



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*“Detección de vibraciones por medio
de un dispositivo todo de fibra óptica”*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ING. GRECIA CAROLINA DUQUE GIMÉNEZ

DIRECTORES:

Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala

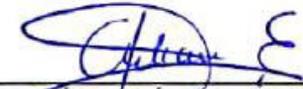
Dr. Daniel Jauregui Vázquez

**M. I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTIN
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES
P R E S E N T E.-**

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) Grecia Carolina Duque Giménez del **Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica (Instrumentación y Sistemas Digitales)** y cuyo número de **NUA** es: 147444 del cual soy director. El título de la tesis es: "*Detección de vibraciones por medio de un dispositivo todo de fibra óptica*"

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE



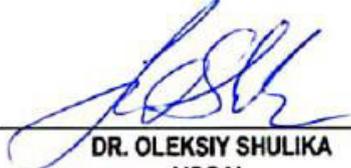
**DR. JULIÁN MOISÉS ESTUDILLO AYALA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO**



**DR. DANIEL JAUREGUI VASQUEZ
DIRECTOR DE TESIS**



**DR. ROBERTO ROJAS LAGUNA
PRESIDENTE**



**DR. OLEKSIY SHULIKA
VOCAL**

Dedicatoria

Dedico esta tesis primero que todo a Dios y la Virgen por darme vida, salud y fortaleza.

A mis amados y queridos padres, Oswaldo Esau Duque Mora y Carolina Lisbeth Giménez Salazar por ser unos padres maravillosos quienes con su amor, cariño, dedicación y paciencia me han acompañado y llevado de la mano en cada paso de mi vida.

A mi esposo y compañero de vida Daniel Fernando Zambrano Gutiérrez, amigo, confidente, colaborador y cómplice por su apoyo, su infinito amor y paciencia, que me ha brindado para alcanzar metas tanto profesionales como personales por estar a mi lado y darme ánimo en todo momento.

A mis suegros Fernando Zambrano y Betty Gutiérrez por su apoyo confianza y cariño.

A mi Tita, Doris Elena Salazar Toledo, por estar cuidándome desde el cielo.

Los quiero mucho.

Grecia Carolina Duque Giménez

Agradecimientos

A mis directores de Tesis:

Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala, por todo su apoyo, comprensión, paciencia, consejos y por toda su enseñanza durante este proceso creativo.

Dr. Daniel Jauregui Vázquez y a su esposa Samira Vázquez Villanueva, por confiar en mí, por sus enseñanzas para desarrollarme profesionalmente, por orientarme y haberme brindado sus conocimientos, además de su apoyo en todo momento.

Al Dr. David Camarena Martínez, por su amistad, ayuda, confianza y oportunidad brindada.

Al Dr. Jesús Joaquín Yáñez Borjas, por su amistad, gran apoyo, ayuda y por todos sus consejos.

Al Dr. Juan Gabriel Aviña y a su esposa Paula Dalida Bravo por su cariño, calidez y apoyo incondicional.

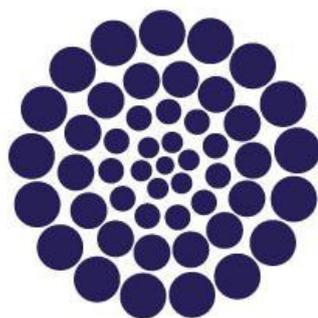
A M.I. Reyna Cristina Pernía Pérez, por brindarme su apoyo y amistad.

Grecia Carolina Duque Giménez

Agradecimientos Institucionales



Expreso mi más sincera gratitud hacia la Universidad de Guanajuato, especialmente a la división de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca (DICIS) por el apoyo y la formación que he recibido y al Proyecto DAIP CIIC 2022, 210/2022.



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo recibido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, CONACYT, beca con número de apoyo: 759325 y CVU 1046007. Además, del Proyecto CONACYT CB 2017-2018 A1-S-33363.



A mis Alma Mater, la Universidad Nacional Experimental del Táchira,



Universidad Nacional Abierta

y la Universidad Nacional Abierta, base de mi formación académica.

Grecia Carolina Duque Giménez

Resumen

Este trabajo presenta la fabricación y aplicación de un dispositivo de interferencia de fibra óptica para la detección de vibraciones. El dispositivo se fabricó empalmando fibras ópticas con diferentes dimensiones de núcleo. Utilizando la estructura final de la fibra óptica es posible detectar la vibración. El sistema consta de un led rojo como fuente de luz (rojo en el visible, 625 nm), la estructura de fibra óptica como dispositivo sensible y un fotodetector. Las pérdidas de transmisión son sensibles a las vibraciones cuando la estructura de fibra óptica se coloca sobre una cantilever o viga en voladizo. Los resultados muestran que se pueden detectar frecuencias desde 20Hz hasta 50Hz. Además, el análisis indica que el sensor del interferómetro multimodo (MMI) es un dispositivo de bajo costo que puede aplicarse a la supervisión de estructuras civiles y transformadores eléctricos; en este caso, es necesario supervisar las bajas frecuencias con gran precisión.

Abstract

This work presents the fabrication and application of a multimode fiber optic interference device for vibration detection. The device is fabricated by splicing optical fibers with different core dimensions. Using the final optical fiber structure is possible to detect vibration. The system consists of a red led as a light source (red in the visible, 625nm), the fiber-optic structure as a sensitive device, and one photodetector. The transmission losses are sensitive to vibration when the optical fiber structure is set over a cantilever beam. The results show that frequencies can be detected from 20Hz to 50Hz. Furthermore, the analysis indicates that the multimode interferometer (MMI) sensor is a low-cost device that can be applied for monitoring civil structures and electrical transformers; here, low frequencies need to be monitored with high precision.

Índice general

Resumen.....	vii
Abstract	viii
Índice general.....	ix
Índice de figuras.....	xii
Índice de tablas.....	xv
Índice de símbolos	xvi
Glosario.....	xviii
Capítulo 1.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. Planteamiento general del problema.....	5
Referencias.....	7
Capítulo 2.....	10
Marco teórico	10
2.1. Introducción.....	10
2.2. Fibras ópticas.....	10
2.3. Modos en una fibra óptica de índice escalonado	13
2.4. Fibra óptica monomodo	16
2.5. Fibra óptica multimodo	17

2.6.	Interferencia multimodal (MMI).....	18
2.7.	Autoimagen en guías de onda	20
2.8.	Sensor óptico.....	25
2.9.	Características estáticas de un sensor	26
2.9.1.	Sensibilidad.....	26
2.9.2.	Resolución	27
2.9.3.	Histéresis	28
2.10.	Parámetros del sistema	29
2.11.	Frecuencia Natural.....	29
	Referencias.....	39
	Capítulo 3.....	42
	Metodología.....	42
3.1.	Introducción.....	42
3.2.	Configuración experimental.....	43
3.2.1.	Elementos de la configuración experimental	44
3.2.2.	LED.....	44
3.2.3.	Analizador de espectro óptico (OSA).....	46
3.2.4.	Fotodetector	47
3.3.	Fabricación de MMI	48
3.4.	Perfiles de distribución.....	51
3.5.	Sensor de vibración.....	52
3.6.	Modelo matemático de un cantilever	53
	Referencias.....	59
	Capítulo 4.....	60
	Resultados.....	60

4.1.	Introducción.....	60
4.2.	Sensor de curvatura.....	61
4.3.	Configuración experimental del sensor de curvatura.....	63
4.4.	Configuración experimental del sensor de vibración.....	66
4.4.1.	Filtro multimodal MMI de 1.5 cm.....	67
4.4.2.	Filtro multimodal MMI de 2.5 cm.....	69
4.4.3.	Filtro multimodal MMI de 3.5 cm.....	72
4.5.	Respuesta de temperatura del sensor.....	74
4.6.	Pruebas del cantilever.....	75
Capítulo 5.....		81
Conclusiones.....		81

Índice de figuras

Figura 2.1	Diagrama de la vista frontal de una fibra óptica convencional y representación del perfil escalonado.....	12
Figura 2.2	Diagrama de la vista transversal de una fibra óptica convencional.....	12
Figura 2.3	Dispositivo de fibra MMI.....	19
Figura 2.4	Esquema de un dispositivo MMI integrado.....	20
Figura 2.5	Curvas de error ideal y de sensibilidad.....	26
Figura 2.6	Respuesta de la curva de histéresis.....	27
Figura 2.7	Circuito LC serie.....	28
Figura 2.8	Circuito LC serie en el dominio del tiempo.....	29
Figura 2.9	Circuito LC serie en el dominio de la frecuencia mediante la transformada de Laplace.....	30
Figura 2.10	Sistema SDOF masa-resorte.....	31
Figura 2.11	Comportamiento del sistema SDOF masa-resorte.....	31
Figura 2.12	Diagramas de cuerpo libre para el sistema SDOF masa-resorte (a) Estático y (b) Dinámico.....	32
Figura 2.13	Respuesta dinámica del sistema masa-resorte en el dominio del tiempo con respuesta de diferentes valores de m y K	36
Figura 3.1	Esquema de la configuración experimental con el Analizador de Espectro Óptico (OSA).....	42
Figura 3.2	Esquema de la configuración experimental con salida del fotodetector.....	43
Figura 3.3	Curvas características del diodo LED M625F2 de Thorlabs (gráficos tomados de la hoja de datos del fabricante [1]): (a) Espectro típico centrado en 625nm (b) Gráfica de corriente vs voltaje del LED.....	45

Figura 3.4	Curvas características del fotodetector DET025AFC(/M) de Thorlabs (gráficos tomados de la hoja de datos del fabricante [2])47
Figura 3.5	Proceso de fabricación del MMI (a) Las fibras ópticas se ajustan en la posición inicial para recibir la descarga de los electrodos (b) Los electrodos se movieron hasta una distancia D de las fibras ópticas (c) Configuración del SMF-MMF-SMF del MMI.....49
Figura 3.6	Empalmadora FITELE S175 (a) Funcionamiento manual con las fibras MMF y SMF (b) Empalme completado MMF-SMF.....50
Figura 3.7	Perfiles de distribución (a) Punto de luz en la superficie del MMI de 1.5 cm (b) Intensidad de la señal con ciertas distorsiones del MMI de 2.5 cm (c) Picos de la señal del MMI de 3.5 cm.....51
Figura 3.8	Características principales de un cantilever.....53
Figura 3.9	Oscilación del sistema de vibración.....56
Figura 4.1	Frecuencia natural de un cantilever.....61
Figura 4.2	Excitación de los modos en el núcleo de la fibra.....62
Figura 4.3	Esquema de la configuración experimental para detección de curvatura.....63
Figura 4.4	Variación de la transmisión con respecto a la curvatura.....64
Figura 4.5	Análisis de sensibilidad del sensor de curvatura.....65
Figura 4.6	Análisis de histéresis del sensor de curvatura.....66
Figura 4.7	Arreglo experimental con servomotor y cantilever.....67
Figura 4.8	Variación de la transmisión normalizada con respecto a la longitud de onda del MMI de 1.5 cm (a) Ascenso (b) Descenso.....68
Figura 4.9	Análisis de histéresis del MMI de 1.5 cm.....68
Figura 4.10	Análisis de longitud de onda vs ángulo del MMI de 1.5 cm.....69

Figura 4.11	Variación de la transmisión normalizada con respecto a la longitud de onda del MMI de 2.5 cm (a) Ascenso (b) Descenso.....	70
Figura 4.12	Análisis de histéresis del MMI de 2.5 cm.....	71
Figura 4.13	Análisis de longitud de onda vs ángulo del MMI de 2.5 cm.....	71
Figura 4.14	Variación de la transmisión normalizada con respecto a la longitud de onda del MMI de 3.5 cm (a) Ascenso (b) Descenso.....	72
Figura 4.15	Análisis de histéresis del MMI de 3.5 cm.....	73
Figura 4.16	Análisis de longitud de onda vs ángulo del MMI de 3.5 cm.....	73
Figura 4.17	Esquema de la configuración experimental de la respuesta de temperatura del sensor.....	74
Figura 4.18	Respuesta térmica del sensor de vibración.....	75
Figura 4.19	Esquema de la configuración experimental para las pruebas de vibración.....	76
Figura 4.20	Imagen fotográfica de la configuración propuesta (a) Vista superior del experimento (b) Vista lateral del experimento.....	77
Figura 4.21	Señales de vibración producidas por el sensor.....	77
Figura 4.22	Transformada rápida de Fourier para diferentes longitudes del cantilever.....	79
Figura 4.23	Gráfica ANOVA para diferentes longitudes del cantilever.....	80

Índice de tablas

Tabla 3.1	Características del LED M625F2 de Thorlabs (datos tomados de la hoja de datos del fabricante [1])	44
Tabla 3.2	Componentes del Espectrómetro USB2000+ (datos tomados de la hoja de datos del fabricante Ocean Optics [10])	46
Tabla 3.3	Características del cantilever.....	53
Tabla 4.1	Valores reales y experimentales de la frecuencia.....	78

Índice de símbolos

Símbolo	Termino	Unidad
n_i	Índice de refracción del medio con $i=1,2,3...$	
n_c	Índice de refracción del núcleo	
n_{cl}	Índice de refracción del revestimiento	
n_{eff}	Índice de refracción efectivo	
θ_i	Ángulo que forma el rayo incidente con la normal	$^\circ$
θ_r	Ángulo que forma el rayo refractado con la normal	$^\circ$
θ_c	Ángulo crítico	$^\circ$
∇	Operador nabla	
\vec{E}	Vector de la intensidad del campo eléctrico	V/m
ω	Frecuencia angular	rad/seg
k	Número de onda	
k_0	Número de onda en el espacio libre	
a	Radio del núcleo de la fibra óptica	m
γ	Constante de decaimiento del campo evanescente	
J_ν	Función Bessel	A/m^2
β	Constante de propagación	rad
λ_0	Longitud de onda en el espacio libre	m
H_i	Magnitud del campo magnético $i = 0,1$	A/m
H_z	Intensidad de campo magnético	A/m
E_z	Intensidad del campo eléctrico	V/m
ϵ_i	Permitividad del medio $i = 1,2, ...$	F/m
V	Número de modos de propagación en la fibra	
A, B	Constantes de valor desconocido	
Δ	Operador delta	
W	Ancho de la guía de onda	m
W_{eff}	Ancho efectivo de la guía de onda	m
L_π	Longitud crítica	m
p	Propiedades periódicas de las imágenes a lo largo de la guía de onda multimodal.	

c_v	Constante de excitación del campo de entrada	
R	Resistencia eléctrica	Ω
L	Inductancia	H
C	Capacitancia	F
m	Masa	Kg
B	Amortiguamiento	Nw/(m/seg)
K	Rigidez	Nw/m
$e(t)$	Fuente de voltaje	Volt.
i	Corriente	Amp.
F_{ext}	Fuerza externa	Nw
F_s	Fuerza del resorte	Nw
W	Peso	Nw
a	Aceleración	m/seg ²
f_n	Frecuencia natural	Hz
ω_n	Frecuencia angular	Rad/seg
E	Módulo de elasticidad lineal (módulo de Young)	Nw/m ²
A	Área de la sección	mm
I	Momento de inercia	kg*m ²
ρ	Densidad de flexión	kg/m ³

Glosario

Símbolo	Termino
MMI	Filtro de Interferencia Multimodal
SMF	Fibra Monomodo
MMF	Fibra Multimodo
TE	Modo Transversal Eléctrico
TM	Modo Transversal Magnético
TEM	Modo Transversal Electromagnético
HE	Modo Híbrido Eléctrico
HM	Modo Híbrido Magnético
HEM	Modos Híbridos Electromagnéticos
LP	Modo Polarizado Linealmente
NA	Apertura Numérica
OSA	Analizador de Espectro Óptico
LED	Diodo Emisor de Luz
FFT	Transformada Rápida de Fourier

Capítulo 1

1.1. Introducción

En los últimos años el campo de la óptica ha ido en crecimiento con el desarrollo de dispositivos de fibra óptica, en especial el área de sensores y láseres diseñados completamente de fibra óptica, algunas de las variables a medir más comunes son: aceleración, presión, temperatura, tensión, índice de refracción, curvatura, vibración, entre otras [1].

En la actualidad existe un amplio uso de los sensores a base de fibra óptica ya que presentan características favorables a comparación de los sensores realizados con tecnologías tradicionales. Entre ellas cabe mencionar su inmunidad electromagnética, aislamiento eléctrico, alta sensibilidad, pequeño tamaño, poco peso, pasividad química, flexibilidad y la posibilidad de realizar la toma de muestras en tiempo real [1].

Existen múltiples arreglos con fibra óptica que permiten la creación de sensores también llamados interferómetros, entre los arreglos se pueden mencionar el interferómetro de Michelson, interferómetro Mach-Zehnder, interferómetros Fabry-Perot (IEFP), interferómetro de Sagnac, entre otros. Estos tipos de interferómetros antes nombrados tienen una limitación que es el costo de fabricación y el tipo de fuente de luz que necesitan para trabajar, es por ello por lo que en la presente investigación se abordará esta problemática con el diseño de sensores basados en efectos de interferencia multimodo (MMI) y con los elementos que componen los interferómetros de menor costo.

Las estructuras MMI se destacan por ser capaces de trabajar en el espectro visible, debido a sus propiedades y característica que permiten la combinación de ondas en su núcleo y de acoplamientos entre la onda transmitida y la onda reflejada, entre sus múltiples aplicaciones como la vibración, el cual es el caso de estudio de la presente investigación.

Este capítulo proporciona los antecedentes, la justificación, los objetivos de la investigación tanto general como específicos, junto con el planteamiento general del problema de la tesis.

1.2. Antecedentes

La importancia de las fibras ópticas en la actualidad está relacionada con las telecomunicaciones, sin embargo, también fueron de interés en el área de sensores por sus características únicas como la resistencia a ambientes agresivos y su inmunidad al ruido electromagnético [2-4]. Existen diferentes tipos de configuraciones para obtener un sensor de fibra óptica tales como el interferómetro de Michelson el cual se puede obtener utilizando una sección de fibra de cristal fotónico [5]. Otro interferómetro es el Mach-Zehnder que se puede obtener realizando un desajuste en la alineación de núcleos al momento del empalme; es importante señalar que este dispositivo se puede utilizar como filtro de selección de longitud de onda y dispositivo de detección de temperatura [6]. Otra configuración ampliamente estudiados y utilizados es la de los sensores basados en interferómetros extrínsecos o de bulto Fabry-Perot (IEFP), debido a las ventajas que poseen [7], no obstante, pueden presentar problemas de alineación lo que ha llevado a la comunidad científica proponer arreglos basados en otras configuraciones como los filtros multimodales todo de fibra óptica. Además, también se tiene el interferómetro de Sagnac con una sensibilidad hacia campos magnéticos y

eléctricos, así como para la medición de aceleración, presión y temperatura lo que lo hace un elemento sensor ideal para diversas aplicaciones [8].

Todos los dispositivos descritos en el párrafo anterior muestran evidencia de que es posible detectar vibraciones a través de la aplicación de sensores de fibra óptica [9].

Las señales de vibración son una respuesta repetitiva, periódica u oscilatoria de un sistema mecánico, y son generadas por cualquier movimiento sin importar su intensidad debido a comportamientos irregulares o aleatorios [10]. La medición de vibraciones es crucial para muchos campos industriales. Por ejemplo, para garantizar operaciones seguras, como el monitoreo en tiempo real de vibraciones en puentes, motores industriales, rieles de trenes y algunos dispositivos de alta precisión.

Existen algunos sensores de vibración basados en fibra óptica que han atraído un gran interés, debido a ventajas que presentan ya que son ligeros, de tamaño reducido, sensibilidad y confiabilidad, rentabilidad, interferencia electromagnética y respuesta rápida [11-12].

Estos sensores se pueden clasificar generalmente en grupos que se basan sobre la modulación de intensidad [13], fase, [14] y longitud de onda [15]. Por ejemplo, Li et al. presento un sensor de modulación de fase que utiliza una fibra monomodo, para vibraciones acústicas, uso fibra óptica adelgazada con cintura de $1,7 \mu m$ y el rango de frecuencia detectable de 30~40 kHz [16]. Sin embargo, la principal dificultad radica en la preparación de una cintura cónica uniforme, Villatoro et al. mostró un sensor de fibra de varios núcleos con un rango de medición de 5~4000 Hz [17]. Jeong et al. utilizó una fibra de cristal fotónico que mantiene la polarización (PM-PCF) para medir vibraciones de 1~3000 Hz, basadas en modulación de longitud de onda [18].

