizada en talleres y aplicaciones industriales. Cuenta con un sistema hidráulico el cual le permite generar grandes cantidades de presión con un esfuerzo físico mínimo, mediante una palanca que controla el pistón de la prensa. La mesa donde se colocan las piezas para ser comprimidas suele ser ajustable en altura, lo que permite manipular diferentes tamaños de objetos con facilidad. Incluye una válvula de liberación para controlar la presión y evitar sobrecargas. En la Figura 29 se muestra la prensa hidráulica utilizada y en la tabla 6 se muestran las especificaciones técnicas de esta.



Figura 29 Prensa hidráulica de 12 TON.

Especificaciones técnicas de prensa hidráulica TY12002.

Capacidad	12 TON
Rango de trabajo vertical	80 mm
Rango de trabajo	0~920 mm
Golpe del pistón	165 mm
Dimensiones de la cama	80 x 500 mm

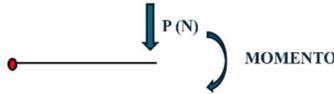
Tabla 6 Especificaciones técnicas de la prensa hidráulica Modelo TY12002.

4.2 Conceptos importantes relacionados con la mecánica de materiales.

Esfuerzo: Es la fuerza por unidad de área, o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada y se representa con la letra griega (σ). Se obtiene al dividir la magnitud P de la carga entre el área A y se expresa en N/m^2 (Pa) [44] No obstante, el pascal es una unidad de esfuerzo muy pequeña, por lo que es común utilizar múltiplos mayores, generalmente el mega Pascal (MPa).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

Momento flector: Es la fuerza que causa una rotación en la viga. Las unidades en las que se puede expresar son $(T * m)$ $(Kg * cm)$



Deformación: Es la variación en la longitud del material o forma de un elemento debido a los esfuerzos aplicados sobre el mismo. Las unidades en las que se puede expresar son m, cm, mm .

Módulo de Young o constante elástica: Es una propiedad particular de cada material que indica la relación entre los esfuerzos aplicados y la deformación pro

Deflexión: Es el desplazamiento transversal de un punto en un cuerpo o estructura en respuesta a una fuerza aplicada, y se mide en la dirección perpendicular a la longitud o al eje principal del cuerpo.

4.3 Modelo matemático para calcular la deflexión en vigas.

Para determinar la deflexión en una viga homogénea de acero PTR calibre 14 de longitud $2L$ cuya sección transversal es cuadrada y se mantiene constante en toda la longitud de la viga. Esta viga se encuentra simplemente apoyada y sometida a una fuerza concentrada P aplicada en el centro mediante una prensa hidráulica. Se utilizará el método de doble integración. Para ello se conoce que la ecuación diferencial elástica que relaciona la deflexión $\delta(x)$ y el momento flector $M(x)$ está dada por:

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (4.1)$$

donde δ representa el desplazamiento en la dirección perpendicular al eje de la viga que ocurre al aplicar la fuerza P , $M(x)$ es el momento flector a lo largo de la viga, I es el momento de inercia de la sección transversal y E módulo de elasticidad del material (acero).

Si se integra una vez respecto a x se obtiene el giro de cada sección de la viga respecto a x .

$$\Theta(x) = \frac{\partial \delta}{\partial x} = \int \frac{M(x)}{EI} dx = f'(x) + c_1 \quad (4.2)$$

Si volvemos a integrar obtenemos una expresión que representa los desplazamientos en cada sección de la viga en función de la posición x que se quiera evaluar.

$$\delta(x) = \int \left(\int \frac{M(x)}{EI} dx \right) dx = \int (f'(x) + c_1) dx = f(x) + c_1 x + c_2 \quad (4.3)$$

De esta forma se obtienen las ecuaciones para el giro y deflexión en cualquier punto de la viga. Las constantes que aparecen al integrar se podrán obtener evaluando las condiciones de fronteras según corresponda [45].