1.3. Justificación

Los sensores de fibra óptica se utilizan ampliamente en la actualidad debido a sus múltiples ventajas sobre otros tipos de sensores, son fundamentales en la detección de variables físicas debido a que, a través de ellos no fluye ninguna corriente eléctrica, por lo que estos sensores no son sensibles al ruido eléctrico, ni electromagnético, además de otras características relacionadas con las propiedades intrínsecas de la fibra óptica [19-20]. Dentro de los dispositivos mencionados destacan los filtros multimodales (MMI) que tienen ventajas como un menor tamaño y además no requieren sistemas complejos de alineación. Las características de estos dispositivos son de particular interés para el desarrollo de esta tesis, debido a que son medios validados para la detección y medición de vibraciones. Es importante señalar que la medición de vibraciones es crucial para muchas áreas industriales, por ejemplo, para el monitoreo en tiempo real de dispositivos que estén en constante vibración como puentes, motores, rieles, maquinarias y algunos otros dispositivos de alta precisión. El objetivo principal de los sensores de vibración es identificar las posibles causas en una etapa temprana de diferentes tipos de irregularidades, con el fin de mejorar la seguridad y el mantenimiento de los dispositivos. Por todo lo anterior es necesario proponer dispositivos de fibra óptica capaces de satisfacer las necesidades industriales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realización de un sensor compuesto de fibra óptica, para la detección de vibraciones en diversos dispositivos.

1.4.2. Objetivos específicos

a) Diseñar y fabricar dispositivos de fibra óptica del tipo filtro de interferencia multimodal MMI por medio de la unión de fibras ópticas multimodo y fibras ópticas convencionales que operen en el espectro visible.

b) Realizar pruebas experimentales y caracterización de los filtros multimodal MMI diseñados para medir vibración.

c) Analizar los resultados para medir las vibraciones de dispositivos que muestre los cambios en el transductor por amplitud o fase.

1.5. Planteamiento general del problema

En la actualidad el monitoreo y detección de daños en estructuras con el fin de mejorar la forma de conocer el estado real en el que se encuentran, son temas de gran importancia en diferentes campos de la ingeniería [21]. Un análisis de estructuras puede llegar a ser muy importante al momento de prevenir accidentes. La variable empleada para medir las fallas en estructuras es la vibración, ya que a partir de un análisis en frecuencia se podrán observar cambios específicamente reflejado en la frecuencia fundamental.

Existen numerosos dispositivos que permiten realizar esta tarea, dichos dispositivos pueden presentar interferencias electromagnéticas o sensibilidad a condiciones ambientales que afectarían directamente la medición de los datos de vibración, es por ello por lo que en la presente investigación se abordará el desarrollo de un dispositivo de fibra óptica cuyo principio de funcionamiento es la interferencia multimodal capaz de medir la vibración en una estructura.

Actualmente existen diversos dispositivos de fibra óptica para detectar vibración en el espectro infrarrojo [22-24], sin embargo, hay pocos acercamientos para la detección de vibraciones en el rango visible, esto implica tener una fuente de luz de baja coherencia como por ejemplo fuente de luz roja de banda ancha. Sólo se logrará la interferometría cuando los retardos en la longitud de la trayectoria del dispositivo de interferencia multimodal son igualados con el tiempo de coherencia de la fuente de luz.

Entre las dos categorías de fibras ópticas para comunicaciones se pueden mencionar las fibras monomodo y las fibras multimodo, las primeras se diseñan para trabajar en longitudes de onda entre los 850 - 1300 nm y las segundas entre los 1300 - 1550 nm, en este trabajo se propone trabajar con fibras monomodo en el espectro visible, existen muy pocos trabajos en la fabricación de filtros multimodales todos de fibra trabajando en este rango, en la presente investigación se utilizó la fibra modelo 630HP de Thorlabs para la construcción de un arreglo MMI que pueda operar en el espectro visible y sea sensible a vibraciones.

Referencias

- [1] Padilla, L. C, Guzmán, A., & Torner, L. (2007). *Óptica y Fotónica: contexto iberoamericano*. Transatlántica de Educación, (3), 128-140.
- [2] Kersey, A. D., & Dandridge, A. (1990). *Applications of fiber-optic sensors*. *IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*, 13(1), 137-143.
- [3] Udd, E., & Spillman Jr, W. B. (Eds.). (2011). *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. John Wiley & Sons.
- [4] Yin, S., Ruffin, P. B., & Francis, T. S. (Eds.). (2017). *Fiber optic sensors*. CRC press.
- [5] Hsu, J. M., Horng, J. S., Hu, C. L., & Lee, C. L. (2014). *Fiber-optic Michelson interferometer with high sensitivity based on a liquid-filled photonic crystal fiber*. *Optics Communications*, 331, 348-352.
- [6] M. A. Contreras-Terán*, J. M. Sierra-Hernández, D. Jauregui-Vázquez, and R. Rojas-Laguna (2021), *Temperature sensor using fiber ring laser based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer*, *Revista Mexicana de Física* 2(1) 109–115
- [7] Zhang, Q., Zhu, T., Hou, Y., & Chiang, K. S. (2013). *All-fiber vibration sensor based on a Fabry-Perot interferometer and a microstructure beam*. *JOSA B*, 30(5), 1211-1215.
- [8] Han, Y., Li, Q., Liu, X., & Zhou, B. (1999). *Architecture of high-order all-fiber birefringent filters by the use of the Sagnac interferometer*. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(1), 90-92.
- [9] Hernández-Gutiérrez, D. (2006), *Sensor de vibraciones con fibra óptica*. Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica México.
- [10] De Silva, C. W. (2006). *Vibration: fundamentals and practice*. CRC Press.
- [11] Jauregui-Vazquez, D., Estudillo-Ayala, J. M., Castillo-Guzman, et al. (2013). *Highly sensitive curvature and displacement sensing setup based on an all fiber micro Fabry-Perot interferometer*. *Optics Communications*, 308, 289-292.

- [12] Yu, H., Luo, Z., Zheng, Y., et. al. (2019). *Temperature-insensitive vibration sensor with Kagomé Hollow-Core fiber based Fabry–Perot interferometer*. Journal of Lightwave Technology, 37(10), 2261-2269.
- [13] Yu, H., Luo, Z., Zheng, Y., et. al. (2019). *Vibration sensing using liquid-filled photonic crystal fiber with a central air-bore*. Journal of Lightwave Technology, 37(18), 4625-4633.
- [14] Xia, W., Li, C., Hao, H., et. al. (2018). *High-accuracy vibration sensor based on a Fabry–Perot interferometer with active phase-tracking technology*. Applied optics, 57(4), 659-665.
- [15] González-Reyna, M. A., Alvarado-Méndez, E., Estudillo-Ayala, et. al. (2015). *Laser temperature sensor based on a fiber Bragg grating*. IEEE Photonics Technology Letters, 27(11), 1141-1144.
- [16] Li, Y., Wang, X., & Bao, X. (2011). *Sensitive acoustic vibration sensor using single-mode fiber tapers*. Applied optics, 50(13), 1873-1878.
- [17] Villatoro, J., Arrizabalaga, O., Durana, G., et. al. (2017). *Accurate strain sensing based on super-mode interference in strongly coupled multi-core optical fibers*. Scientific Reports, 7(1), 1-7.
- [18] Jeong, J. H., Kim, D. K., Choi, S., et. al. (2018). *Polarimetric polarization-maintaining photonic crystal fiber vibration sensor with shortest sensor head*. IEEE Sensors Journal, 18(7), 2768-2775.
- [19] Grattan, K. T. V., Grattan, L. S., & Meggitt, B. T. (Eds.). (2000). *Optical fiber sensor technology: advanced applications-Bragg gratings and distributed sensors* (Vol. 5). Springer Science & Business Media. ISBN 0-7923-7946-2
- [20] Dakin, J., & Culshaw, B. *Optical Fiber Sensors* (1997) Vol. 4. Chap, 8, 84. ISBN 0890063176
- [21] J. J. Yanez-Borjas, D. Camarena-Martinez, M. Valtierra-Rodriguez, et. al. (2019), *Methodology based on statistical features and linear discriminant analysis for damage detection in a truss-type bridge*, 2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), pp. 1-6.

- [22] Chen, D., Liu, Q., & He, Z. (2017). *Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR*. Optics express, 25(7), 8315-8325.
- [23] Zhang, L., Jiang, Y., Jia, J., et. al. (2018). *Fiber-optic micro vibration sensors fabricated by a femtosecond laser*. Optics and Lasers in Engineering, 110, 207-210.
- [24] Villatoro, J., Antonio-Lopez, E., Schülzgen, A., & Amezcua-Correa, R. (2017). *Miniature multicore optical fiber vibration sensor*. Optics Letters, 42(10), 2022-2025.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Introducción

En el presente capítulo se darán a conocer las bases teóricas y formulaciones matemáticas que describen la caracterización de los elementos utilizados con las cuales se darán a entender los principios básicos del funcionamiento del dispositivo propuesto.

Con el fin de dar un preámbulo a la teoría de vibraciones, se mostrará el análisis del modelado de diversos sistemas vibratorios en diferentes campos de la ingeniería y los sensores de vibraciones. Además, se abordará la estructura propuesta en este trabajo de cantilever o viga en voladizo obteniendo las ecuaciones que lo describen con el objetivo de explicar las oscilaciones que se presentan.

2.2. Fibras ópticas

El concepto de guiar la luz dentro de un dieléctrico estrecho y ancho se conoce desde hace muchos años, 1850 se conoce el fenómeno de la reflexión total interna, responsable de la transmisión de luz en las fibras ópticas. John Tyndall en 1870 demostró que una fina y delgada corriente de agua podía contener y guiar la luz [1].

Sin embargo, las fibras de vidrio se fabricaron por primera vez en la década de 1920 y su uso solo se volvió práctico en la década de 1950, cuando el recubrimiento

mejoró en gran medida las propiedades del material. Antes de 1970, la fibra óptica se utilizaba principalmente para imágenes médicas de corto alcance.

Los sistemas de comunicación por fibra óptica empezaron a comercializarse desde la década de los 80 debido a que los costos de instalación de estos sistemas eran menores a los que usaban cables coaxiales, ya que las distancias entre repetidores disminuyeron drásticamente. Además, las fibras ópticas tienen la capacidad para transmitir información a largas distancias, con ventajas como que no se ven afectadas a las interferencias electromagnéticas, peso ligero y su tamaño reducido [2].

En la Figura 2.1 se muestra la vista transversal del confinamiento de la luz por reflexión total interna en fibras ópticas, considerando la geometría mostrada, un rayo que forma un ángulo θ_i con el eje de la fibra incidente en el centro del núcleo, a causa de la refracción en la interfaz fibra-aire, el rayo de la luz se dobla hacia la normal [2]. El ángulo θ_r del rayo refractado está dado por:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r \quad (2.1)$$

Sin embargo, la refracción sólo es posible para un ángulo de incidencia θ tal que $\sin \theta < n_2/n_1$, todos los rayos con $\theta > \theta_c$ permanecen confinados al núcleo de la fibra. Para ángulos mayores que un ángulo crítico θ_c [2], definido por:

$$\sin \theta_c < n_2/n_1 \quad (2.2)$$

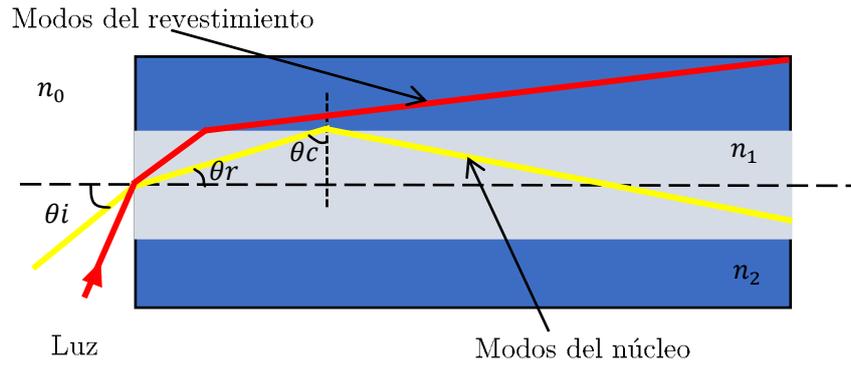


Figura 2.1 *Diagrama de la vista transversal de una fibra óptica convencional.*

En la Figura 2.2 se presenta un perfil de índice de refracción escalonado, que es la estructura más sencilla de una fibra óptica, esta consiste en un núcleo central de vidrio o silicio fundido que conduce la luz, y por un revestimiento con índice de refracción ligeramente inferior al del núcleo, existen otros tipos de fibras cuyo perfil es gradual que solo existen para comportamiento multimodo donde el índice de refracción del núcleo se va reduciendo gradualmente desde el centro hasta el límite del recubrimiento.

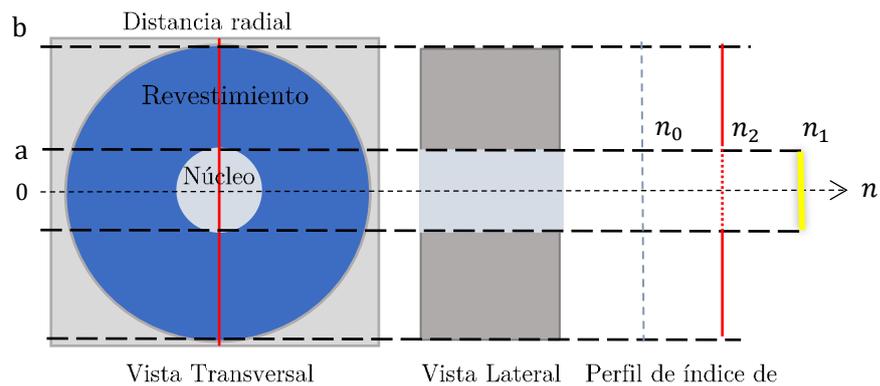


Figura 2.2 *Diagrama de la vista frontal de una fibra óptica convencional y representación del perfil escalonado.*

Donde a y b son el radio del núcleo y el revestimiento respectivamente, n_0 es el índice de refracción del aire ($n_0= 1$), n_1 es el índice de refracción del núcleo de la fibra y n_2 es el índice de refracción del revestimiento, y según la Ley de Snell es necesario que el índice de refracción del núcleo sea mayor al índice de refracción del revestimiento ($n_1 > n_2$) y así se produzca el fenómeno de reflexión total interna [2-3].

2.3. Modos en una fibra óptica de índice escalonado

En fibra óptica un modo es una de las múltiples maneras en que una onda puede propagarse por medio de la fibra. Puede definirse como una onda estacionaria en el plano transversal de la fibra o como un modo óptico con una solución específica de la ecuación de onda

$$\nabla^2 \tilde{E} + n^2(\omega)k_0^2 = 0 \quad (2.3)$$

Donde \tilde{E} es el vector de la intensidad del campo eléctrico, n es el índice de refracción del medio, ω es la frecuencia angular y k_0 es el número de onda en el espacio libre, la ecuación 2.3 se consigue luego de realizar algunas deducciones de las ecuaciones Maxwell para un medio sin cargas libres, no conductor.

En general, las configuraciones de campo o modos admisibles que existen en una fibra de índice escalonado tienen seis componentes de campo. En el caso de la guía de onda, existen los modos TE (Transversal eléctrico), modo TM (Transversal magnético) y modos TEM (Transversal electromagnético). Los modos híbridos electromagnéticos (HEM) tienen componentes de campo eléctrico (HE) y magnético (HM) longitudinales. En términos de una analogía de rayo para la fibra de índice escalonado, los modos híbridos corresponden a rayos oblicuos que se propagan. La ecuación característica

para la fibra de índice escalonado es igual a cero y se obtienen dos ecuaciones características que definen los modos TE y TM [4].

Estas ecuaciones se escriben a continuación:

$$\left[\frac{a\gamma^2 J'_0(\kappa a)}{\kappa J_0(\kappa a)} + j\gamma a \frac{H_0^{(1)}(j\gamma a)}{H_0^{(1)}(j\gamma a)} \right] = 0 \quad (2.4)$$

$$\left[\frac{\varepsilon_1 a\gamma^2 J'_0(\kappa a)}{\varepsilon_2 \kappa J_0(\kappa a)} + \frac{j\gamma a H_0^{(1)}(j\gamma a)}{H_0^{(1)}(j\gamma a)} \right] = 0 \quad (2.5)$$

Donde $\kappa = \sqrt{k^2 - \beta^2}$, ε_1 y ε_2 es la permitividad del medio 1 y 2 respectivamente, γ es la constante de decaimiento del campo evanescente, a es el radio del núcleo de la fibra óptica, J_0 representa la función Bessel con $\nu = 0$ y H_0 es la magnitud del campo magnético.

Para entender que la Ec. (2.4) es la ecuación que define los modos TE y la Ec. (2.5) la de los modos TM tomando en cuenta que para los modos TE, $E_z = 0$ y para los modos TM $H_z = 0$.

Dado que la ecuación se encuentra en coordenadas cilíndricas obtenemos:

$$E_z = A J_\nu(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (2.6)$$

y

$$H_z = B J_\nu(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (2.7)$$

E_z es igual a cero cuando $A=0$, y $H_z = 0$ cuando $B=0$. La ecuación (2.4) es la ecuación característica de la guía cuando $\nu \rightarrow 0$ y $A=0$. Es decir, la Ec. (2.4) es la ecuación definitoria para los modos TE.

Las ecuaciones (2.4) y (2.5) pueden reescribirse de forma más sencilla si tiene que para cualquier función cilíndrica:

$$Z'_0 = -Z_1 \quad (2.8)$$

Entonces las ecuaciones (2.4) y (2.5) se convierten en, la ecuación de definición para los modos TE:

$$\frac{\gamma J_1(\kappa a)}{\kappa J_0(\kappa a)} + j \frac{H_1^{(1)}(j\gamma a)}{H_0^{(1)}(j\gamma a)} = 0 \quad (2.9)$$

y, la ecuación de definición para los modos TM:

$$\frac{\varepsilon_1 \gamma J_1(\kappa a)}{\varepsilon_2 \kappa J_0(\kappa a)} + j \frac{H_1^{(1)}(j\gamma a)}{H_0^{(1)}(j\gamma a)} = 0 \quad (2.10)$$

En resumen, la ecuación característica define los modos de propagación en una fibra óptica de índice escalonado. Las soluciones de esta ecuación son, como mínimo, extremadamente complicadas y normalmente se obtienen numéricamente utilizando una computadora. La solución general para el número de modos $\nu \neq 0$ tiene seis componentes de campo y define las condiciones de propagación de los modos híbridos (HE). Para el caso especial de número de modos $\nu = 0$ podemos derivar dos ecuaciones características separadas, (2.9) y (2.10), que describen las condiciones de propagación de los modos TE y TM [4].

2.4. Fibra óptica monomodo

En el caso de las fibras de índice escalonado, la condición para el guiado monomodal puede formularse utilizando el número V , que puede calcularse a partir de la longitud de onda, el radio del núcleo y la apertura numérica (NA): el número de modos debe ser inferior a $V \approx 2,405$ [5]. Para ello es necesario que el radio del núcleo sea pequeño, sobre todo en el caso de las fibras con una NA elevada.

El número de modos de propagación en una fibra de índice escalonado es una función de su número V [3].

$$V \equiv \kappa_c a = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.11)$$

El parámetro de corte $\kappa_c a$ suele denominarse número " V " de la fibra que es el número de modos de propagación en la fibra de índice escalonado.

Para $V < 2.405$ el único modo que se propaga en una fibra es el modo fundamental y se le denomina el modo polarizado linealmente LP_{01} . Para desarrollar la ecuación de diseño para una fibra monomodo, reescribamos la ecuación 2.11 en términos de Δ , la diferencia de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento [4]:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta - \Delta^2} \quad (2.12)$$

Donde

$$n_2 = n_1(1 - \Delta) \quad (2.13)$$

y

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.14)$$

Para un Δ pequeño, $\Delta^2 \ll 2\Delta$ la ecuación 2.12 se convierte en:

$$V \approx \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{2} n_1 \sqrt{\Delta} = 8.886 \frac{a n_1}{\lambda_0} \sqrt{\Delta} \quad (2.15)$$

2.5. Fibra óptica multimodo

Las fibras multimodo se utilizaron por primera vez para la óptica no lineal [6] durante la década de 1970, ya que la mayoría de las fibras ópticas disponibles en esa época admitían múltiples modos [7-9]. La situación cambió en los años 80, cuando se comercializaron las fibras monomodo por sus aplicaciones en telecomunicaciones. El interés por las fibras multimodo resurgió después de 2005, en parte motivado por su uso para la multiplexación por división de longitud de onda en los sistemas de comunicación óptica. Como subproducto de este interés, los efectos no lineales en las fibras multimodo se han estudiado ampliamente desde 2010.

En comparación con las fibras monomodo estándar, las fibras multimodo suelen tener áreas de núcleo significativamente mayores, pero también, por lo general, una mayor apertura numérica, lo que permite un guiado robusto, incluso en condiciones de fuerte curvatura, pero también mayores pérdidas de propagación sin curvatura, ya que las irregularidades en la interfaz núcleo-revestimiento pueden dispersar la luz con

mayor eficacia. El perfil del índice de refracción suele ser rectangular (fibras de índice escalonado), pero a veces es parabólico.

Una especificación básica de una fibra multimodo contiene el diámetro del núcleo y el diámetro exterior de una fibra multimodo. Los tipos más comunes para las comunicaciones de fibra óptica son las fibras de 50/125 μm y 62,5/125 μm , que tienen un diámetro de núcleo de 50 μm o 62,5 μm , respectivamente, y un diámetro de revestimiento de 125 μm . Estas fibras admiten cientos de modos guiados. También hay fibras de núcleo grande con diámetros de núcleo incluso mucho mayores, de cientos de micrómetros [10]. La transmisión de luz en una fibra multimodo es comparativamente fácil, porque hay mayores tolerancias en cuanto a la ubicación y el ángulo de propagación de la luz incidente, en comparación con una fibra monomodo.

2.6. Interferencia multimodal (MMI)

En las fibras ópticas, la interferencia multimodal (MMI, por sus siglas en inglés, Multimode Interference) puede implementarse utilizando una estructura de fibra que consiste en la combinación de secciones SMF-MMF-SMF (por sus siglas en inglés, Single Mode Fibers – Multimode Fibers – Single Mode Fibers) con un perfil de índice escalonado [11].

Esta configuración puede utilizar un perfil MMF de índice escalonado o de índice de perfil graduado. Los dispositivos de fibra MMI que utilizan MMF con un perfil de índice escalonado han recibido una atención sustancial en la última década ya que la fabricación es factible y de costo relativamente bajo, además tiene características espectrales únicas y la alta sensibilidad de los sensores de fibra multimodales basados en interferencias en los que se investigaron los efectos de la MMI y la autoimagen para la detección del índice de refracción, tensión, curvatura, vibración, entre otras clases

de fenómenos físicos [12-14]. También se ha utilizado como filtro sintonizable de longitud de onda de paso de banda para aplicaciones de láser de fibra [15].

El funcionamiento de los dispositivos ópticos MMI se basa en el principio de la autoimagen que afirma que, si el núcleo de otra pieza de SMF se empalma con el extremo de una MMF, esta combinación SMF-MMF-SMF debería actuar como un filtro de paso de banda.

La luz inyectada se guía desde el SMF de entrada hacia el MMF se propaga a lo largo del núcleo del MMF y penetra en forma de onda evanescente y actúa con los medios externos. Como resultado, el dispositivo es sensible a la condición ambiental, todo dependerá del tipo de estructura. Para que el dispositivo MMI funcione, el dispositivo debe trabajar en una longitud de onda específica, además, la longitud de la sección de fibra MMF debe ser cortada con precisión.

El filtro propuesto y fabricado en esta investigación se forma mediante el empalme de un segmento de MMF de índice escalonado entre dos SMF estándar como se ilustra en el esquema de la Figura 2.3 donde la luz que se propaga a lo largo del SMF de entrada, ingresa a la MMF con una distribución de campo aproximada en forma de onda gaussiana que sirve como campo de entrada para el segmento MMF. El campo de entrada excita una serie de modos guiados en el MMF a medida que se propaga a lo largo de ella [16]. Para un radio de núcleo MMF grande, el campo de entrada se puede representar mediante una suma finita sobre los modos guiados solamente, ya que el aumento del tamaño del núcleo de la MMF aumenta el número de modos guiados, por lo tanto, aumenta el confinamiento y minimiza la potencia en los modos de revestimiento.

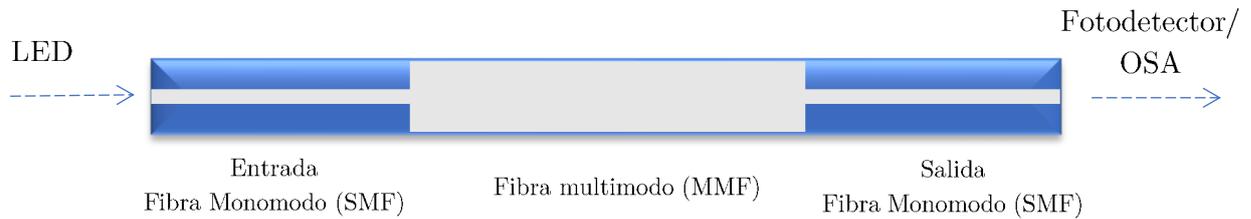


Figura 2.3 *Dispositivo de fibra MMI.*

2.7. Autoimagen en guías de onda

La razón principal por la que los efectos MMI en las guías de ondas multimodo son interesantes para la investigación, se debe a su capacidad de generar imágenes propias. En las MMF, estas autoimágenes se refieren a la capacidad de reproducir un campo óptico de entrada en la entrada del MMF en imágenes simples o múltiples imágenes a intervalos periódicos a lo largo de la MMF [17].

El elemento más importante para obtener efectos de MMI y de autoimagen es tener una guía de onda multimodo diseñada para soportar un gran número de modos, cuando se tiene como entrada una guía de onda de modo único SMF, el campo en la sección de fibra MMF del MMI se excita con todos los modos compatibles con la MMF. A medida que los modos se propagan a lo largo del MMF, la interferencia entre ellos da lugar a la formación de autoimágenes del campo de entrada a lo largo de este segmento MMF. Principalmente la formación de las autoimágenes ocurre en intervalos periódicos, por lo tanto, la longitud de la sección de la MMF se puede calcular para tener una autoimagen justo en su extremo. Si una SMF se coloca directamente donde se forma la autoimagen, toda la luz se acopla a esta SMF de salida.

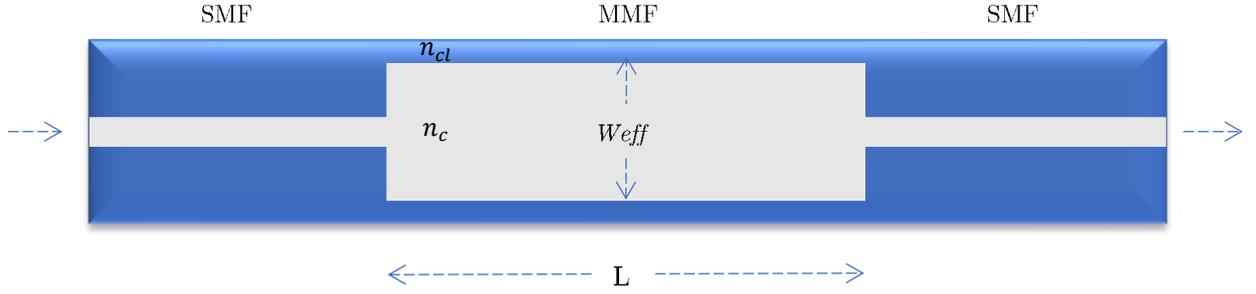


Figura 2.4 Esquema de un dispositivo MMI integrado.

En la Figura 2.4 se presenta un esquema de un MMI integrado, donde n_c representa el índice de refracción del núcleo, n_{cl} es el índice de refracción del revestimiento y W_{eff} es el ancho efectivo de la guía de onda, y se puede calcular mediante la ecuación 2.16 tomando en cuenta el cambio Goos-Hahnchen de cada modo del campo asociado y la profundidad de penetración lateral con en las fronteras de las guías de onda, además se puede aproximar $W_{eff} \approx W$ debido a que las guías utilizadas son de alto contraste [11].

$$W_{eff} = W + \frac{1}{2} (\lambda_0/\pi) (n_c^2 - n_{cl}^2)^{-1/2} \left[\left(\frac{n_{cl}}{n_c} \right)^2 + 1 \right] \quad (2.16)$$

Una MMF de índice escalonado e índice de refracción efectivo soportará m modos laterales con números de modos en un espacio casi cuadrático entre las constantes de propagación en un paso de guía de onda en el espacio libre que muestra una dependencia con respecto al número de modo v . En general, la anchura efectiva de la guía de onda W_{eff} correspondiente al modo fundamental obteniendo [26]:

$$L_{\pi} = \frac{4n_{eff}W_{eff}^2}{3\lambda_0} \quad (2.17)$$

Donde L_{π} se define como la longitud crítica de los dos modos de orden más bajo entre el modo fundamental $v = 0$ y el modo de primer orden $v = 1$, λ_0 corresponde a la longitud de onda del diseño y n_{eff} es el índice efectivo. Los tipos de imágenes formados serán determinados por las propiedades del factor de fase del modo y el factor de confinamiento del campo de entrada c_v el cual se rige por la siguiente aproximación [26].

$$\exp \left[j \frac{v\pi(v+2)}{3L_{\pi}} L \right] \quad (2.18)$$

De acuerdo con las condiciones de excitación del campo de entrada independiente le llamamos interferencia general al mecanismo de autoimagen, se puede encontrar tres fenómenos de interferencia diferentes en los MMI, utilizando el análisis basado en la posición lateral donde se coloca el SMF de entrada:

1. **La autoimagen en la interferencia general.** La autoimagen es una propiedad de las guías de onda multimodo a lo largo de la dirección de propagación de la guía por la que un perfil de campo de entrada se reproduce en imágenes simples o múltiples a intervalos periódicos [26]. Por lo tanto, la autoimagen general permite el uso de formas arbitrarias de excitación, como curvas, guías de acceso multimodo y espejos de esquina reflectantes. Las tolerancias de fabricación pueden mejorarse aumentando el paso entre las guías de acceso. Basándose en la naturaleza periódica de la "p" de imagen a lo largo del MMF, la distancia de propagación para las imágenes individuales L a lo largo de la guía de onda esta dada por [26]:

$$L = p(3L_\pi) \quad \text{para } p = 0,1,2, \dots \quad (2.19)$$

donde el factor p indica las propiedades periódicas de las imágenes a lo largo de la guía de onda multimodal.

2. Imágenes múltiples. En general, las imágenes múltiples se forman en posiciones L intermedias. Las expresiones analíticas para las posiciones y de las imágenes N , se han obtenido utilizando el análisis de Fourier y las propiedades de las sumas gaussianas generalizadas [26].

$$L = \frac{p}{2}(3L_\pi) \quad \text{para } p = 1,3,5, \dots \quad (2.20)$$

3. Interferencia restringida. En este caso sólo algunos de los modos guiados en la guía de ondas multimodo son excitados en la entrada de los dispositivos MMI. Esta excitación selectiva de algunos modos guiados de $v(v+2)$ muestra mecanismos de interferencia que permiten periodicidades de ciclos más cortos del factor de fase. Se pueden extraer imágenes simples y múltiples al igual que en la interferencia general y se puede considerar dos tipos: la interferencia par y la interferencia impar.

3.1. Para una *interferencia simétrica o par*, si se tiene que

$$\text{mod}_3[v(v+2)] = 0 \quad \text{para } v \neq 2,5,8, \dots \quad (2.21)$$

la periodicidad de longitud del factor de fase de modo de la ecuación 2.18 se reducirá tres veces si

$$c_v = 0 \quad \text{para } v = 2,5,8, \dots \quad (2.22)$$

por lo tanto, como se muestra en [27],[28], en el campo de entrada ahora se obtienen en las imágenes individuales (directas e invertidas)

$$L = p(L_\pi) \quad \text{para } p = 0,1,2, \dots \quad (2.23)$$

dado que los modos $v = 2,5,8, \dots$ en la guía de onda multimodo, no se exciten. De la misma manera, las imágenes dobles se encuentran en $(p/2)L_\pi$ con p impar. Fundamentado en simulaciones numéricas, N imágenes se formarán a la distancia

$$L = \frac{p}{N}(L_\pi) \quad (2.24)$$

donde $p \geq 0$ y $N \geq 1$ son enteros que no tienen divisor común.

3.2. Para una *interferencia impar*, si se tiene que:

$$\text{mod}_4[v(v+2)] = 0 \quad \text{para } v \text{ par} \quad (2.25)$$

está claro que la periodicidad de la longitud de la fase de modo de 2.18 se reducirá cuatro veces si

$$c_v = 0 \quad \text{para } v = 1,3,5, \dots \quad (2.26)$$

Por lo tanto, ahora se obtendrán imágenes individuales del campo de entrada

$$L = p\left(\frac{3L_\pi}{4}\right) \quad \text{con } p = 0,1,2, \dots \quad (2.27)$$

si los modos impares no se excitan en la guía de onda multimodo. Esta condición se puede lograr alimentando en el centro la guía de onda multimodo con un perfil de

campo simétrico. La imagen se obtiene mediante combinaciones lineales de los modos simétricos (pares), y el mecanismo se llamará interferencia simétrica.

Usualmente, las imágenes dobles N se obtienen a distancias L como se muestra en la ecuación siguiente [26]:

$$L = \frac{p}{N} \left(\frac{3L\pi}{4} \right) \quad (2.28)$$

situado simétricamente a lo largo del eje las imágenes N del campo de entrada, y con espaciados iguales W_{eff}/N .

2.8. Sensor óptico

Un sensor de fibra óptica es un dispositivo que emplea la luz para realizar el análisis de propiedades físicas y químicas de los materiales para el estudio de factores como la presión, temperatura, curvatura, la vibración, entre otros, además se puede utilizar para medir o monitorear cambios en largas distancias. Los diferentes tipos de sensores de fibra tienen en común que contienen fibra óptica, para más de una gama de fuentes ópticas y un esquema de modulación por donde las mediciones que se realizan introducen un cambio en la señal óptica que se pueden recibir en el detector a través del esquema de procesamiento de señales seleccionado. Son muchas las ventajas de los sensores de fibras ópticas sobre las tecnologías en áreas de mecánica, eléctrica, química etc, debido a que no ocupan grandes espacios presentan resistencia electromagnética, son livianos, gran durabilidad y transmisión de información instantánea y precisa además pueden proporcionar detección distribuida en distancias muy grandes [25].

La subdivisión más sencilla de los sensores ópticos es en los llamados sensores intrínsecos que utilizan la fibra óptica como elemento detector y los sensores extrínsecos que utilizan cables de fibra óptica para transmitir información de luz desde un sensor remoto a los procesadores electrónicos; los cables utilizados por los sensores extrínsecos pueden ser externos a la fibra, pero pueden estar unido a ella de alguna manera ya sea por fusión, empalme, pegamento o conexión mecánica que a menudo puede estar desacoplado [18].

2.9. Características estáticas de un sensor

2.9.1. Sensibilidad

La sensibilidad de un sensor está definida por la relación entre la señal física de entrada y la señal eléctrica de salida. En general, es la relación entre el pequeño cambio en la señal eléctrica y el pequeño cambio en la señal física. La sensibilidad de las fibras ópticas a los efectos lineales y no lineales, ofrecen ventajas únicas para la detección distribuida, sin embargo, para lograr un rendimiento óptimo adecuado en el marco de medición determinado, es necesario hacer una adaptación cuidadosa del sistema, al entorno y un diseño detallado del sistema. Por ejemplo, la sensibilidad puede expresarse como la pendiente de la curva eléctrica de salida ($\Delta y/\Delta x$), como se muestra en la Figura 2.3 o como la derivada de la función de transferencia con relación a la señal física [19]. Además, hay otro término que se llama error de sensibilidad, también se observa en Figura 2.3 (curva punteada), que es la desviación de la pendiente ideal de la curva característica.

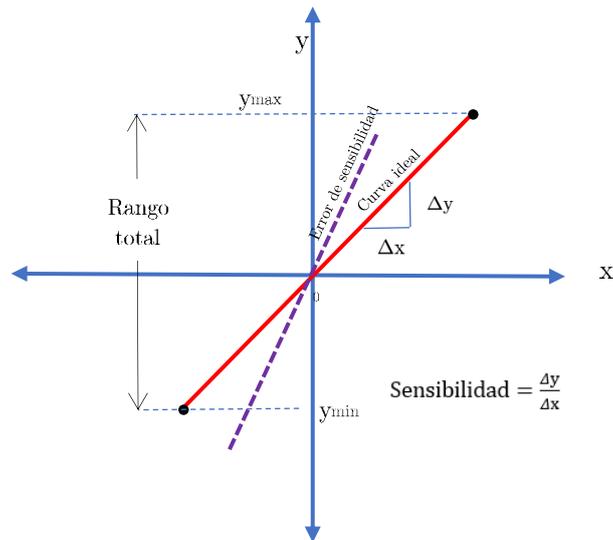


Figura 2.5 *Curvas de error ideal y de sensibilidad.*

2.9.2. Resolución

La resolución es el mínimo cambio del parámetro de entrada requerido para producir una variación detectable en la salida. Está fuertemente limitada por cualquier ruido en la señal [20]. Cuando en el rango la entrada cambia continuamente, las señales de salida de algunos tipos de sensores no serán totalmente suaves, incluso en ausencia de ruido.

La salida puede cambiar en pasos mínimos en algunas aplicaciones como los detectores infrarrojos con máscaras de rejilla, transductores potenciométricos, y otros sensores en los que el cambio de la señal de salida sólo se permite con un grado específico de variación de la entrada. La amplitud de la variación de entrada, que se obtiene en el paso más bajo de la salida se especifica como resolución en condiciones específicas [21].

2.9.3. Histéresis

La histéresis se origina cuando las medidas detectadas por los sensores no vuelven a la misma salida cuando el estímulo de entrada aumenta o disminuye. La amplitud de error esperado en función de la cantidad de mensura se define como histéresis [22].

En la Figura 2.6 se puede observar una curva de histéresis típica, en un valor de entrada fijo, como el punto x , desde un valor superior, como el punto b , dará como resultado una salida diferente de la que se obtiene al acercarse al mismo valor desde un valor inferior, como el punto a . Sin embargo, el punto x puede ser representado por los puntos $F(x)_1, F(x)_2$, o $F(x)_3$, dependiendo del valor anterior; es evidente que hay un error por causa de la histéresis [19].

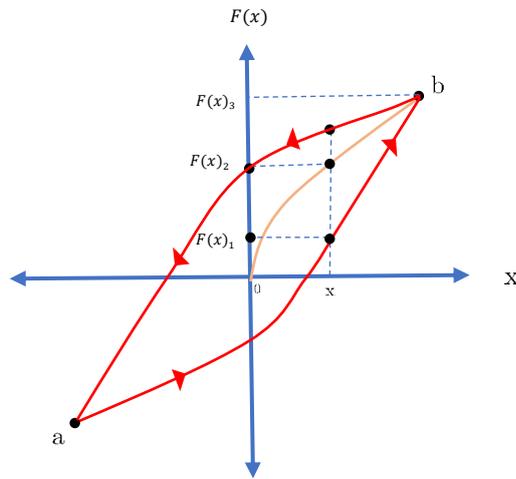


Figura 2.6 *Respuesta de la curva de histéresis.*

2.10. Parámetros del sistema

Las propiedades físicas de un sistema dinámico se pueden describir con sus componentes, es decir, la resistencia eléctrica (R), la inductancia (L) y la capacitancia (C) en un sistema el eléctrico, o la masa (m), el amortiguamiento (B) y la rigidez (K) en un sistema mecánico [23]. En un sistema mecánico en términos de sus propiedades de vibración se puede definir también las frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y formas modales [23]. Para evaluar el comportamiento de la frecuencia natural se realizó una equivalencia entre un sistema definido por un circuito eléctrico para luego conseguir su equivalente mecánico.

A continuación, se describirán los principales conceptos necesarios para comprender el fenómeno de la vibración.