Comencemos con una viga simple AB que soporta una fuerza concentrada P en el punto C, la cual actúa a una distancia L tanto del apoyo izquierdo como del apoyo derecho. Considerando toda la viga como un cuerpo libre, es posible determinar las reacciones de la viga a partir de su equilibrio;

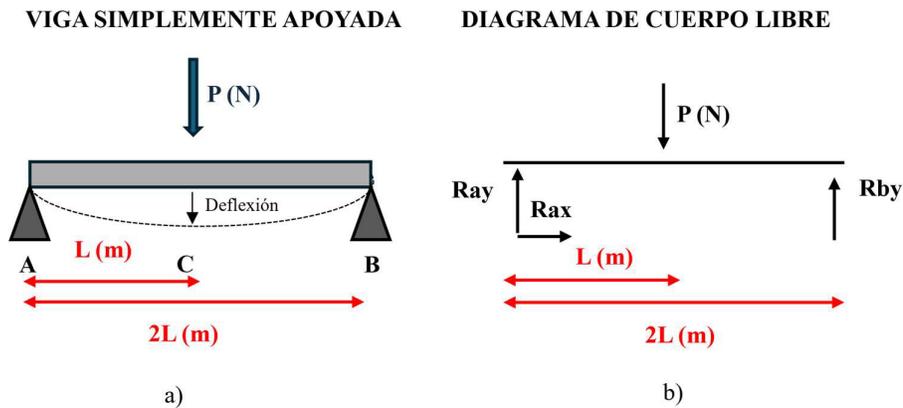


Figura 30 Viga simplemente apoyada sometida a una carga concentrada P en el centro. a) esquema general b) diagrama de cuerpo libre.

Las reacciones en el eje y en los puntos A y B son iguales a la mitad de la fuerza P , ya que la carga está centrada en el medio de la viga que se encuentra simplemente apoyada.

$$R_{Ay} = R_{By} = \frac{P}{2} \quad (4.4)$$

En el punto A al no haber fuerzas horizontales la reacción $R_{Ax} = 0$. Además, esa reacción implicaría una fuerza y las componentes axiales no influyen en la deflexión de la viga. A continuación, se realizará el análisis por secciones donde se encontrarán las expresiones del giro y la deflexión para cada una de ellas.

Sección AC

$$M(x) = \frac{Px}{2} \quad (4.5)$$

Sección CB

$$M(x) = \frac{Px}{2} + P(L - x) \quad (4.6)$$

$$M(x) = PL - \frac{Px}{2} \quad (4.7)$$

Ya conocida la expresión de Momento para cada sección integramos para obtener la ecuación que representa el giro en cada tramo.

Sección AC

$$\Theta_{AC}(x) = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{EI} \int M(x) dx \quad (4.8)$$

$$\Theta_{AC}(x) = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{EI} \int \frac{Px}{2} dx \quad (4.9)$$

$$\Theta_{AC}(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{Px^2}{4} + c_1 \right) \quad (4.10)$$

Integramos el giro $\Theta_{AC}(x)$ para obtener la ecuación de deflexión en esa sección.

$$\delta_{AC}(x) = \int \Theta_{AC}(x) dx \quad (4.11)$$

$$\delta_{AC}(x) = \int \frac{1}{EI} \left(\frac{Px^2}{4} + c_1 \right) dx \quad (4.12)$$

$$\delta_{AC}(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{Px^3}{12} + c_1x + c_2 \right) \quad (4.13)$$

De igual forma se procede para la sección CB

$$\Theta_{CB}(x) = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{EI} \int M(x) dx \quad (4.14)$$

$$\Theta_{CB}(x) = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{EI} \int \left(PL - \frac{Px}{2} \right) dx \quad (4.15)$$

$$\Theta_{CB}(x) = \frac{1}{EI} \left(PLx - \frac{Px^2}{4} + c_3 \right) \quad (4.16)$$

Integrando el giro $\Theta_{CB}(x)$ se obtiene la ecuación de deflexión la sección CB.

$$\delta_{CB}(x) = \int \Theta_{CB}(x) dx \quad (4.17)$$

$$\delta_{CB}(x) = \int \frac{1}{EI} \left(PLx - \frac{Px^2}{4} + c_3 \right) dx \quad (4.18)$$

$$\delta_{CB}(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{PLx^2}{2} - \frac{Px^3}{12} + c_3x + c_4 \right) \quad (4.19)$$

Al haber cuatro constantes se necesitan cuatro condiciones de fronteras para poder calcularlas. Al ser una viga simplemente apoyada el desplazamiento vertical en ambos extremos $x = 0$ y $x = 2L$ es igual a cero.

$$\delta_{AC}(0) = 0 \quad (4.20)$$

$$\delta_{CB}(2L) = 0 \quad (4.21)$$

Además, en la parte central ($x = L$) tanto el giro como la deflexión es el mismo para ambas secciones ya que las funciones son continuas.