2.11. Frecuencia Natural

La frecuencia natural de un sistema se plantea en este caso como un sistema eléctrico formado por un circuito LC en serie como se observa en la Figura 2.7:

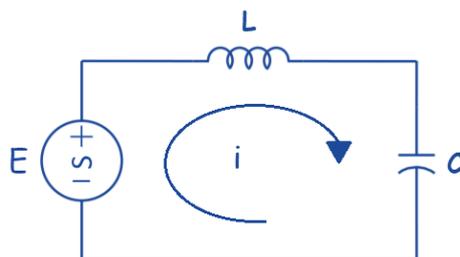


Figura 2.7 *Circuito LC serie.*

La Figura 2.7 muestra un circuito LC serie donde el valor de la fuente de voltaje $e(t)$ de corriente alterna se encuentra representada en voltios (v), la inductancia L se encuentra en Henrios (H), la capacitancia C está en Faradios (F), y la corriente i en amperios (A). Además, al realizar el recorrido por el circuito en el sentido de la corriente (en sentido horario) se generan los voltajes $v_L(t)$ y $v_C(t)$ en el inductor y el capacitor, respectivamente como se muestra en la Figura 2.8:

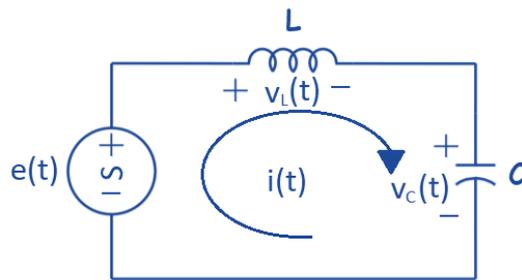


Figura 2.8 Circuito LC serie en el dominio del tiempo.

Realizando un análisis en el dominio del tiempo del circuito LC de la Figura 2.8 obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$e(t) = v_L(t) + v_C(t) \quad (2.29)$$

$$e(t) = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (2.30)$$

Al circuito de la Figura 2.8 se le realizó un cambio en el dominio de la frecuencia mediante la transformada de Laplace obteniendo como resultado lo mostrado en la Figura 2.9:

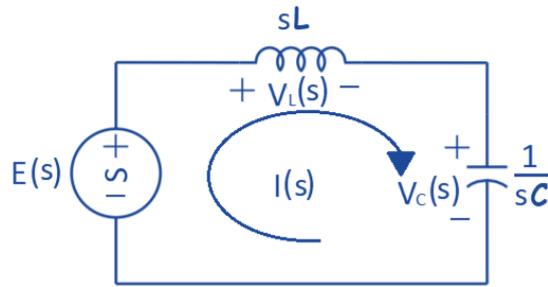


Figura 2.9 *Circuito LC serie en el dominio de la frecuencia mediante la transformada de Laplace.*

Realizando un barrido por el circuito mediante la ley de voltajes de Kirchhoff se obtiene la ecuación siguiente:

$$sLI(s) + \frac{1}{sC} I(s) = E(s) \quad (2.31)$$

Teniendo como factor común a $I(s)$ se obtiene entonces la ecuación 2.32:

$$I(s) \left[sL + \frac{1}{sC} \right] = E(s) \quad (2.32)$$

Para realizar una analogía entre un circuito eléctrico serie en este caso LC, y un sistema con un solo grado de libertad (SDOF, por sus siglas en inglés) se puede comparar la corriente eléctrica y el desplazamiento de la masa, ambas se desplazarán en un sentido que dependerá de la fuente de alimentación o de la fuerza aplicada respectivamente.

El sistema SDOF masa-resorte de la Figura 2.10 está formada por una masa (m) medida en kilogramos (kg) unida a un resorte sin masa de rigidez K medida en Newtons/metros (Nw/m), que se desplazan a través del eje Δy .

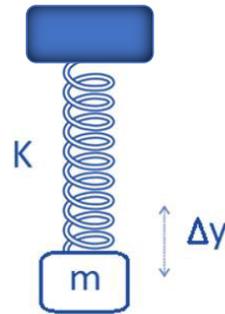


Figura 2.10 *Sistema SDOF masa-resorte.*

Para entender el funcionamiento del sistema propuesto, la Figura 2.11 muestra el comportamiento de los posibles estados que presentara el sistema [24].

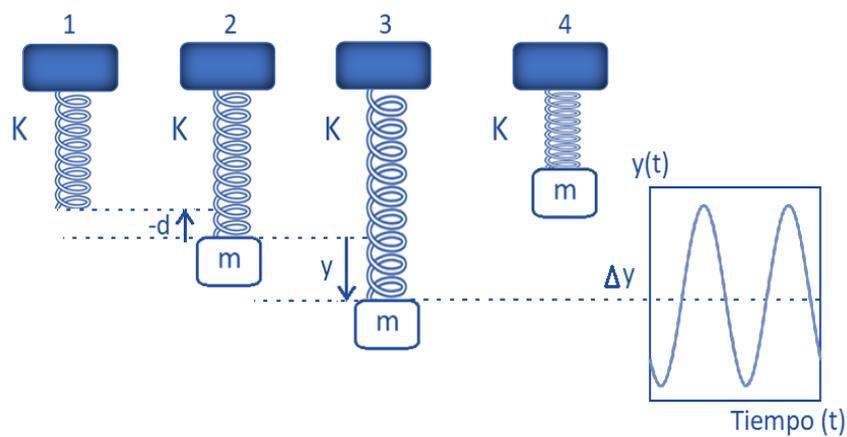


Figura 2.11 *Comportamiento del sistema SDOF masa-resorte.*

En la posición (1) de la Figura 2.11 el resorte se encuentra en reposo debido a que no tiene una masa conectada a su extremo y, por lo tanto, este se encuentra a una distancia $-d$ del sistema de referencia.

Luego se agrega la masa al sistema, cuando se logra una posición de equilibrio, se observa cómo se llega a la posición (2) en la Figura 2.10, donde $y = 0$ de acuerdo con el sistema de referencia. Además de aplicar una fuerza externa al sistema, el resorte se estira y se comprime con relación al sistema de referencia.

Al comprimirse el resorte se observa cómo se llega a la posición (4) y el sistema entrara en oscilación entre las posiciones (3) y (4) con una frecuencia determinada.



Figura 2.12 *Diagramas de cuerpo libre para el sistema SDOF masa-resorte*
(a) Estático y (b) Dinámico.

Con el objetivo de encontrar el modelo dinámico que describe el sistema SDOF, se procede a realizar un análisis, tanto en estado estático como en dinámico.

Cuando el sistema se encuentra en estado estático la sumatoria de fuerzas debe ser igual a cero $\Sigma F_y = 0$, según la primera ley de Newton.

Por lo tanto, según el diagrama de cuerpo libre de la Figura 2.12 (a) obtenemos:

$$W - F_s = 0 \tag{2.33}$$

donde, W es el peso y F_s , es la fuerza del resorte, que, de acuerdo con la ley de Hooke se define como, $F_s = -ky$, Para nuestro caso $y = -d$ y, por lo tanto, se obtiene:

$$W = Kd \quad (2.34)$$

Al aplicar una fuerza al sistema, este empieza a oscilar o entra en movimiento, visto desde el punto de vista dinámico, la sumatoria de fuerzas debe ser igual a la masa por la aceleración $\sum F_y = ma$, según la segunda ley de Newton, Por lo tanto, según el diagrama de cuerpo libre de la Figura 2.12 (b) obtenemos:

$$W + F_{ext} - F_s = ma \quad (2.35)$$

donde, W es el peso, F_{ext} la fuerza externa aplicada y F_s es la fuerza del resorte, y se define como $F_s = -Ky + d$, donde \mathbf{a} es la aceleración del sistema, la cual se puede describir como la segunda derivada de la posición $\mathbf{a} = \frac{d^2y(t)}{dt^2} = \ddot{y}$

Finalmente, al sustituir obtenemos:

$$Kd + F_{ext} - Ky - Kd = m\ddot{y} \quad (2.36)$$

$$m\ddot{y} + ky = F_{ext} \quad (2.37)$$

El modelo dinámico encontrado en la ecuación 2.37, no nos proporciona mucha información relevante del sistema, por ello se recurre a llevar la ecuación [anterior] al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Laplace, finalmente la ecuación que describe el sistema se define como:

$$s^2mY(s) + KY(s) = F_{ext}(s) \quad (2.38)$$

Con la finalidad de ordenar la ecuación 2.38 se toma como factor común a la izquierda a s , y se obtiene:

$$sY(s) \left[ms + \frac{k}{s} \right] = F_{ext}(s) \quad (2.39)$$

Considerando que $sY(s)$ es la derivada de la posición, se puede describir la ecuación [anterior] por la velocidad del sistema $V(s)$, obteniendo:

$$V(s) \left[ms + \frac{k}{s} \right] = F_{ext}(s) \quad (2.40)$$

Finalmente, la solución en el dominio del tiempo del modelo dinámico masa-resorte expresado en la ecuación 2.40, está definida como:

$$V(t) = -V_0 \sqrt{k/m} * \sin(\sqrt{k/mt}) \quad (2.41)$$

Donde V_0 es la condición inicial del sistema.

Por lo tanto, al comparar los resultados obtenidos por el sistema masa-resorte de la Figura 2.10, se concluye que el circuito LC serie de la Figura 2.9 es equivalente al sistema masa-resorte de la Figura 2.11, y la ecuación 2.40 es equivalente a la ecuación 2.32, siempre y cuando se cumpla con los siguientes parámetros:

$$I(s) \leftrightarrow V(s) \quad (2.42)$$

$$E(s) \leftrightarrow F_{ext}(s) \quad (2.43)$$

$$L \leftrightarrow m \quad (2.44)$$

$$C \leftrightarrow \frac{1}{k} \quad (2.45)$$

Para determinar la frecuencia angular de resonancia del circuito LC de la Figura 2.9, se parte de la ecuación 2.32, y partiendo de su ecuación característica igual a cero, tenemos:

$$sL + \frac{1}{sC} = 0 \quad (2.46)$$

ahora, multiplicando a ambos lados de la ecuación anterior por sC se obtiene:

$$LCs^2 + 1 = 0 \quad (2.47)$$

Resolviendo la ecuación anterior,

$$s = \sqrt{-\frac{1}{LC}} \quad (2.48)$$

Por lo tanto, esta ecuación tiene dos soluciones,

$$s_1 = j\sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad s_2 = -j\sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.49)$$

Donde $\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, es la frecuencia angular de resonancia o frecuencia angular del sistema y sus unidades son en [rad/seg], de esta manera la frecuencia natural o de resonancia del sistema es la siguiente y sus unidades están en Hertz.

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.50)$$

Por analogía, para el sistema SDOF masa-resorte equivalente al circuito LC serie la frecuencia natural del sistema es:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2.51)$$

Para visualizar el efecto que tiene el aumentar o disminuir las constantes m y K se observan las figuras a continuación:

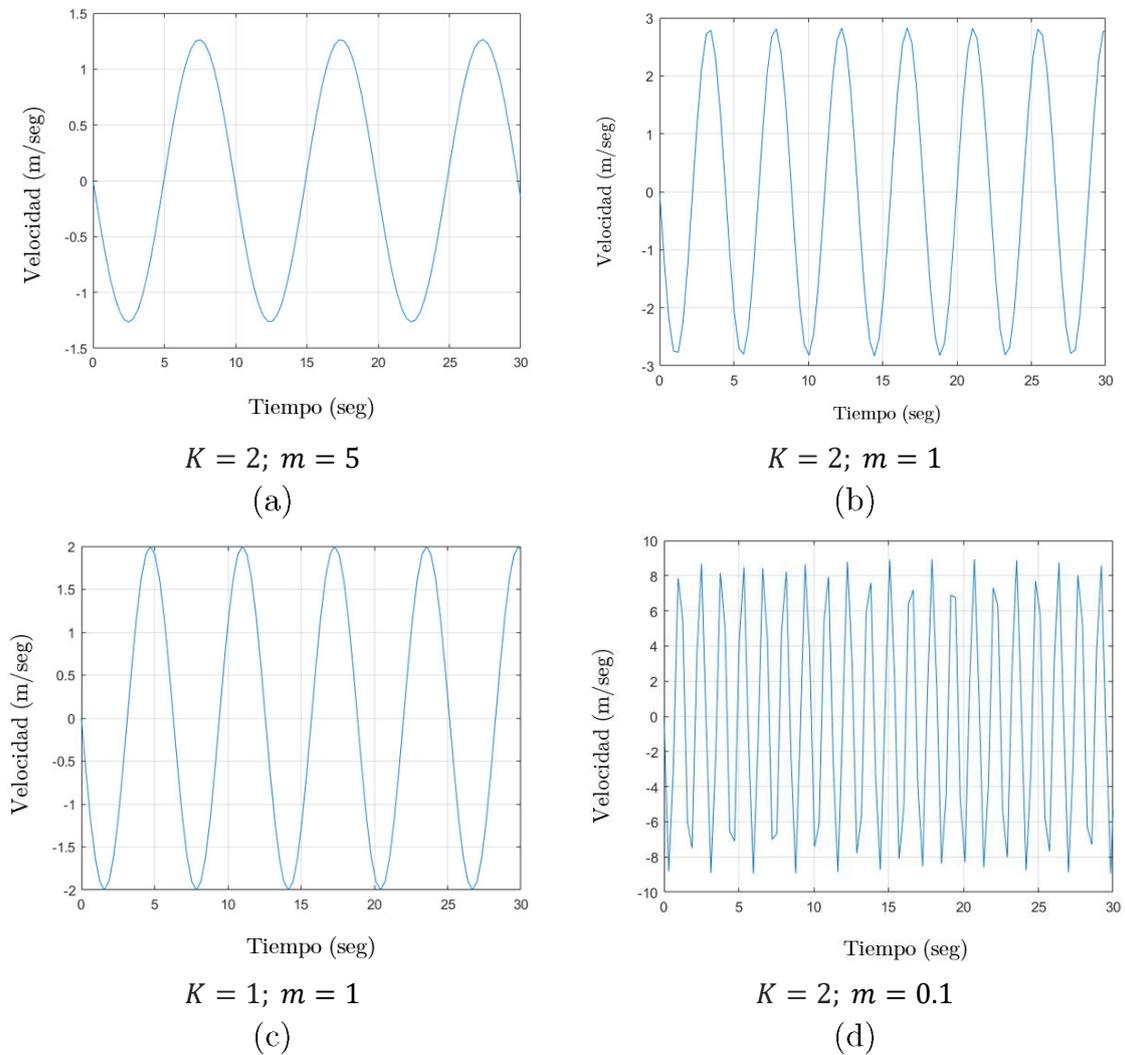


Figura 2.13 *Respuesta dinámica del sistema masa-resorte en el dominio del tiempo con respuesta de diferentes valores de m y K .*

En la Figura 2.13 se observa el comportamiento del sistema masa-resorte, además se muestra que las oscilaciones se mantienen a lo largo del tiempo, debido a que se asumió un sistema sin pérdidas por roce, la frecuencia de estas señales se puede calcular a partir de la ecuación 2.51.

Para el caso de estudio de la presente tesis se seleccionó la estructura de cantilever, la cual tiene una estrecha relación con el modelo masa-resorte, debido a la dinámica del sistema.

Referencias

- [1] Hecht, E. (2017). *Óptica* 5th edit.; Pearson Educación, Madrid, España.
- [2] Agrawal, G. P. (2008). *Fiber-Optic Communications Systems*; 4th edit.; Wiley-Interscience: London, UK.
- [3] Agrawal, G. P. (2013). *Nonlinear Fiber Optics*; Fifth Edit.; Elsevier.
- [4] Cherin, A. H. (1983). *An introduction optical fiber*; Fifth Edit.; McGraw-Hill.
- [5] Gloge, D. (1971). *Weakly guiding fibers*. *Applied optics*, 10(10), 2252-2258.
- [6] Stolen, R. H., Bjorkholm, J. E., & Ashkin, A. (1974). *Phase-matched three-wave mixing in silica fiber optical waveguides*. *Applied Physics Letters*, 24(7), 308-310.
- [7] Marcuse, D. (2013). *Theory of dielectric optical waveguides*. Elsevier.
- [8] Ghatak, A., Thyagarajan, K., & Thyagarajan, K. (1998). *An introduction to fiber optics*. Cambridge university press.
- [9] Buck, J. A. (2004). *Fundamentals of optical fibers* (Vol. 50). John Wiley & Sons.
- [10] R. Paschotta, (2008). *Article on 'multimode fibers' in the Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, 1. edition October, Wiley-VCH.
- [11] Q. Wang, G. Farrell, and W. Yan, (2008). *Investigation on Single-Mode–Multimode–Single-Mode Fiber Structure*, *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, pp. 512-519.
- [12] L. Coelho, J. Kobelke, K. Schuster, et. al. (2011). *Optical refractometer based on multimode interference in a pure silica tube*, *Opt. Eng. Letter*, vol. 50, pp. 100504.
- [13] Wang, K., Dong, X., Köhler, M. H., et. al. (2020). *Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (MMI): a review*. *IEEE Sensors Journal*, 21(1), 132-142.
- [14] Y. Gong, T. Zhao; R. Yun-Jiang and Y. Wu, (2011). *All-Fiber Curvature Sensor Based on Multimode Interference*, *IEEE Phot. Tech. Lett.*, vol. 23, pp. 679-681.

- [15] Castillo-Guzman, A., Selvas, R., Estudillo-Ayala, J. M., May-Arriola, et. al. (2008). *Telecomm tunable fiber laser based on multimode interference effect*. In 2008 Digest of the IEEE/LEOS Summer Topical Meetings (pp. 17-18). IEEE.
- [16] Mohammed, W. S., Smith, P. W., & Gu, X. (2006). *All-fiber multimode interference bandpass filter*. Optics letters, 31(17), 2547-2549.
- [17] Zhao, P., Chrostowski, J., & Bock, W. J. (1998). *Novel multimode coupler switch*. Microwave and Optical Technology Letters, 17(1), 1-7.
- [18] Grattan, K. T. V., & Sun, T. (2000). *Fiber optic sensor technology: an overview. Sensors and Actuators A: Physical*, 82(1-3), 40-61.
- [19] Carr, J. J. (1993). *Sensors and circuits: sensors, transducers, and supporting circuits for electronic instrumentation, measurement, and control*. Prentice Hall.
- [20] Kalantar-zadeh, K., & Fry, B. (2007). *Nanotechnology-enabled sensors*. Springer Science & Business Media.
- [21] J. Fraden, (2005). *Handbook of Modern Sensors*, Springer/AIP Press, vol. 23.
- [22] Mayergoyz, I. D. (2003). *Mathematical models of hysteresis and their applications*. Academic Press.
- [23] Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). *Operational modal analysis of civil engineering structures*. Springer, New York, 142, 143.
- [24] Matar, M., Parodi, M. A., Repetto, C. E., & Roatta, A. (2017). *Modelización lineal de un sistema masa-resorte real*. Revista Brasileira de Ensino de Física, 40.
- [25] Eryurek, E., & Upadhyaya, B. R. (1990). *Sensor validation in power plants using adaptive backpropagation neural network* (No. CONF-900143-39). Tennessee Univ., Knoxville, TN (United States). Dept. of Nuclear Engineering.
- [26] Soldano, L. B., & Pennings, E. C. (1995). *Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications*. Journal of light wave technology, 13(4), 615-627.
- [27] Pennings, E. C. M. (1990). *Bends in optical ridge waveguides: Modeling and experiments*.

[28] Soldano, L. B., Veerman, F. B., Smit, M. K., et. al. (1992). *Planar monomode optical couplers based on multimode interference effects*. Journal of Lightwave Technology, 10(12), 1843-1850.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Introducción

En este capítulo se estudiará el sensor de fibra óptica cuyo funcionamiento se basa en los principios de operación de la interferencia multimodal (MMI). El sensor totalmente de fibra consiste en una sección de SMF que actúa como entrada, empalmada a un segmento de MMF seguido de una sección de SMF que actúa como salida en el otro extremo, para ello se utilizó la técnica de empalme de arco eléctrico para fibras simétricamente diferentes. En este caso se utilizó fibra convencional SMF (para comunicaciones ópticas) modelo 630-HP y una fibra óptica MMF estándar modelo FG105LCA.

Por último, se presenta el diseño y desarrollo de un sensor de vibración, donde la respuesta de longitud de onda máxima de los dispositivos MMI es muy sensible a las variaciones de la longitud de la MMF, esto puede utilizarse para detectar los micro desplazamientos en vibraciones, dicho sensor se compone de tres elementos principales que son; la fuente de luz, la estructura de fibra óptica, los dispositivos de salida que son el detector y el Analizador de Espectro Óptico (OSA).