$$\Theta_{AC}(L) = \Theta_{CB}(L) \quad (4.22)$$

$$\delta_{AC}(L) = \delta_{CB}(L) \quad (4.23)$$

Tomando la condición de frontera $\delta_{AC}(0) = 0$ y sustituyendo en la ecuación 4.13 se obtiene que $c_2 = 0$. La constante c_4 es posible calcularla a partir de la condición de frontera $\delta_{AC}(L) = \delta_{CB}(L)$ sustituyendo x por L en las ecuaciones 4.13 y 4.19 se obtiene:

$$c_4 = -\frac{PL^3}{3} + (c_1 - c_3)L \quad (4.22)$$

Ahora utilizando la condición de frontera $\Theta_{AC}(L) = \Theta_{CB}(L)$ y sustituyendo x por L en las ecuaciones del giro 4.10 y 4.16 e igualando se obtiene:

$$\frac{1}{EI} \left(\frac{PL^2}{4} + c_1 \right) = \frac{1}{EI} \left(PL^2 - \frac{PL^2}{4} + c_3 \right) \quad (4.24)$$

$$c_1 - c_3 = \frac{PL^2}{2} \quad (4.25)$$

La expresión 4.25 se sustituye en la ecuación 4.22 y se obtiene la expresión para c_4 .

$$c_4 = \frac{PL^3}{6} \quad (4.26)$$

Considerando $\delta_{CB}(2L) = 0$ y sustituyendo x por L en la ecuación 4.19 se tiene que:

$$\frac{1}{EI} \left(\frac{PL^3}{2} - \frac{PL^3}{12} + c_3L + c_4 \right) = 0 \quad (4.27)$$

Sustituyendo c_4 es posible determinar c_3 .

$$c_3 = -3 \frac{PL^2}{4} \quad (4.28)$$

Ya conociendo c_3 y sustituyendo su valor en la ecuación 4.25 es posible encontrar el valor de c_1 .

$$c_1 = \frac{PL^2}{2} - 3 \frac{PL^2}{4} \quad (4.29)$$

$$c_1 = -\frac{PL^2}{4} \quad (4.30)$$

Ya conociendo todas las constantes podemos describir las ecuaciones de la deflexión en cada tramo como sigue:

$$\delta_{AC}(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{Px^3}{12} - \frac{PL^2}{4} x \right) \quad (4.31)$$

$$\delta_{CB}(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{PL^2}{2} - \frac{Px^3}{12} - 3 \frac{PL^2}{4} x + \frac{PL^3}{6} \right) \quad (4.32)$$

Realizando la sustitución y desarrollando una de las dos ecuaciones anteriores tenemos que, para una viga homogénea, de sección transversal constante que se encuentra simplemente apoyada y sometida a una fuerza en el centro de esta la ecuación que define la deflexión máxima en el punto medio de esta es:

$$\delta_{m\acute{a}x} = -\frac{PL^3}{48EI} \quad (4.33)$$

El signo negativo indica que la deflexión es hacia abajo.

4.4 Respuestas de los sensores ante variaciones de deflexión y peso aplicado.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos empleando dos de los interferómetros fabricados. Primeramente, se escoge el interferómetro del tipo SMF-NCF-SMF con longitud de 1cm de la sección de la fibra sin núcleo y se coloca en el interior de la viga del tipo PTR de calibre 14 de longitud de 0.395 m de forma tal que la parte sensora quede justo en la sección donde se colocará la carga. De esta manera será posible la detección de deflexión en la viga metálica sometida a diferentes cargas.

La prueba de la respuesta del dispositivo MZI a la deflexión es implementado dentro del rango de 0 a 3.4×10^{-4} m, y los resultados se registran en la Figura. 30. El desplazamiento espectral con la deflexión se ilustra en la Figura. 30(a), mientras que un

ajuste lineal de la amplitud frente a la deflexión en el rango analizado en la Figura. 30(b). La sensibilidad de deflexión del dispositivo es de 6.9 dbm/mm.