3.2. Configuración experimental

La respuesta del sensor de vibraciones MMI se caracterizó utilizando el montaje mostrado en la Figura 3.1. La luz de un LED de fibra acoplada que tiene una longitud de onda nominal de 625 nm se unió a la SMF (630-HP) de entrada, y la luz transmitida a través de el sensor MMI se propago por medio de la salida de la SMF (630-HP). La luz viaja a través del sensor dispuesto sobre el cantilever o viga en voladizo; se detectan los micro desplazamientos producidos y la información es observada y transmitida por medio de un OSA, conectado a una computadora (PC) para la recolección de datos y posterior análisis como se muestra a continuación en la Figura 3.1.

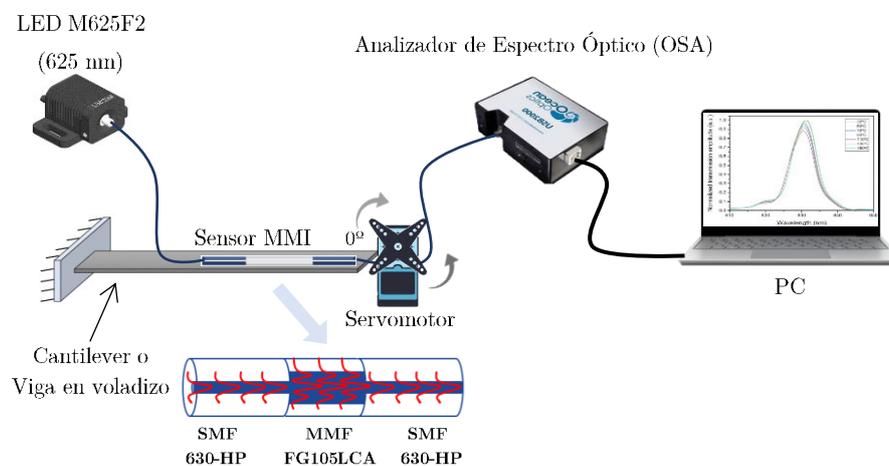


Figura 3.1 *Esquema de la configuración experimental con el Analizador de Espectro Óptico (OSA).*

Otra configuración experimental empleada es la que se observa en la Figura 3.2, en este caso se procedió a capturar datos por medio de un fotodetector, luego de la verificación de la información provenientes del OSA, debido a que se desea analizar las variaciones de voltaje a la salida, la información es transmitida y procesada por medio del fotodetector DET025AFC/M de Thorlabs, dichos datos son capturados por un osciloscopio que muestra gráficamente señales eléctricas y su cambio con respecto al tiempo, en nuestro experimento el osciloscopio será el encargado de almacenar los datos provenientes del sensor multimodal, dicho sensor envía una señal óptica hacia un transductor (fotodetector) el cual lleva la señal óptica a una señal eléctrica (tensión), para luego ser analizada y comparada en Matlab.

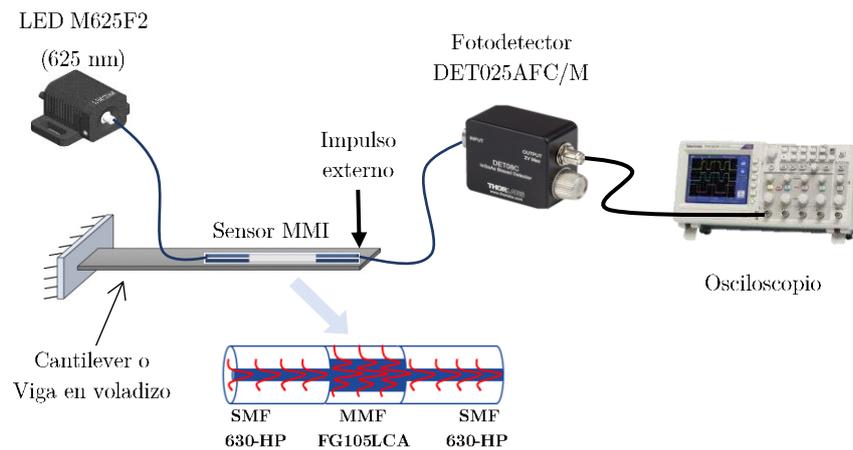


Figura 3.2 *Esquema de la configuración experimental con salida del fotodetector.*

3.2.1. Elementos de la configuración experimental

3.2.2. LED

El **diodo emisor de luz** o LED, como se le denomina comúnmente, es básicamente un tipo especializado de diodo, que producen luz no coherente (varias

longitudes de onda), y tienen características eléctricas similares a un diodo de unión PN lo que significa que por un LED fluirá corriente en dirección directa, pero bloqueará el paso de corriente en dirección inversa.

Los LED están fabricados de una capa dopada y muy delgada de material semiconductor, cuando se polariza un diodo led en directa, emitirá una luz de color en una longitud de onda espectral particular de acuerdo con el material semiconductor y la cantidad de dopaje.

Cuando los electrones de la banda de conducción de los semiconductores se recombinan con los huecos de la banda de valencia liberando suficiente energía para producir fotones que emiten una luz monocromática (de un solo color) el diodo está polarizado directamente. Debido a esta capa delgada, un número razonable de estos fotones pueden salir de la unión y emitir una salida de luz coherente.

Estos dispositivos electrónicos son capaces de emitir luz en el espectro visible (400 a 700nm) y el espectro no visible, en esta investigación se utilizó como fuente de luz un LED M625F2 de Thorlabs que se encuentra en el espectro visible con las características descritas en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 *Características del LED M625F2 de Thorlabs (datos tomados de la hoja de datos del fabricante [1]).*

Especificaciones	Valor
Color	Rojo
Longitud de Onda Nominal	625 nm
Corriente de prueba para la potencia típica del LED	1000 mA
Corriente Máxima	1000 mA
Ancho de banda (FWHM)	15 nm
Energía eléctrica	2200 mW
Vida útil típica	> 50000 h
Temperatura de funcionamiento (sin condensación)	0 a 40 °C
Temperatura de almacenamiento	-40 a 70 °C
Tamaño del emisor	1 mm × 1 mm

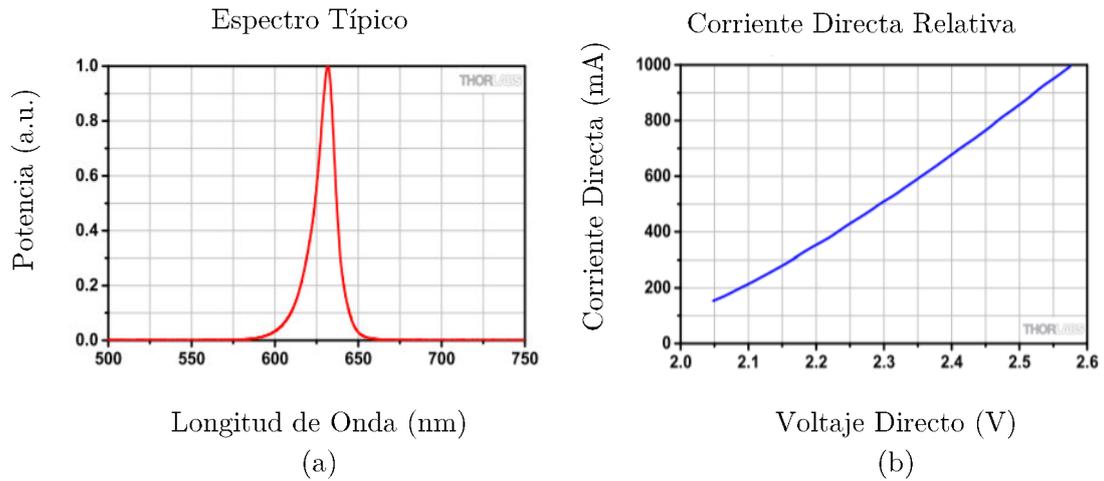


Figura 3.3 *Curvas características del diodo LED M625F2 de Thorlabs (gráficos tomados de la hoja de datos del fabricante [1]): (a) Espectro típico centrado en 625nm (b) Gráfica de corriente vs voltaje del LED.*

3.2.3. Analizador de espectro óptico (OSA)

Para este arreglo experimental se utilizó el analizador de espectro óptico de Ocean Optics USB2000+, que se comporta como un convertidor analógico-digital (A/D) con frecuencia de muestreo de 2MHz, de electrónica programable, está formado por un detector de matriz CCD de alta velocidad, que proporciona una resolución óptica de $0.1 - 10.0 \text{ nm}$.

El analizador de espectro óptico permite capturar, almacenar y monitorear cambios en intensidad y en longitud de onda de un espectro completo. Aun cuando este dispositivo tiene un alto costo es la mejor opción para caracterizar el sensor y, además, puede ser utilizado para aplicaciones en donde es necesario monitorizar reacciones rápidas como en el caso de la medición y detección de curvatura, vibraciones, entre otros.

Tabla 3.2 *Componentes del Espectrómetro USB2000+ (datos tomados de la hoja de datos del fabricante Ocean Optics [10]).*

Especificaciones Eléctricas		
Parámetro	Símbolo	Valor
Detector	–	Si
Área de activación Diámetro	–	Ø250µm
Rango de longitud de onda	λ	400 a 1100 nm
Pico de longitud de onda	λ_p	730 nm(Tip.)
Respuesta pico	$\mathfrak{R}(\lambda_p)$	0.46 A/W(Tip.)
Diodo Capacitancia	C_J	1.73pF(Max)
Ancho de banda (-3 dB)	–	2GHz
Tiempo de riso @ 653 nm, 20/80%	t_r	150ps(Tip.)
Tiempo de caída @ 653 nm, 80/20%	t_f	150ps(Tip.)
NEP (λ_p)@ 730 nm	–	$9.29 \times 10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$
Umbral de daño	–	18 mW
Tensión de polarización	V_R	12 V
Corriente oscura	I_D	35pA
Voltaje de salida	V_{out}	2 V(Max)

3.2.4. Fotodetector

Como receptor óptico se utilizó el fotodetector DET025AFC(/M) de Thorlabs, el papel fundamental de este elemento es convertir las señales ópticas a señales eléctricas además de recuperar los datos transmitidos, convierte una señal de luz a una señal eléctrica de corriente o voltaje por medio del efecto fotoeléctrico, en la Figura 3.4 se muestra curvas características del fotodetector. En muchos fotodetectores tales como fotoconductores y fotodiodos la conversión es típicamente obtenida por la creación de pares electrón-huecos, debido a la absorción de fotones, que forma parte de la creación de electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia [3].

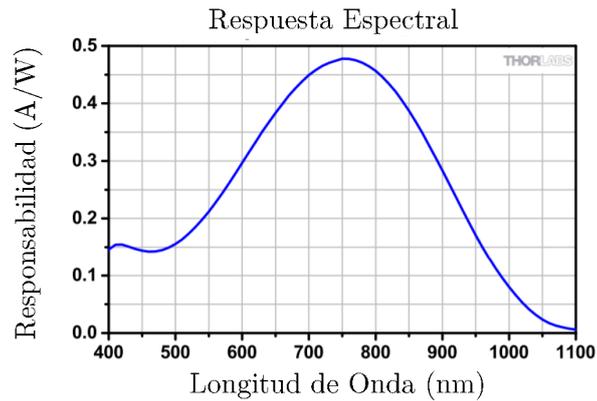


Figura 3.4 *Curvas características del fotodetector DET025AFC(/M) de Thorlabs (gráficos tomados de la hoja de datos del fabricante [2]).*

3.3. Fabricación de MMI

En primer lugar, la fabricación del sensor se basó en la configuración de un segmento de MMF que se empalma con una fibra óptica monomodo SMF (630-HP), que actúa como la entrada, mientras que el otro extremo del MMF se corta a una longitud específica. Este extremo de la MMF se une a una SMF (630-HP) mediante descargas eléctricas con una empalmadora convencional de arco eléctrico marca FITEL S175 V2000 controlada por un software con interfaz gráfica para obtener el MMI con las características propuestas.

El MMI utilizado en este trabajo fue fabricado con fibra monomodo SMF modelo 630-HP y un segmento de fibra óptica MMF estándar modelo FG105LCA. En la imagen de la Figura 3.5 se puede observar el esquema del empalme entre la fibra óptica SMF (630-HP) y la fibra óptica MMF siguiendo estos pasos:

1. Luego de haber realizado una limpieza previa de los puntos más expuestos de la empalmadora en la zona de fusión se procede a preparar ambos extremos de la fibra retirando cuidadosamente los residuos que puedan quedar en la misma. Se emplea una cortadora de precisión para realizar el corte de la fibra en la longitud y el ángulo adecuado. Las fibras ópticas SMF (630-HP) y MMF preparadas fueron situadas próximas a los electrodos y alienadas en ambos extremos, en la posición inicial (esta será la posición de referencia para medir algunos desplazamientos necesarios en los pasos siguientes) además, se utilizó el modo manual de la empalmadora para alinear las fibras. Luego las fibras fueron acopladas con un conjunto de instrucciones programadas y parámetros proporcionados por [11], para generar el menor daño posible en la estructura (ver Figura. 3.5 (a)).

2. Después se dispuso a obtener el MMI y en el otro extremo de la sección de fibra MMF se colocó la fibra óptica SMF (630-HP) en la posición D. La junta de empalme se movió de la posición inicial a lo largo de la distancia D utilizando nuevamente la empalmadora de fusión programada con los parámetros descritos por [11], (ver Figura. 3.5 (b)).

3. Después de este proceso se formó el filtro multimodal MMI (ver Figura. 3.5 (c)). Es importante mencionar que el procedimiento de empalme a la posición D, se realizó mediante el uso del modo manual de la empalmadora de fusión y el procedimiento de alineación de la empalmadora no se utilizó después de cada movimiento. En nuestro caso se elaboraron tres MMI de diferentes longitudes, estas fueron de 1.5 cm, 2.5 cm y 3.5 cm para ser comparadas en su desempeño y sensibilidad.

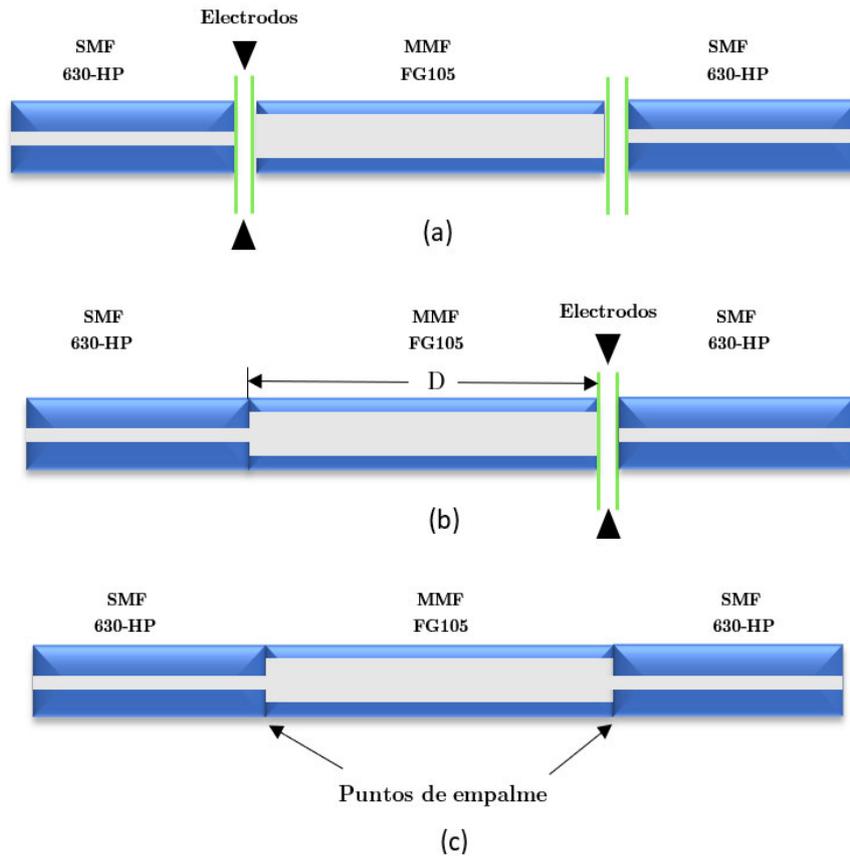


Figura 3.5 *Proceso de fabricación del MMI (a) Las fibras ópticas se ajustan en la posición inicial para recibir la descarga de los electrodos (b) Los electrodos se movieron hasta una distancia D de las fibras ópticas (c) Configuración del SMF-MMF-SMF del MMI.*

A continuación, se observa la pantalla de la empalmadora de fusión FITELE S175 V2000 antes y después de ser acoplada la fibra óptica, en la Figura 3.6 (a) se encuentra la empalmadora en funcionamiento manual y están ubicadas las secciones de fibra MMF y SMF (630-HP), la presente fotografía se encuentra representada gráficamente en la Figura 3.5 (b) descrita anteriormente, la Figura 3.6 (b) muestra el empalme luego de realizar la descarga de arco eléctrico, además se observa la diferencia de los

diámetros del núcleo de las fibras utilizadas en este caso a la izquierda se encuentra la fibra MMF y a la derecha esta la fibra SMF (630-HP), así como se indica en la imagen.



Figura 3.6 *Empalmadora FITELE S175 (a) Funcionamiento manual con las fibras MMF y SMF (b) Empalme completado MMF-SMF.*

3.4. Perfiles de distribución

Se utilizó un diodo LED (M625F2 de Thorlabs), con una longitud de onda nominal de 625 nm como fuente de luz. Una vez obtenida la transmisión de luz por el sensor de fibra óptica MMI, se visualizaron patrones de campo lejano que fueron detectados utilizando una cámara CCD, la cual adquiere los datos de intensidad desde un punto de luz uniforme que irradia la señal del sensor. La información se envía al software de procesamiento de datos que determina los valores de respuesta de todas las unidades de detección de la cámara. En la Figura 3.7 se observan las gráficas de transmisión donde se muestra la distribución de intensidad obtenida mediante un OSA, que corresponden al caso de estudio de los sensores MMI fabricados de 1.5 cm, 2.5 cm

y 3.5 cm respectivamente de donde se tomaron los perfiles de intensidad radial y los patrones de anillo captados por la cámara CCD que se muestran a continuación:

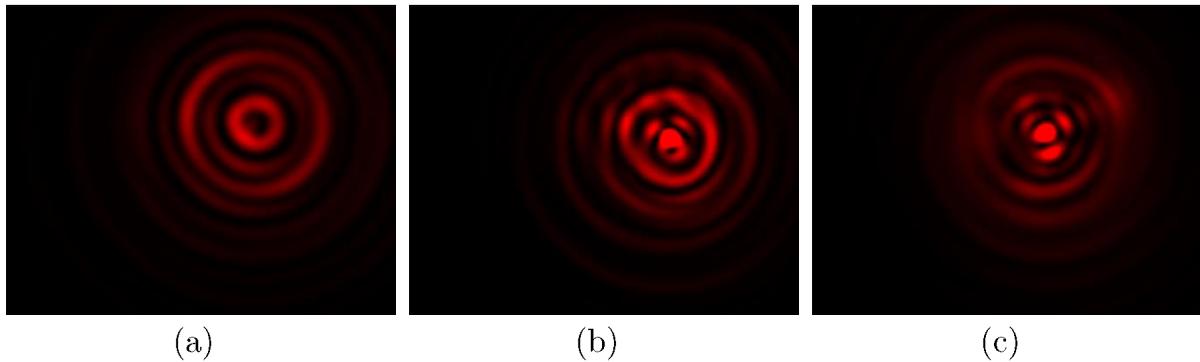


Figura 3.7 *Perfiles de distribución (a) Punto de luz en la superficie del MMI de 1.5 cm (b) Intensidad de la señal con ciertas distorsiones del MMI de 2.5 cm (c) Picos de la señal del MMI de 3.5 cm.*

3.5. Sensor de vibración

El efecto MMI en fibras ópticas obedece al principio de interferencia restringida simétrica, producido cuando se empalman una SMF (630-HP) a una MMF el campo se transmite exactamente en el centro del eje óptico del MMF. Los planos específicos donde se produce la concentración de campo y la autoimagen se determinan mediante el uso de aproximaciones analíticas, que se derivan de la fuente de luz proporcionada por una SMF (630-HP) que se empalma directamente a una sección de la MMF.

Para el cálculo de la longitud del sensor de vibración de fibra óptica MMI, se hizo uso de la ecuación 2.16 descrita en el capítulo 2, donde el valor del índice de refracción del núcleo correspondiente a la fibra utilizada es de $n_c = 1.4570$, el índice de refracción del revestimiento $n_{cl} = 1.4403$ y la longitud de onda de operación del

LED es de $\lambda = 0.625 \mu\text{m}$ sustituyendo los valores, se obtuvo el ancho efectivo de la guía de onda $W_{eff} = 105.8941 \mu\text{m}$, debido a que el índice efectivo es aproximadamente igual al índice del núcleo $n_{eff} \approx n_c$ por lo que utilizando la ecuación 2.17 se puede obtener el valor de la longitud crítica:

$$L_\pi = \frac{4W_{eff}^2 n_{eff}}{3\lambda_0} = \frac{4 * (105.8941)^2 * (1.4570)}{3 * (0.625 \mu\text{m})} = 0.03485 \text{ m} \approx 3.4 \text{ cm}$$

Debido al principio de autoimagen la interferencia simétrica o par presente en el MMI se hizo uso de la ecuación 2.24 con $P = 1$ y $N = 2$ dando como resultado que la longitud L óptima para propagación de imágenes individuales es de $L = P/N L_\pi = 1.729 \text{ cm} \approx 1.5 \text{ cm}$.

3.6. Modelo matemático de un cantilever

En la construcción de un modelo analítico de estructuras vibratorias se siguen dos pasos principales: formulación de la dinámica física de la estructura y solución de la formulación dinámica.

La dinámica de la estructura se describe mediante la formulación matemática que forman ecuaciones de movimiento para sistemas de parámetros distribuidos, como los cantilever flexibles y se dan normalmente en forma de ecuaciones diferenciales parciales.

Los cantilever son elementos que se encuentran en un único punto de apoyo, normalmente con un soporte fijo [12]. Para garantizar que la estructura es estática, el apoyo debe ser estable; lo que significa que es capaz de soportar las fuerzas y momentos

en todas sus direcciones. Un cantilever se suele modelar como se muestra en la Figura 3.8:

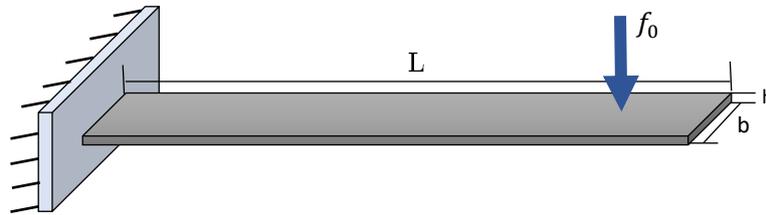


Figura 3.8 *Características principales de un cantilever.*

Donde f_0 es la fuerza aplicada, L es la longitud del cantilever, b representa el ancho y h representa la altura, donde b y h forman parte de la sección transversal.

Para nuestro caso de estudio, el cantilever está representada por diferentes características dispuestas en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3 *Características del cantilever.*

Características del cantilever	Símbolo	Valor
Modulo elástico	E	$2.06e11 \text{ Nw/m}^2$
Ancho	b	6 mm
Alto	h	0.42 mm
Longitud	L	153 mm
Densidad (Acero SK5)	ρ	7840 kg/m^3

Para dar solución al modelo del cantilever se recurrió a utilizar la teoría de vigas de Euler-Bernoulli, la cual es simplifica la teoría elástica lineal. El modelo matemático que describe el momento de flexión esta descrito por [6,7]:

$$EI \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2)$$

Donde la función $M(x)$ se conoce como momento flector y representa el momento de las fuerzas aplicadas sobre el cantilever y se define como,

$$M(x) \approx EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} \quad (3.3)$$

Sustituyendo la ecuación 3.3 en la ecuación 3.2 se obtiene [6],

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (3.4)$$

Donde E es el módulo de elasticidad lineal (o módulo de Young) que depende de las propiedades elásticas del material, I es el momento de inercia de la sección transversal respecto al centro, ρ es la densidad de flexión, y A es el área $A = h * b$. La ecuación 3.2 describe las oscilaciones de un cantilever con respecto a su posición de equilibrio, dicha ecuación es homogénea y lineal, además la ecuación 3.3 define el momento de deflexión según la teoría de Euler Bernoulli.

Para iniciar el análisis se asume que existe una solución separable, es decir:

$$v(x, t) = V(x, t) \quad (3.5)$$

$$V(x, t) = V(x)P(t) \quad (3.6)$$

Donde $V(x)$ representa una función dependiente solo de x , por otro lado $P(t)$ dependerá exclusivamente de t (variable temporal). Es importante asumir que todos

los puntos del cantilever presentan la misma dependencia con respecto al tiempo. Finalmente podemos reescribir la ecuación 3.2 como:

$$\frac{1}{P(t)} \frac{\partial^2 P(t)}{\partial t^2} = -\frac{EI}{\rho AV(x)} \frac{\partial^4 V(x)}{\partial X^4} = \phi \quad (3.7)$$

Donde ϕ es una constante que por lo general en la literatura se define como [8,9]:

$$\phi = -\omega^2 \quad (3.8)$$

Sustituyendo en la ecuación 3.7 obtenemos,

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \omega^2 P = 0 \quad (3.9)$$

Y remplazando en la ecuación 3.7,

$$EI \frac{\partial^4 V}{\partial X^4} - \rho A \omega^2 V = 0 \quad (3.10)$$

En la Figura 3.9 se observa la simulación en Matlab de la ecuación diferencial encontrada en la ecuación 3.10 y se representa el comportamiento frente al tiempo $t=0,5$ para la oscilación del sistema ante una excitación externa.

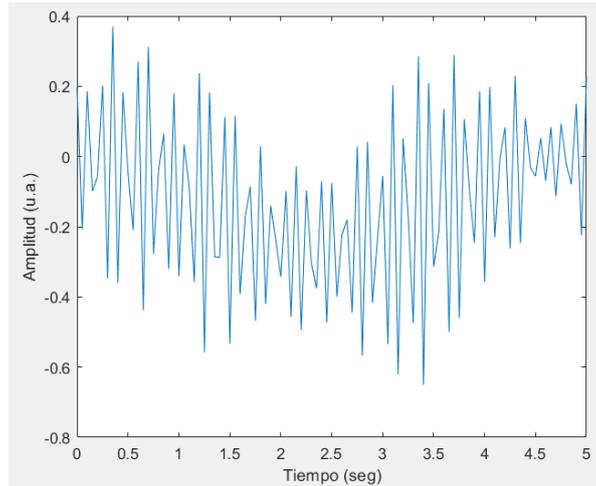


Figura 3.9 *Oscilación del sistema de vibración.*

Luego se realiza el despeje de la ecuación 3.10,

$$\frac{\partial^4 V}{\partial X^4} = \frac{\rho A \omega^2}{EI} V \quad (3.11)$$

y haciendo un cambio de variable,

$$\beta^4 = \frac{\rho A \omega^2}{EI} \quad (3.12)$$

La solución de la ecuación 3.10 es,

$$V(x) = C_1 \text{Cosh}(\beta x) + C_2 \text{Senh}(\beta x) + C_3 \text{Cos}(\beta x) + C_4 \text{Sen}(\beta x) \quad (3.13)$$

Asumiendo condiciones de frontera iguales a:

$$V(0) = 0, V'(0) = 0, V''(L) = 0, V'''(L) = 0 \quad (3.14)$$

obtenemos,

$$\begin{bmatrix} \text{Cosh}(\beta L) + \text{Cos}(\beta L) & \text{Senh}(\beta L) + \text{Sen}(\beta L) \\ \text{Senh}(\beta L) - \text{Sen}(\beta L) & \text{Cosh}(\beta L) - \text{Cos}(\beta L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

La solución de la ecuación 3.15 proporciona una serie de soluciones de βL , la cual se describe en la siguiente ecuación:

$$\text{Cosh}(\beta L)\text{Cos}(\beta L) = -1 \quad (3.16)$$

Al sustituir el valor de $\beta_n L$ se obtiene la frecuencia natural del sistema, las cuales se definen como [6]:

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad (3.17)$$

La ecuación 3.17 se puede resolver numéricamente mediante el análisis modal de vibraciones libres donde las primeras cuatro raíces de $\beta_n L$ están definidas por: $\beta_1 L = 1.50562\pi$, $\beta_2 L = 2.49975\pi$, $\beta_3 L = 3.50001\pi$, $\beta_4 L = 4.5\pi$. Esta ecuación no lineal es la que nos permitirá verificar el buen funcionamiento de nuestro sensor, al comparar el resultado experimental (datos capturados con el fotodetector) contra los resultados teóricos, mostrados en el capítulo siguiente.

Referencias

- [1] Copyright © 1999-2022 Thorlabs, Inc. *M625F2 - 625 nm, 13.2 mW (Min) Fiber-Coupled LED*, 1000 mA, SMA.
- [2] Copyright © 1999-2022 Thorlabs, Inc. *DET025AFC/M - 2 GHz Si FC/PC-Coupled Photodetector*, 400 -1100 nm, M4 Tap.
- [3] González González, G. (2016). *Estudio y simulación de receptores ópticos mediante ejercicios demostrativos* (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones).
- [4] Taheri Ghahrizjani, R.; Sadeghi, H.; Mazaheri, A. A (2016), *Novel Method for online Monitoring Engine Oil Quality Based on Tapered Optical Fiber Sensor*. IEEE Sens. J., 16, 3551–3555.
- [5] Tian, Y., Wang, W., Wu, N., Zou, X., & Wang, X. (2011). *Tapered optical fiber sensor for label-free detection of biomolecules*. Sensors, 11(4), 3780-3790.
- [6] Villalobos, D. J., Correa, J. C. J., Pérez, A. M., et. al. (2009). *Modelado matemático de una viga en voladizo por la ecuación de Euler-Bernoulli*. Memorias del XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Sonora. México.
- [7] Russell C. Hibbeler (1994), *Mecánica de materiales*, 1er edición, editorial CECSA.
- [8] William T. Thomson (1982), *Teoría de las vibraciones: aplicaciones*, primera edición en español, Prentice-Hall Hispanoamérica S. A.
- [9] De Silva, C. W. (Ed.). (2005). *Vibration and shock handbook*. CRC press.
- [10] Copyright © 2010 Ocean Optics, Inc. USB2000+ Fiber Optic Spectrometer.
- [11] Jáuregui-Vázquez, D., Estudillo-Ayala, J. M., Rojas-Laguna, et. al. (2013). *An all fiber intrinsic Fabry-Perot interferometer based on an air-microcavity*. Sensors, 13(5), 6355-6364.
- [12] Fritz, J. (2008). *Cantilever biosensors*. Analyst, 133(7), 855-863.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante pruebas de curvatura con la finalidad de validar los cambios de intensidad presentes en las mediciones obtenidas por el filtro multimodal (MMI). La mayoría de los sensores de curvatura de fibra óptica se basan en la modulación de intensidad, por lo que en el presente trabajo se contó con una estructura de fibra óptica que altera las pérdidas de transmisión a medida que se aplica la curvatura. Esto implica un proceso de demodulación simple, sin embargo, estas técnicas son sensibles a las fluctuaciones de la fuente de energía. En este trabajo, se propone y demuestra el funcionamiento de un sensor de vibraciones de fibra óptica en el rango del espectro visible (625 nm), se basa en una estructura del tipo sándwich modal que consiste en una fibra monomodo y una fibra óptica multimodo como se explicó en el capítulo anterior. Esta estructura es excitada por una fuente de baja coherencia para lograr interferencias a la salida del sensor. Se puede inferir que este dispositivo es versátil debido a los elementos involucrados y puede emplearse en un entorno real donde se requiere detección de vibraciones.

Una vez realizado el experimento para detectar la frecuencia natural es importante considerar que la viga tiene las posiciones mostradas en la Figura 4.1 donde se observa que la viga tiene tanto curvatura, como flexión, por lo tanto, la caracterización para validar el dispositivo se debe realizar de la siguiente forma: primero analizar la curvatura y segundo analizar los puntos de flexión de la viga.

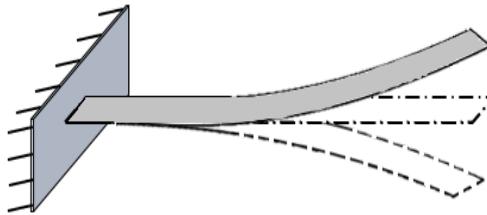


Figura 4.1 *Frecuencia natural de un cantilever.*

4.2. Sensor de curvatura

El sensor fabricado para la medición de curvatura se puede dividir en tres secciones: la sección inicial es una fibra monomodo SMF (630-HP) con un diámetro de núcleo de $3,5 \mu\text{m}$. Esta fibra se utiliza para guiar una señal de un LED con una longitud de onda centrada en 625 nm (M625F2 de Thorlabs). Como resultado, se transmite una señal con un perfil cuasi gaussiano a la segunda sección del filtro multimodal de baja coherencia. Esta sección está compuesta por una fibra multimodo con un diámetro de núcleo de alrededor de $105 \mu\text{m}$ MMF FG105LCA con una longitud L cercana a los $1,5 \text{ cm}$, donde se excitan varios modos de orden superior como se puede observar en la Figura 4.2. La última parte de la estructura de fibra óptica es una sección SMF-630-HP y es donde la luz se acopla nuevamente.

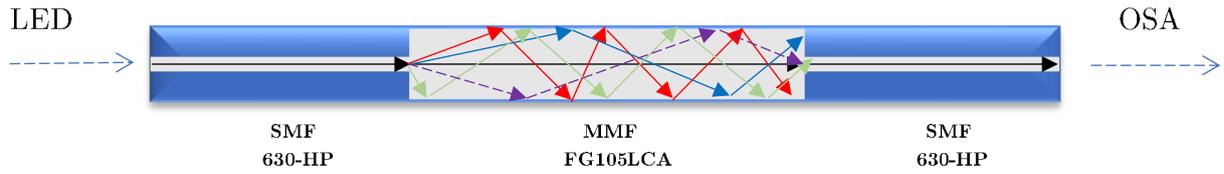


Figura 4.2 *Excitación de los modos en el núcleo de la fibra.*

La primera sección de fibra óptica y la fuente LED garantizan la generación de modo fundamental.

La interacción entre el modo fundamental y los modos de alto orden proporciona una respuesta de interferencia gobernada por la siguiente ecuación:

$$I(\lambda) = \sum_{n=1,N} I_n + 2 \sum_{n < m=1,N} \sqrt{I_n * I_m} \cos \phi_{nm} \quad (4.1)$$

donde I_n y I_m representan la amplitud de los modos implicados, la fase ϕ_{nm} se expresa por $\phi_{nm} = \Delta\beta_{nm} * D$. La diferencia efectiva del índice de refracción $\Delta\beta_{nm}$ depende de la constante de propagación $\beta_m(\lambda)$, del modo de la fibra que se propaga a través de la fibra óptica multimodo. Cada modo en esta región tiene una constante de propagación diferente $\beta_m(\lambda)$ y la interacción de las amplitudes modales produce espectros constructivos y destructivos. La constante de propagación se puede expresar como:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} n_m(\lambda), \quad m = 1, 2, \dots \quad (4.2)$$

donde $n_m(\lambda)$ es el índice de refracción del modo efectivo, y m es el número de modos.

Este espectro se rige por la diferencia de fase de modos involucrados en la fibra central multimodo y esta diferencia de fase puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Delta\phi_{xy} = (\beta_x(\lambda) - \beta_y(\lambda))L. \quad (4.3)$$

4.3. Configuración experimental del sensor de curvatura

Un diodo rojo súper brillante (M625F2 de Thorlabs) y un analizador de espectro óptico (USB2000+, Ocean Optics, descrito en el capítulo 3), fueron unidos por el filtro multimodal (MMI) con una configuración en línea. El diodo fue operado a una corriente máxima de 900 mA y voltaje máximo alrededor de 12 v. El esquema de la configuración experimental utilizada se muestra en la Figura 4.3.

La aplicación de detección de curvatura se controló colocando el MMI sobre un cantilever de acero SK5 sujetado en ambos extremos, utilizando un adhesivo especial, la longitud total para el control de la curvatura es de 1350 mm (2L). Luego, mediante el uso de un micrómetro, se controló el desplazamiento (z).

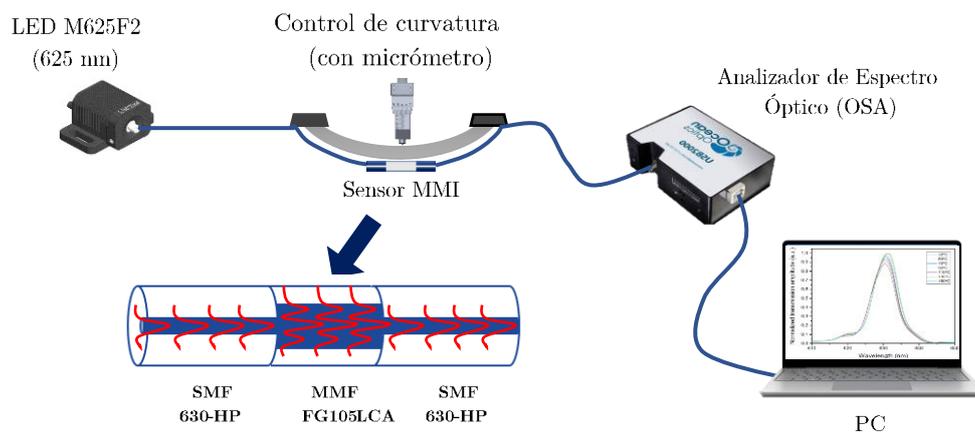


Figura 4.3 Esquema de la configuración experimental para detección de curvatura.

Además, la curvatura se calculó por la relación:

$$C = \frac{2z}{(L^2 + z^2)} \quad (4.4)$$

Por lo tanto, la curvatura se varió de 0 a $0,625 \text{ m}^{-1}$ por pasos micrométricos alrededor de $0,025 \text{ mm}$. A medida que se aplica la curvatura, la potencia de la señal disminuye. Aquí, la longitud de onda máxima centrada en 630 nm permanece casi constante de 0 a $0,425 \text{ m}^{-1}$. Después de $0,425 \text{ m}^{-1}$, el pico comienza a desplazarse hacia los 625 nm . Al mismo tiempo, el pico también disminuye su amplitud; aquí, la señal disminuye casi un 90% de su intensidad inicial. Es importante destacar que la curvatura máxima aplicada es de $0,625 \text{ m}^{-1}$ (ver Figura. 4.4).

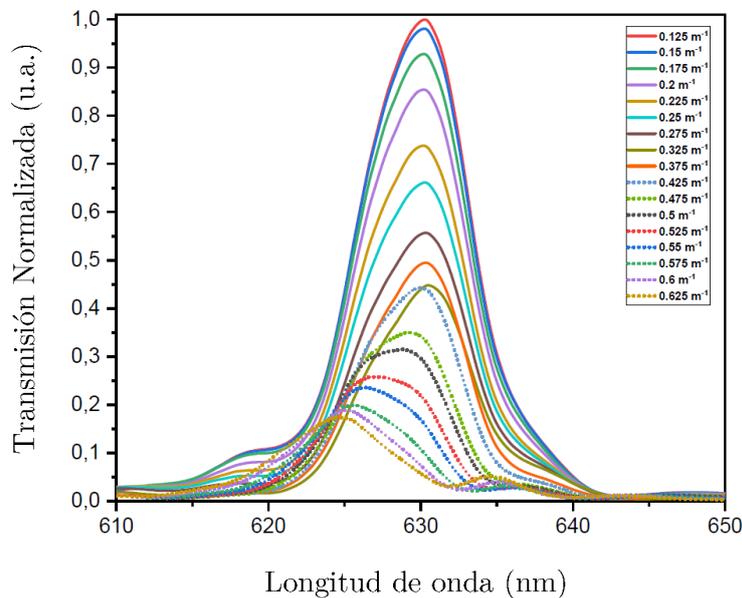


Figura 4.4 Variación de la transmisión con respecto a la curvatura.