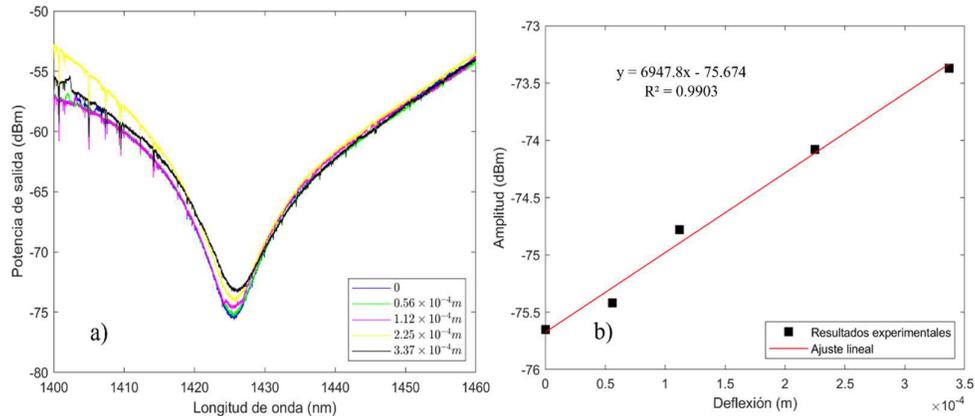


Figura 31 Respuesta del dispositivo MZI a la deformación (a) espectros de transmisión a diferentes deflexiones; (b) desplazamiento de la amplitud en función de la deflexión.

Al incrementar la carga aplicada se genera una fuerza que provoca un desplazamiento perpendicular en la viga (deflexión). El sensor experimenta variaciones de amplitud, así como un pequeño corrimiento en longitud de onda. El sensor es altamente sensible a las deflexiones generadas por las cargas, mostrando un comportamiento lineal predecible. Este tipo de comportamiento lo hace adecuado para aplicaciones de medición de deformación con precisión.

Posteriormente el mismo interferómetro se somete a pesos pequeños del orden de los gramos. Se colocan diferentes pesas de magnitud de 1, 2, 5, 10, 20 y 50g encima de la parte sensible. Los resultados se muestran en la Figura 31 donde se observa un corrimiento hacia la izquierda del pico de atenuación y una disminución de la intensidad a medida que el peso aplicado aumenta.

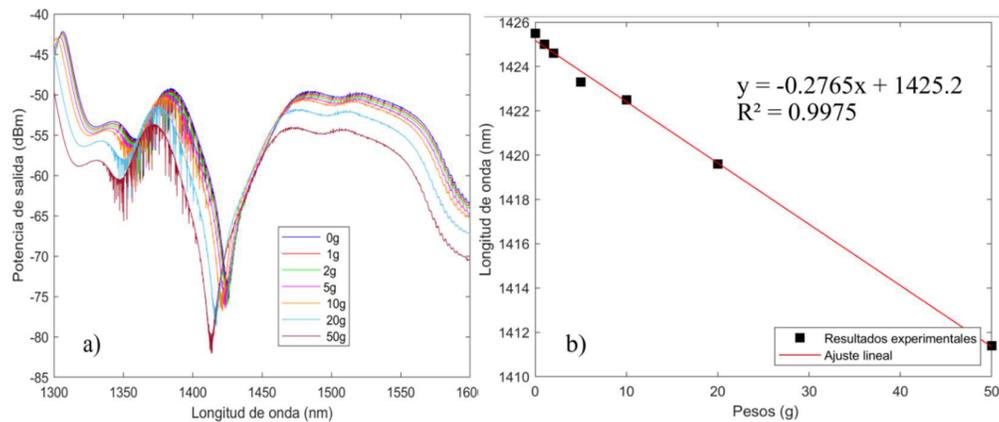


Figura 32 Respuesta del dispositivo MZI al peso (a) espectros de transmisión a diferentes pesos (g); (b) desplazamiento de la longitud de onda en función del peso aplicado.

El otro interferómetro con el cual se realizaron pruebas de deflexión en una viga y de pesos fue de estructura SMF-NCF-SMF-NCF-SMF cuya longitud de la fibra sin núcleo es de 3mm y la longitud del segmento de SMF que las separa es de 5 cm.

La Figura 33 muestra los resultados obtenidos al aplicarle al primer segmento de NCF una carga de magnitud de 1,2,5,10,20 y 50 gramos. El espectro muestra un corrimiento de la longitud de onda hacia la izquierda del pico de atenuación a medida que aumenta la carga. El ajuste lineal muestra una correspondencia uniforme entre la longitud de onda y el peso aplicado. La sensibilidad fue de 0.27 nm/g.