La sensibilidad se analiza en diferentes rangos debido al cambio de longitud de onda, luego el primer rango de curvatura exhibe una sensibilidad cercana a -0.53009 u.a./ m^{-1} , el segundo tramo de -0.1027 u.a./ m^{-1} y un tercer tramo de -0.19442 u.a./ m^{-1} . Este análisis de sensibilidad se muestra en la Figura 4.5.

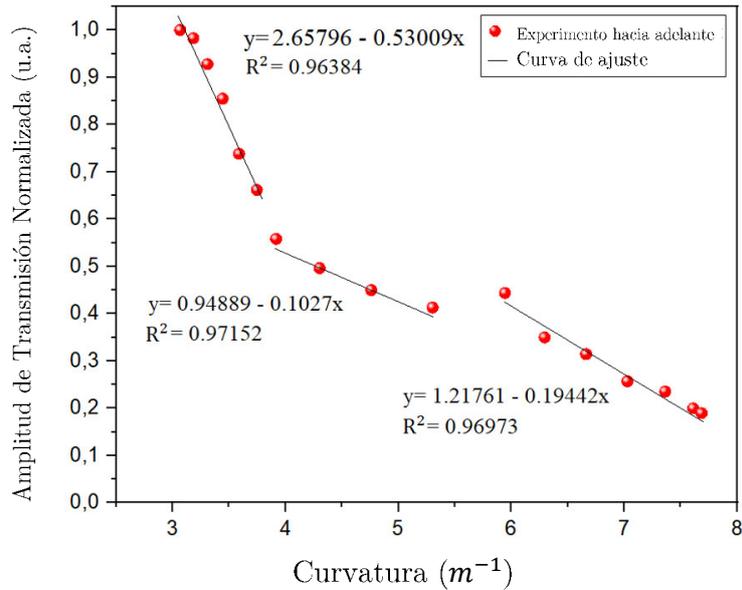


Figura 4.5 *Análisis de sensibilidad del sensor de curvatura.*

Teniendo en cuenta la sensibilidad y el proceso de demodulación más simple, solo se considera la modulación de intensidad. Es importante mencionar que las unidades de intensidad arbitraria (u.a.) se consideran para todo el análisis debido a que el OSA proporciona una transmisión de intensidad relativa.

El análisis de histéresis mostrada en la Figura 4.6 indica una diferencia mínima de trayectoria en la dirección hacia adelante y hacia atrás.

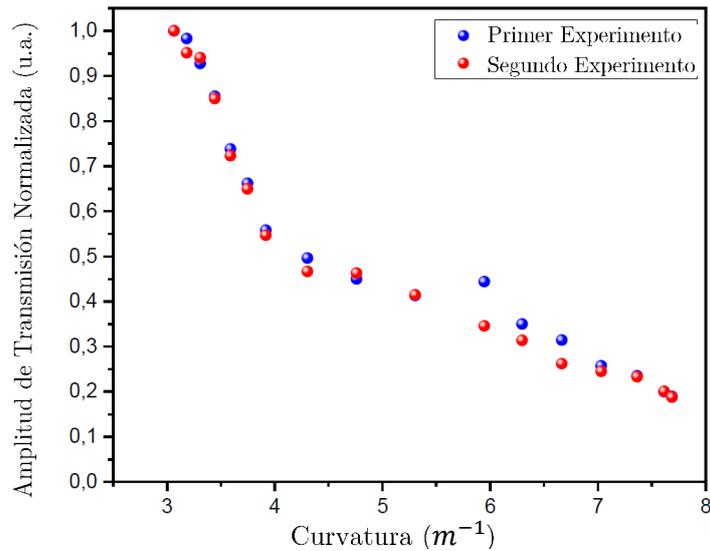


Figura 4.6 *Análisis de histéresis del sensor de curvatura.*

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos en las pruebas de curvatura se presenta una mejor respuesta a la modulación por intensidad, por lo cual se procede a analizar, la respuesta en flexión.

4.4. Configuración experimental del sensor de vibración

Se empleo el esquema de la Figura 4.7 el cual consta de un segmento de fibra sobre una lámina de hierro la cual se sometió a diversos desplazamientos por medio de un servomotor. Se partió desde un punto inicial el cual corresponde a cero grados de desplazamiento, se realizó un barrido con pasos de un grado en ascenso hasta llegar a los 8 grados; de igual forma se realizó el barrido en descenso hasta llegar a -8 grados. El objetivo del experimento es observar el espectro que se produce para cada segmento de sensor MMI construido (1,5 cm, 2,5 cm, 3,5 cm), y de esta forma seleccionar el sensor con mejores resultados.

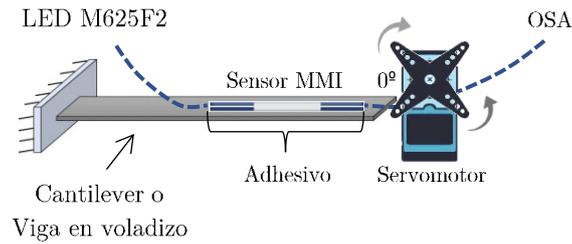


Figura 4.7 Arreglo experimental con servomotor y cantilever.

4.4.1. Filtro multimodal MMI de 1.5 cm

En la Figura 4.8 se observa el espectro obtenido del MMI de 1.5 cm, donde se puede ver las variaciones en intensidad y desplazamientos por longitud de onda. Se sometió el cantilever a desplazamientos verticales con variaciones de -8° a 8° con tamaño de paso de 1° . A medida que el desplazamiento aumenta, la potencia de la señal disminuye. La longitud de onda máxima centrada en 629 nm permanece casi constante para valores de grados negativos con respecto a la referencia, es decir, de -8° a 0° . Para valores de grados positivos, el pico comienza a desplazarse en longitud de onda hacia 621 nm aproximadamente. Al mismo tiempo, el pico también disminuye en su amplitud. Para la validación del experimento se inició el servomotor en su posición de 8° y se procedió a hacer un descenso hasta -8° (ver Figura 4.8 (a)) luego se ubicó el servomotor en -8° y se realizó un ascenso hasta 8° (ver Figura 4.8 (b)), dando como resultado la repetibilidad de ambos experimentos realizados con una sensibilidad de $0.068 \text{ u.a./}^\circ$, donde se mantienen el mismo comportamiento de cambios en intensidad y desplazamientos en longitud de onda.

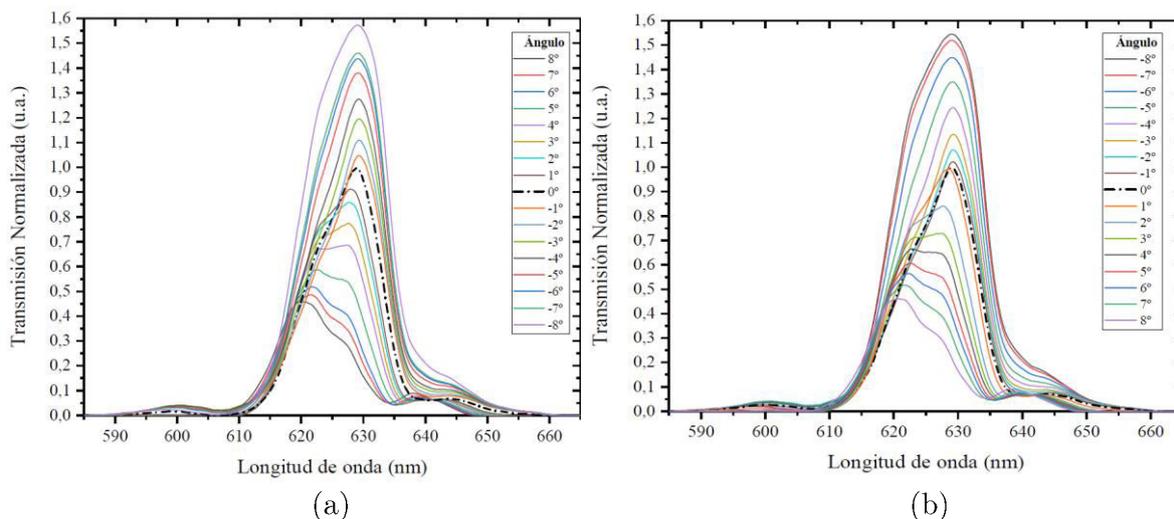


Figura 4.8 Variación de la transmisión normalizada con respecto a la longitud de onda del MMI de 1.5 cm (a) Ascenso (b) Descenso.

La curva característica de la histéresis mostrada en la Figura 4.9, fue modelada con mediciones de ángulos en ascenso y descenso obteniendo una desviación máxima de 0.9×10^{-3} u.a. en la posición de 1° .

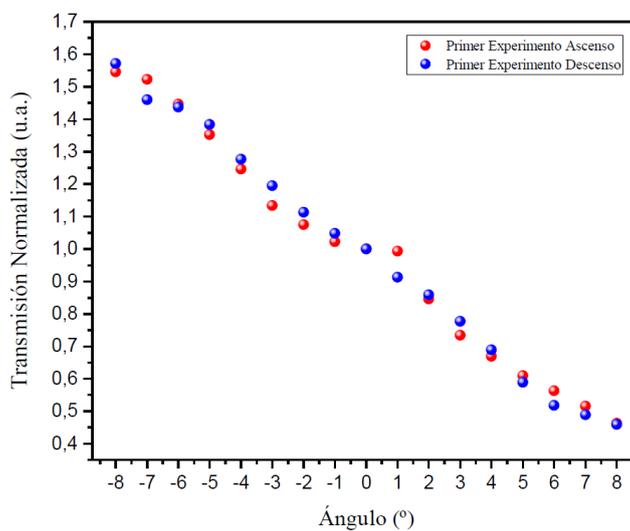


Figura 4.9 Análisis de histéresis del MMI de 1.5 cm.

El desplazamiento aprox. de 629 nm a 621 nm depende de las constantes de propagación y de la diferencia de índice de refracción efectivo, las longitudes de onda para grados negativos permanecen constantes hasta llegar a la referencia, de una forma que no afecta la longitud de onda central del filtro MMI.

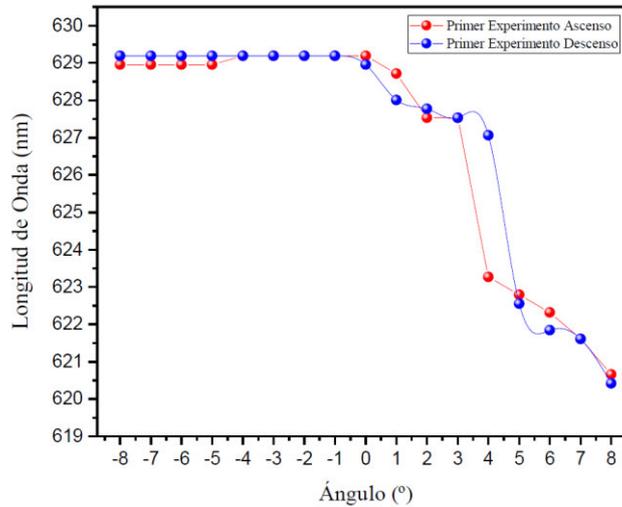


Figura 4.10 *Análisis de longitud de onda vs ángulo del MMI de 1.5 cm.*

4.4.2. Filtro multimodal MMI de 2.5 cm

En la Figura 4.11 se tiene el filtro multimodal MMI de 2.5 cm, se muestra el espectro obtenido, donde se pueden notar las variaciones en intensidad y desplazamientos por longitud de onda. Se sometió el cantilever a desplazamientos verticales con variaciones de -8° a 8° con tamaño de paso de 1° . A medida que el desplazamiento va en ascenso, la potencia de la señal disminuye. La longitud de onda máxima está centrada entre 624 nm y 626 nm, para los grados de -8° a 0° , además, se produce otro pico a la salida como se observa en la gráfica que hay dos picos de intensidad. Para valores de grados positivos, el pico comienza a desplazarse en longitud de onda hacia 621 nm aproximadamente, al mismo tiempo, también disminuye en su amplitud.

Para la validación del experimento se inició el servomotor en su posición de 8° y se procedió a hacer un descenso hasta -8° (ver Figura 4.12 (a)) luego se ubicó el servomotor en -8° y se realizó un ascenso hasta 8° (ver Figura 4.12 (b)), dando como resultado la repetibilidad de ambos experimentos realizados donde se mantienen el mismo comportamiento de cambios en intensidad y desplazamientos en longitud de onda.

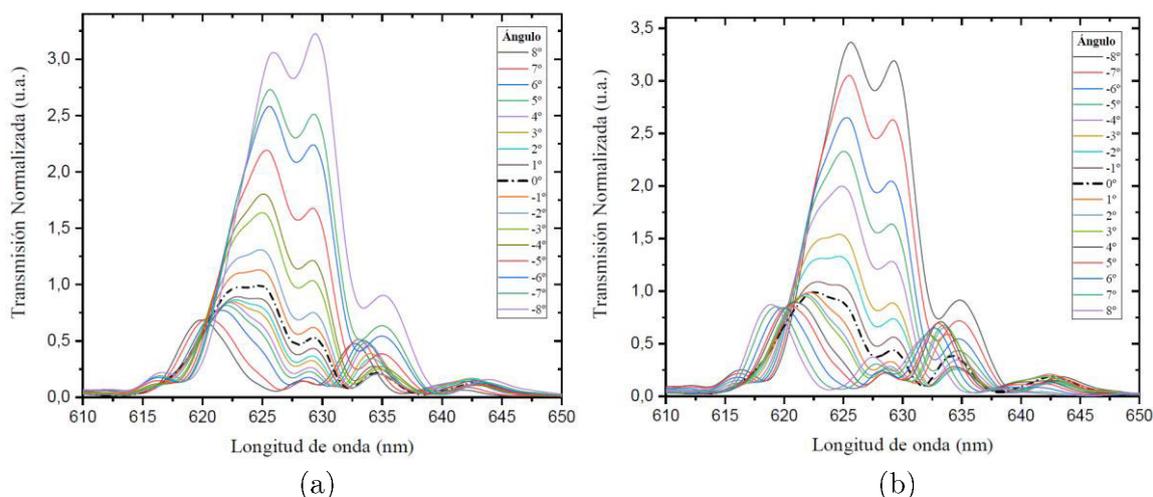


Figura 4.11 Variación de la transmisión normalizada con respecto a la longitud de onda del MMI de 2.5 cm (a) Ascenso (b) Descenso.

El análisis de histéresis mostrada en la Figura 4.12 indica una trayectoria de la medición en ascenso y descenso donde se observa que para valores de -8° a 0° se tiene una pendiente negativa que representa un decremento de la transmisión, para el ángulo de -7° se tiene una desviación máxima de $0.31 u. a.$ además, se observa una sensibilidad de $0.288 u. a./\circ$ (entre -8° a 0°) y $0.025 u. a./\circ$ (entre 0° a 8°).

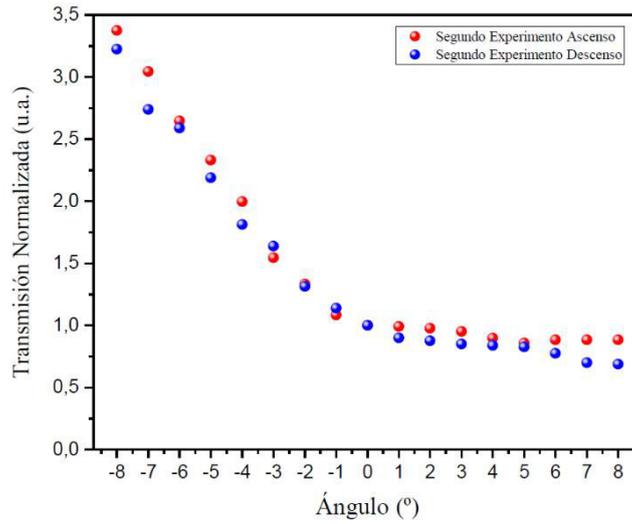


Figura 4.12 *Análisis de histéresis del MMI de 2.5 cm.*

El desplazamiento se encuentra aproximadamente entre valores de 626 nm a 619 nm con un desplazamiento de 7 nm en total, a partir de -2° hasta 8° se observa la mayor disminución en longitud de onda de aprox. 5.5 nm.

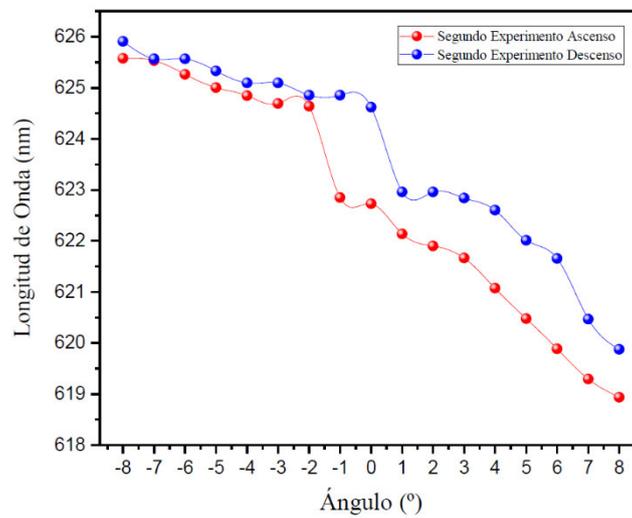


Figura 4.13 *Análisis de longitud de onda vs ángulo del MMI de 2.5 cm.*

4.4.3. Filtro multimodal MMI de 3.5 cm

La Figura 4.14 muestra el espectro obtenido al realizar el experimento con un MMI de 3.5 cm, donde se pueden ver las variaciones en intensidad y desplazamientos por longitud de onda. El arreglo se sometió a desplazamientos en grados con variaciones desde -8° hasta 8° con tamaño de paso de 1° . Al igual que en los casos anteriores de 1.5 cm y 2.5 cm a medida que el desplazamiento aumenta, la potencia de la señal disminuye. Se observa la formación de dos máximos centrados en 632.5 nm y otro de menor intensidad en 624 nm. Para la validación del experimento se inició el servomotor en su posición de 8° y se procedió a hacer un descenso hasta -8° (ver Figura 4.14 (a)) luego se ubicó el servomotor en -8° y se realizó un ascenso hasta 8° (ver Figura 4.14 (b)), dando como resultado la repetibilidad de ambos experimentos realizados con una sensibilidad de $0.627 \text{ u.a./}^\circ$ (entre -8° a -4°), de $0.165 \text{ u.a./}^\circ$ (entre -4° a 4°) y de $0.075 \text{ u.a./}^\circ$ (entre 4° a 8°).

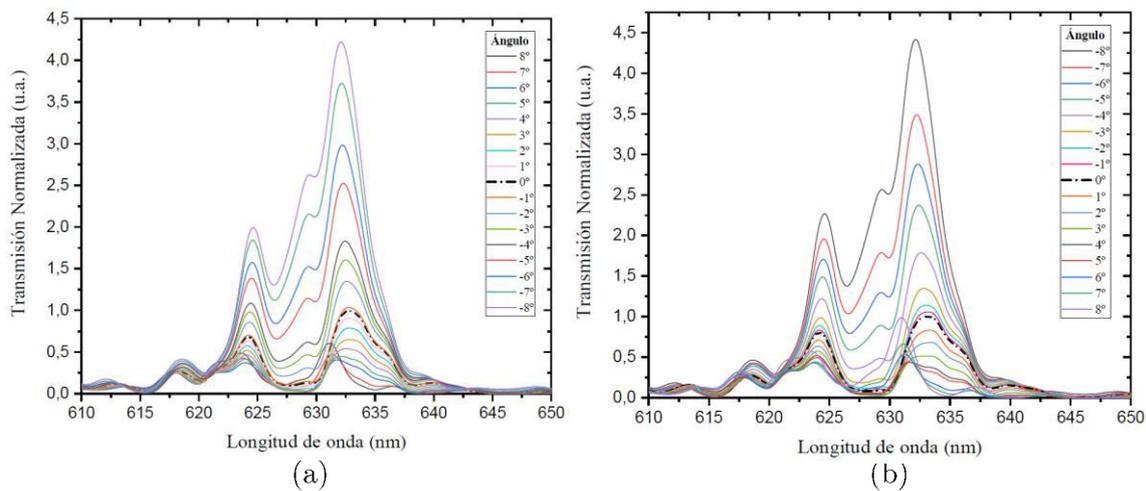


Figura 4.14 Variación de la transmisión normalizada con respecto a la longitud de onda del MMI de 3.5 cm (a) Ascenso (b) Descenso.

La Figura 4.15 muestra el análisis de la histéresis la cual indica una trayectoria de la medición en ascenso y descenso del MMI de 3.5 cm, con una desviación máxima de 0.35 *u.a.* para un ángulo de 8°.

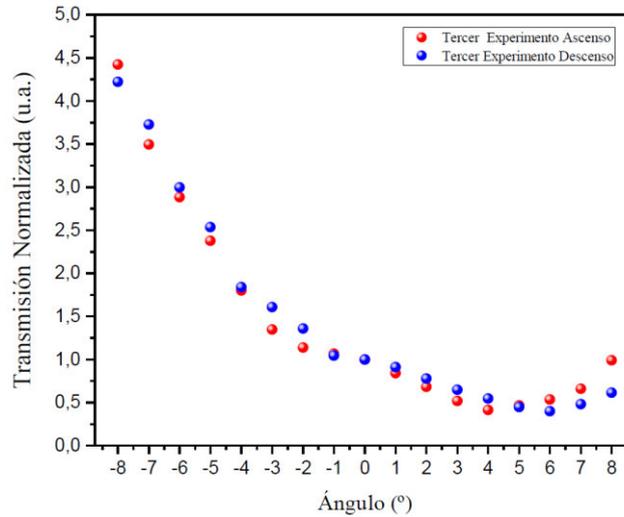


Figura 4.15 *Análisis de histéresis del MMI de 3.5 cm.*

En la Figura 4.16 se muestra análisis de longitud de onda vs ángulo del MMI de 3.5 cm y se observa un desplazamiento entre de 630.9 nm a 633.3 nm con un desplazamiento de 2.4 nm en total, con un máximo de longitud de onda entre los 1° y 2°.

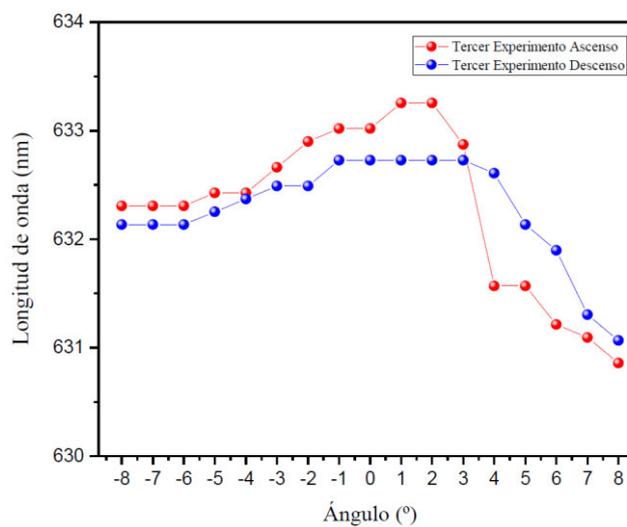


Figura 4.16 *Análisis de longitud de onda vs ángulo del MMI de 3.5 cm.*

En el punto mayor y menor de flexión se observa nuevamente una variación de intensidad, a pesar de que los dispositivos muestran pequeñas variaciones en la longitud de onda el efecto predominante es una modulación de intensidad pasando de un voltaje mayor cuando el ángulo cambia a valores positivos y un voltaje menor cuando la potencia se encuentra en una flexión negativa.

En este apartado procederemos a analizar la respuesta en temperatura para garantizar que durante ambas posiciones de curvatura y flexión la medición no se va a ver afectada.

4.5. Respuesta de temperatura del sensor

Para medir la sensibilidad a la temperatura, se realizó un estudio térmico, donde el MMI se colocó sobre una placa caliente como se observa en el esquema de la Figura 4.17, donde se aumentó de forma gradual y se fue variando la temperatura en intervalos de 20 °C.



Figura 4.17 *Esquema de la configuración experimental de la respuesta de temperatura del sensor.*

La temperatura se varió de 30 °C a 150 °C y la respuesta térmica obtenida en la Figura 4.18 muestra un desplazamiento de longitud de onda de 631 nm a 630 nm, lo que resulta en una sensibilidad de longitud de onda mínima de $6.99 \times 10^{-3} \text{ nm} / ^\circ\text{C}$. Además, la variación de intensidad en este caso puede ser ignorada debido a que es un valor muy pequeño y no es representativo con respecto a la aplicación de curvatura y flexión dada.

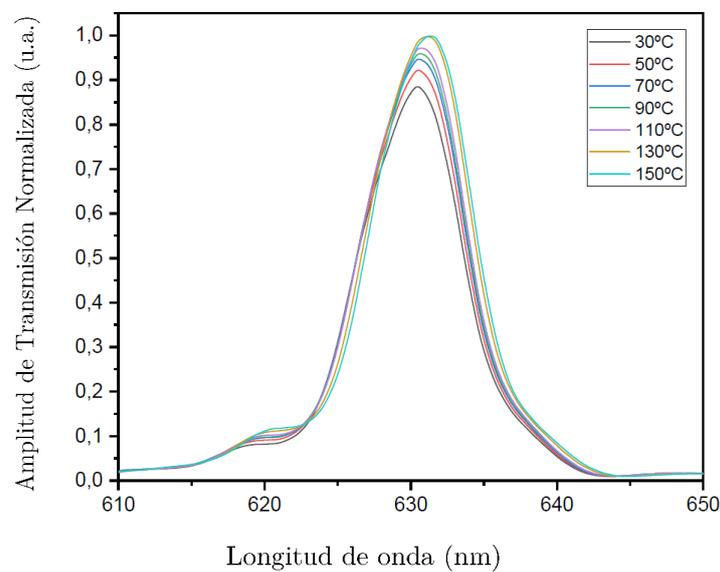


Figura 4.18 *Respuesta térmica del sensor de vibración.*

4.6. Pruebas del cantilever

Luego de realizar las pruebas correspondientes a cada uno de los filtros fabricados de longitudes 1.5, 2.5 y 3.5 cm; se determinó que el dispositivo con mejor modulación en intensidad fue el filtro multimodal MMI de 1.5 cm, por lo que se empleó este filtro para realizar las pruebas de vibración en cantilever.

El sensor MMI seleccionado fue colocado sobre un arreglo siguiendo el esquema experimental de la Figura 4.19, un extremo del MMI fue adherido a una lámina de

acero SK5 y fue acoplado a una fuente de luz en el espectro visible, el otro extremo fue adecuado para ser conectado a un osciloscopio a través de un fotodetector. La lámina tiene una sección transversal rectangular con longitud de 15.3 cm, en un extremo se coloca un soporte y el otro extremo queda suspendido para formar un voladizo.

El experimento consiste en someter un cantilever a desplazamientos desde su posición inicial establecida aplicando una fuerza externa, el cantilever experimenta una vibración amortiguada en torno a su posición de equilibrio. En este punto nos interesa conocer el valor de la frecuencia natural a la cual se está sometiendo el sistema, para ello se empleará la ecuación 3.17 mostrada en el capítulo 3.

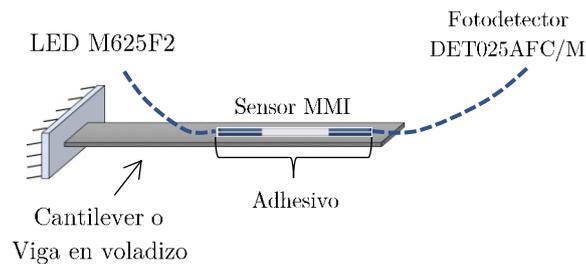
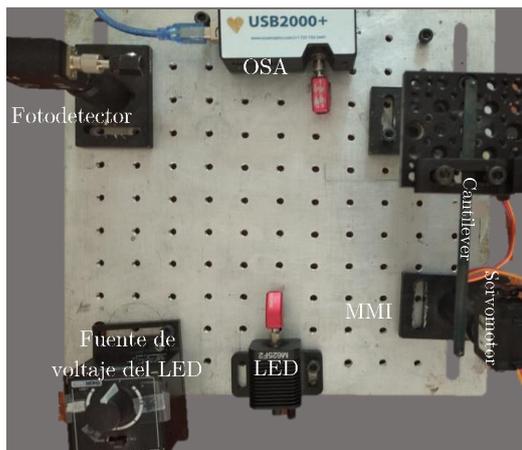
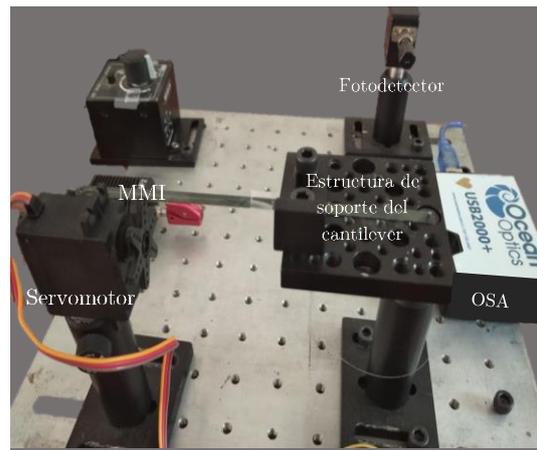


Figura 4.19 *Esquema de la configuración experimental para las pruebas de vibración.*

La Figura 4.20 muestra la imagen fotográfica de la configuración experimental propuesta, con la salida del OSA, y la salida para las pruebas con el fotodetector que se conecta al osciloscopio con el fin de realizar las posteriores pruebas de vibración.



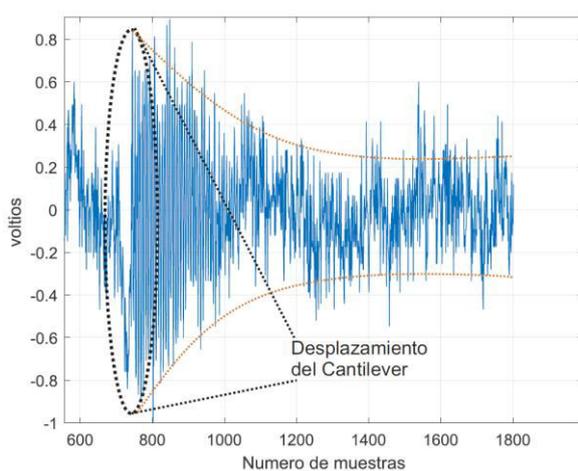
(a)



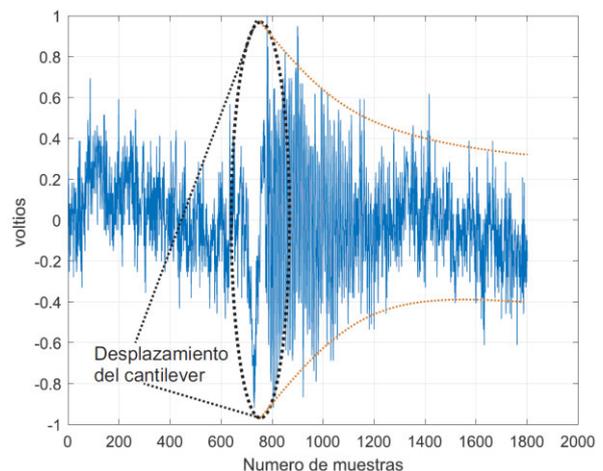
(b)

Figura 4.20 Imagen fotográfica de la configuración propuesta (a) Vista superior del experimento (b) Vista lateral del experimento.

La Figura 4.21 (a, b y c) muestra las señales de vibración en el dominio del tiempo, donde se puede observar el instante donde cantilever es sometido a un desplazamiento y posterior a esto generar la respuesta amortiguada del sistema. El voltaje de salida del fotodetector oscila entre valores positivos y negativos, permitiendo ver el fenómeno de vibración.



(a)



(b)

Figura 4.21 Señales de vibración producidas por el sensor.

Con la finalidad de verificar la capacidad del sensor MMI, se realizaron cinco mediciones diferentes con una repetibilidad de 20 veces cada una, el experimento consistió en disminuir la longitud del cantilever en 1 cm y verificar la frecuencia natural; para ello fue necesario emplear la Transformada rápida de Fourier (FFT: Fast Fourier Transform, por sus siglas en ingles) de los datos recolectados por el osciloscopio.

La Figura 4.22 muestra los resultados de la FFT normalizada de los datos de vibración de salida en el dominio del tiempo, fueron sometidos a diferentes longitudes del cantilever, en la que los picos corresponden a la frecuencia fundamental para cada caso. Se puede observar que, con el aumento de la longitud, la frecuencia fundamental disminuyó. Las cuatro frecuencias fundamentales medidas se pueden observar en la Tabla 4.1, donde podemos observar el valor teórico y el valor experimental correspondientes a cada longitud del cantilever.

Tabla 4.1 *Valores reales y experimentales de la frecuencia.*

Longitud del cantilever	Valor experimental	Valor teórico
12 cm	49.9971 Hz	52.7816 Hz
11 cm	38.1328 Hz	41.704 Hz
10 cm	29.9072 Hz	33.7803 Hz
9 cm	27.5127 Hz	27.9176 Hz
8 cm	22.2402 Hz	23.4585 Hz

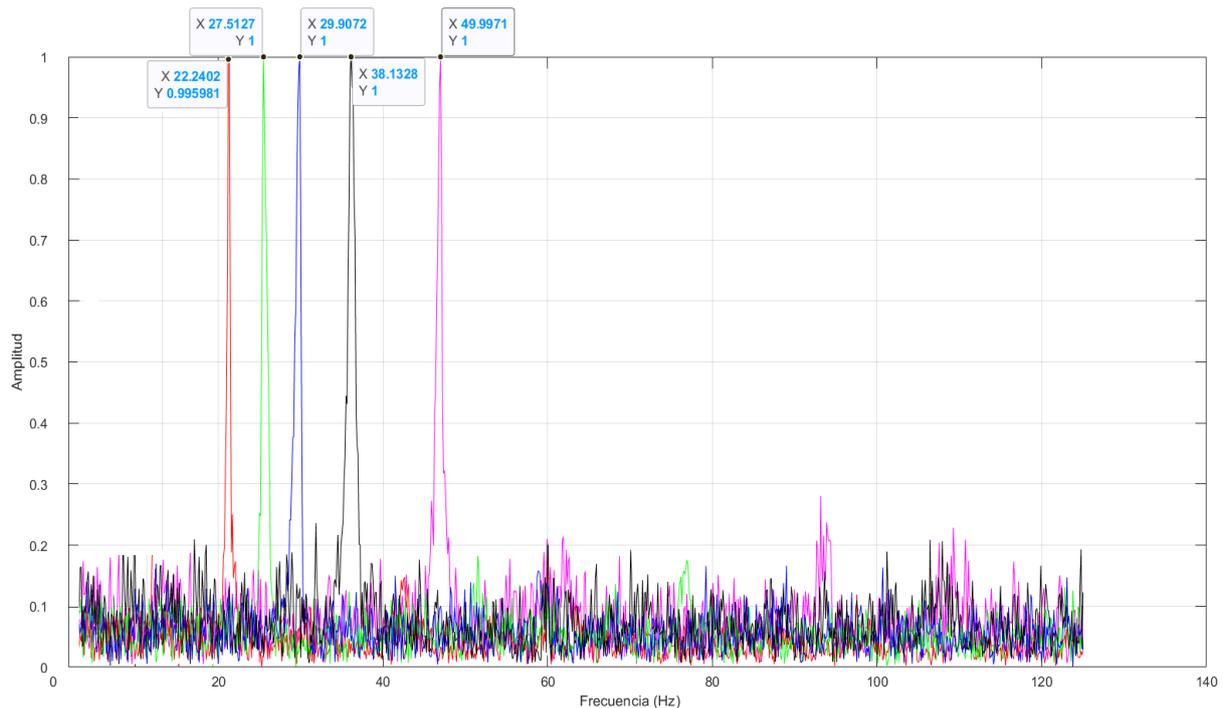


Figura 4.22 *Transformada Rápida de Fourier para diferentes longitudes del cantilever.*

En la Figura 4.23 se puede observar el comportamiento de la repetibilidad del experimento, donde cada vela del grafico ANOVA corresponde a la distribución de la frecuencia fundamental al ser sometida a 20 ensayos diferentes, además en las líneas punteadas podemos observar el valor de la media por cada experimento, como también los valores máximos y mínimos respectivamente. Se pudo comprobar que a medida que aumenta la longitud de la viga también aumenta la frecuencia fundamental.

Es importante resaltar que las velas indican una distribución de la frecuencia natural al repetir el experimento; obteniendo los mejores resultados cuando la longitud de la viga es de 8 cm y 9 cm, sin embargo, los resultados que se tienen para las otras longitudes son buenos, debido a que los datos de cada una de las velas no se alejan de su media. Teniendo como resultado que el sensor de vibración MMI fabricado es capaz

de obtener en diferentes pruebas el valor de la frecuencia natural correspondiente a la longitud de la viga.

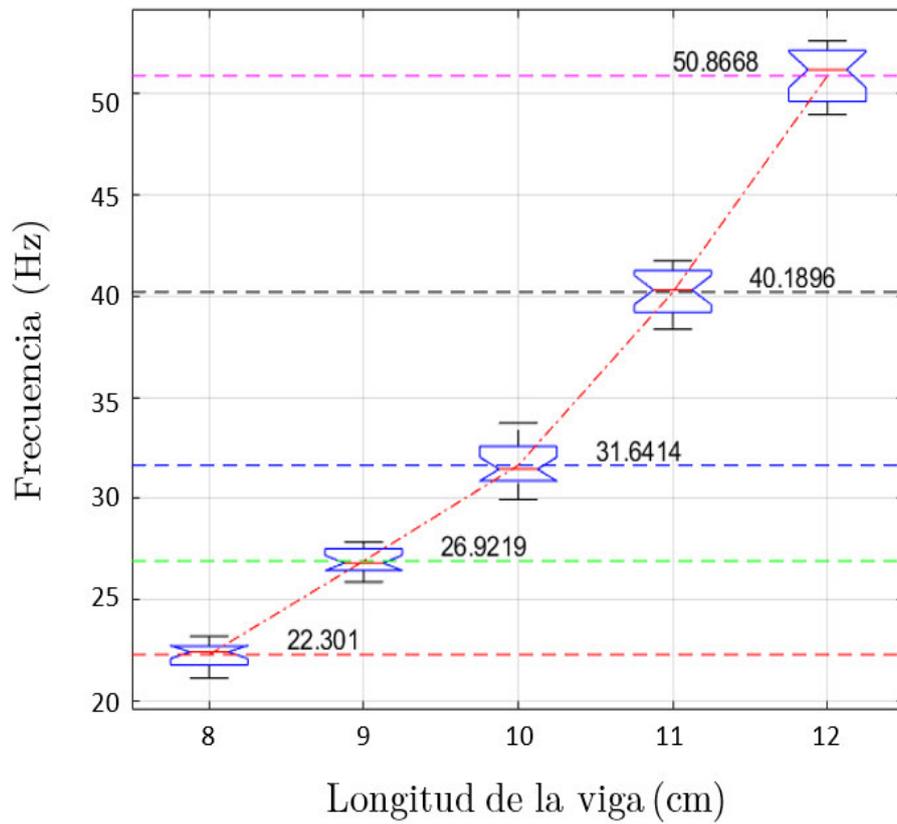


Figura 4.23 Gráfica ANOVA para diferentes longitudes del cantilever.

Capítulo 5

Conclusiones

El ámbito de esta investigación fue el estudio, diseño y fabricación de dispositivos de fibra óptica basados en la MMI. Al acoplar directamente la luz de un LED de una SMF (630-HP) a una MMF (FG105LCA), sólo se excitan los modos radialmente simétricos dentro de la MMF. Utilizando este esquema de acoplamiento y también una SMF de salida se demostró experimentalmente el uso de estos dispositivos, basados en una respuesta espectral de paso de banda. Además, se demostró un sensor de micro desplazamiento para la medición tanto en curvatura como para vibraciones basado en la MMI. Con el dispositivo MMI de 1.5 cm se obtuvieron los mejores resultados con un rango de detección en el espectro visible, y una sensibilidad de $0.068 \text{ u. a.}/\text{g}$.

En general, la fabricación de este dispositivo de fibra óptica del tipo filtro de interferencia multimodal MMI, presenta las ventajas de un coste mínimo por su operación en el espectro visible, un proceso de fabricación sencillo y además muestra el potencial de numerosas aplicaciones en la detección de vibraciones.