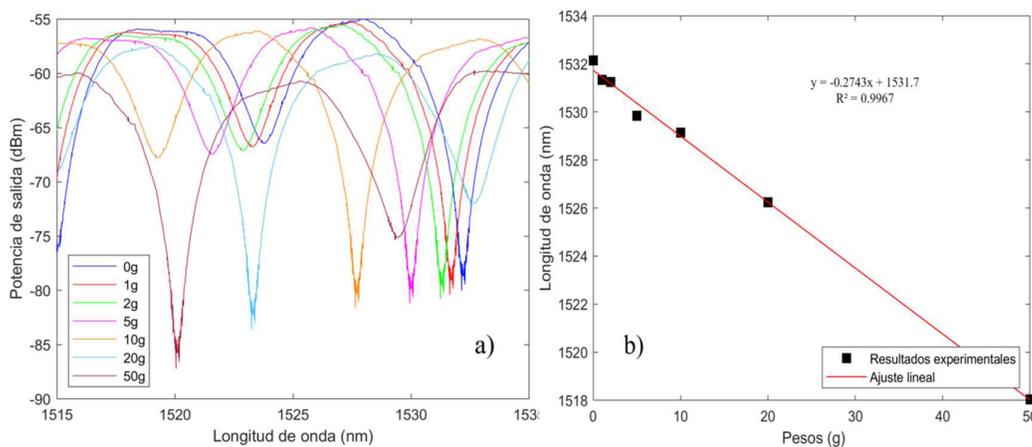


Figura 33 Respuesta del dispositivo MZI al peso (a) espectros de transmisión a diferentes pesos (g); (b) desplazamiento de la longitud de onda en función del peso aplicado.

Conclusiones.

En este trabajo de tesis se realizó el estudio, fabricación y análisis de interferómetros Mach Zehnder todos de fibra, empleando la fibra sin núcleo FG125LA y fibra de comunicaciones. Las estructuras fabricadas fueron de la forma SMF-NCF-SMF y dobles interferómetros colocando en serie dos estructuras como las mencionadas anteriormente. Durante la fabricación de los dispositivos se empleó una plataforma controlada por el software informático Kinesis, lo que hace que el proceso de fabricación sea relativamente sencillo. Se varió la longitud de NCF y la longitud de la fibra SMF-28 que separa los dos interferómetros demostrándose que se obtienen espectros con franjas de diferente FSR y profundidad. De esta forma es posible controlar con precisión la diferencia de camino óptico mediante el diseño de la longitud de la fibra sin núcleo, aumentando así la flexibilidad de funcionamiento del dispositivo. También se obtuvieron patrones de franjas de interferencia con una alta visibilidad. Se realizaron pruebas de deformación en una viga metálica, aplicándole mediante una prensa hidráulica diferentes cargas obteniéndose como resultados espectros que muestran variaciones tanto de amplitud y fase según la carga aplicada, validando de esta forma los interferómetros fabricados como un dispositivo sensor de deformación. Se comprobó la capacidad de estos sensores de detectar deformaciones muy pequeñas no perceptibles en la viga a simple vista.

Referencias

- [1] M. Z. Marković, J. S. Bajić, M. Vrtunski, T. Ninkov, D. D. Vasić, and M. B. Živanov, “Application of fiber-optic curvature sensor in deformation measurement process,” *Measurement (Lond)*, vol. 92, pp. 50–57, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2016.06.001.
- [2] K. Kesavan, K. Ravisankar, S. Parivallal, P. Sreeshylam, and S. Sridhar, “Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete,” *Measurement (Lond)*, vol. 43, no. 2, pp. 157–163, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.measurement.2009.08.010.
- [3] B. Song, Y. Miao, W. Lin, H. Zhang, J. Wu, and B. Liu, “Multi-mode interferometer-based twist sensor with low temperature sensitivity employing square coreless fibers,” *Opt Express*, vol. 21, no. 22, p. 26806, Nov. 2013, doi: 10.1364/oe.21.026806.
- [4] X. W. Ye, Y. H. Su, and P. Sen Xi, “Statistical analysis of stress signals from bridge monitoring by FBG system,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/s18020491.
- [5] X. Sun, S. Ilanko, Y. Mochida, and R. C. Tighe, “A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures,” Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/vibration6040051.
- [6] T. Wu, G. Liu, S. Fu, and F. Xing, “Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure,” Aug. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s20164517.
- [7] N. Sabri, S. A. Aljunid, M. S. Salim, R. B. Ahmad, and R. Kamaruddin, “Toward optical sensors: Review and applications,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, 2013. doi: 10.1088/1742-6596/423/1/012064.
- [8] S. F. Masri, ~ M S Agbabian, A. M. Abdel-Ghaffar, M. Higazy, R. O. Claus, and M. J. De Vries, “Experimental study of embedded fiber-optic strain gauges in concrete structures,” 1994.
- [9] Bhatia Vikram, Murphy Kent A, Claus Richard O, Tran Tuan A, and Greene Jonathan A, “Recent developments in optical-fiber-based extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensing technology,” *Smart Mater Struct*, 1995.

-
- [10] X. Chen *et al.*, “Temperature insensitive bending sensor based on in-line Mach-Zehnder interferometer,” *Photonic Sensors*, vol. 4, no. 3, pp. 193–197, 2014, doi: 10.1007/s13320-013-0156-x.
- [11] P. Lu and Q. Chen, “Asymmetrical fiber machzehnder interferometer for simultaneous measurement of axial strain and temperature,” *IEEE Photonics J*, vol. 2, no. 6, pp. 942–953, 2010, doi: 10.1109/JPHOT.2010.2082513.
- [12] Q. Bian *et al.*, “Temperature and external strain sensing with metal-embedded optical fiber sensors for structural health monitoring,” *Opt Express*, vol. 30, no. 19, p. 33449, Sep. 2022, doi: 10.1364/oe.459459.
- [13] R. Adnan Kadhim, “Strain measurement by using phase modulated fiber optic sensors technology,” 2015.
- [14] E. Cibula and D. Donlagic, “All-fiber Fabry-Perot strain sensor,” in *Second European Workshop on Optical Fibre Sensors*, SPIE, Jun. 2004, p. 180. doi: 10.1117/12.566620.
- [15] Xinyu Meng, Yunqi Liu, and Tingyun Wang, “Temperature-Insensitive Optical Strain Sensor Based on Interlaced Tilted Phase-Shifted Long-Period Fiber Grating,” 2015.
- [16] S. Wang *et al.*, “Ultrasensitive Strain Sensor Based on Mach-Zehnder Interferometer with Bent Structures,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 21, pp. 6958–6967, Nov. 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3109063.
- [17] C. Li *et al.*, “Strain and temperature discrimination using a fiber Bragg grating and multimode interference effects,” *Opt Commun*, vol. 343, pp. 6–9, May 2015, doi: 10.1016/j.optcom.2014.12.066.
- [18] H. J. Yoon, K. Y. Song, J. S. Kim, and D. S. Kim, “Longitudinal strain monitoring of rail using a distributed fiber sensor based on Brillouin optical correlation domain analysis,” *NDT and E International*, vol. 44, no. 7, pp. 637–644, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.07.004.
- [19] B. Täljsten, J. Leighton, W. J. O. Boyle, Y. M. Gebremichael, T. Sun, and K. T. V. Grattan, “Strain Measurement on a Rail Bridge Loaded to Failure Using a Fiber Bragg Grating-Based Distributed Sensor System,” *IEEE Sens J*, vol. 8, no. 12, pp. 2059–2065, 2008, doi: 10.1109/JSEN.2008.2006704.
- [20] W. H. PNG *et al.*, “Feasibility use of in-line Mach–Zehnder interferometer optical fibre sensor in lightweight foamed concrete structural beam on curvature sensing and crack monitoring,” *Struct Health Monit*, vol. 17, no. 5, pp. 1277–1288, Sep. 2018, doi: 10.1177/1475921718792108.

-
- [21] J. Zhou *et al.*, “Simultaneous measurement of strain and temperature by employing fiber Mach-Zehnder interferometer,” *Opt Express*, vol. 22, no. 2, p. 1680, Jan. 2014, doi: 10.1364/oe.22.001680.
- [22] P. Agrawal, “Fiber-optic communication systems Fourth Edition.”
- [23] Y. Li, Z. Liu, and S. Jian, “Multimode interference refractive index sensor based on coreless fiber,” *Photonic Sensors*, vol. 4, no. 1, pp. 21–27, Mar. 2014, doi: 10.1007/s13320-013-0137-0.
- [24] Eugene. Hecht, *Optics*. Pearson, 2017.
- [25] M. Bianchetti *et al.*, “Symmetric and Asymmetric Core-Offset Mach-Zehnder Interferometer Torsion Sensors,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 18, pp. 1521–1524, Sep. 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2735298.
- [26] T. Zhu, D. Wu, M. Liu, and D. W. Duan, “In-line fiber optic interferometric sensors in single-mode fibers,” Aug. 2012. doi: 10.3390/s120810430.
- [27] N. M. Razali, M. Q. Lokman, S. N. F. Zuikafly, F. Ahmad, and H. Yahaya, “Simulation of Self-Image Interference in Single Mode-No-Core-Single Mode Fiber with COMSOL Multiphysics,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2411/1/012019.
- [28] X. Lian, Q. Wu, G. Farrell, and Y. Semenova, “High-sensitivity temperature sensor based on anti-resonance in high-index polymer-coated optical fiber interferometers,” *Opt Lett*, vol. 45, no. 19, p. 5385, Oct. 2020, doi: 10.1364/ol.403050.
- [29] L. Li *et al.*, “All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications References and links ‘Sandwiched long-period gratings for simultaneous measurement of refractive index and temperature,’ IEEE Photon,” 2005.
- [30] C. K. Kirkendall and A. Dandridge, “Overview of high performance fibre-optic sensing,” Sep. 21, 2004. doi: 10.1088/0022-3727/37/18/R01.
- [31] J. Wang *et al.*, “An All Fiber Mach-Zehnder Interferometer Based on Tapering Core-Offset Joint for Strain Sensing,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 34, no. 1, pp. 11–14, Jan. 2022, doi: 10.1109/LPT.2021.3132663.
- [32] G. Rajan, *OPTICAL FIBER SENSORS Advanced Techniques and Applications*. 2015.
- [33] M. De Fátima and F. Domingues Aymannradwan, “SPRINGER BRIEFS IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING Optical Fiber Sensors for IoT and Smart Devices,” SPRINGER, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-47349-9.

-
- [34] Y. Du, B. Sun, J. Li, and W. Zhang, "Optical Fiber Sensing and Structural Health Monitoring Technology," 2019. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2865-7>.
- [35] A. D. Mekhtiev, A. V. Yurchenko, E. G. Neshina, A. D. Al'kina, and P. S. Madi, "Physical Principles of Developing Pressure Sensors Using Refractive Index Changes in Optical Fiber Microbending," *Russian Physics Journal*, vol. 63, no. 2, pp. 323–331, Jun. 2020, doi: [10.1007/s11182-020-02038-y](https://doi.org/10.1007/s11182-020-02038-y).
- [36] A. M. Hatta, Y. Semenova, Q. Wu, and G. Farrell, "Strain sensor based on a pair of single-mode-multimode-single-mode fiber structures in a ratiometric power measurement scheme," 2010.
- [37] Webster and John G, "SECOND EDITION Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement," 2014.
- [38] THORLABS, "Z8 Series Motorized DC Servo Actuators User Guide."
- [39] Artisan Technology Group, "Fujikura_CT_04B_Datasheet_20204201294".
- [40] FUJIKURA, "fsm100m".
- [41] J. M. Estudillo-Ayala *et al.*, "Supercontinuum generation in standard telecom fiber using picoseconds pulses," in *Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XI*, SPIE, Feb. 2012, p. 82401G. doi: [10.1117/12.907475](https://doi.org/10.1117/12.907475).
- [42] G. Keiser, *Fiber Optic Communications*. Springer Singapore, 2021. doi: [10.1007/978-981-33-4665-9](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4665-9).
- [43] H. Zhang *et al.*, "A Mach-Zehnder Interferometer Based on a No-Core Fiber With In-Fiber Waveguides," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 13, pp. 1084–1087, Jul. 2019, doi: [10.1109/LPT.2019.2918293](https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2918293).
- [44] P. Beer Ferdinand, Johnston E. Russell, T.DeWolf John, and Mazurek David F., *Mecánica de Materiales*, Quinta edición.
- [45] R. C. Hibbeler, *Mecánica de Materiales.*, Sexta edición. PEARSON EDUCACIÓN, 2005. [Online]. Available: www.pearsoneducacion.net