



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO – SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*“Diseño e implementación de un sensor de
vibración de fibra óptica aplicado a maquinado”*

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
Maestro en Ingeniería Eléctrica

PRESENTA:

Ing. Mario Piña Moncada

ASESORES:

Dr. Juan Manuel Sierra Hernández
Dr. Israel Martínez Ramírez

SALAMANCA, GUANAJUATO

Noviembre 2025

Salamanca, Gto., a 27 de Octubre del 2025.

MTRO. JUAN SIGFRIDO LÓPEZ CUSTODIO
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) **Mario Piña Moncada** del **Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica** y cuyo número de **NUA** es: **146877** del cual soy director. El título de la tesis es: **Diseño e implementación de un sensor de vibración de fibra óptica aplicado a maquinado.**

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.

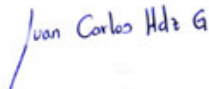
A T E N T A M E N T E



Dr. Juan Manuel Sierra Hernández
NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO



Dr. Israel Martínez Ramírez
NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS



Dr. Juan Carlos Hernández García
NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE



Dr. José Roberto Reyes Ayona
NOMBRE Y FIRMA
VOCAL

“Somos juzgados en vida por el mal que destruimos. Es una cruda verdad que sólo la sangre nos espera en los espacios entre las estrellas. Pero el Emperador ve todo lo que sucede en su dominio. Y se nos juzga igualmente por la luz que traemos a las noches más oscuras. Se nos juzga en vida por los momentos en que derramamos luz en los lugares más oscuros de su Imperio. Esto me lo ha enseñado su mundo. Su mundo y la guerra que me trajo aquí”

-Reclusiarca Merek Grimaldus de los Templarios Negros.

Extracto del libro Helsreach por Aaron Dembski-Bowden.

Agradecimientos.

Principalmente, quiero agradecer por la paciencia, resiliencia y sabiduría que me dio al Rey de todas las eras, Aquel que sin ninguna espada conquistó al mundo y sobre todo Aquel que me salvó de caer tantas veces en la oscuridad y me levantó incontables veces, a mi Salvador, mi Señor y mi Dios, Jesucristo de Nazaret, el Dios viviente.

A mis padres, Mario Piña Arroyo y MA. Dolores Moncada Ruiz, por apoyarme desde temprana edad aún con los sacrificios que se debían de hacer y que hasta mi adultez comprendí, por darme su amor y paciencia ante mis adversidades. A mi hermana Cindy Margarita Piña Moncada por darme ánimos, apoyarme económicamente en un momento complicado de mi vida. A mi novia Camila Jocelyn Alfaro Rojas por apoyarme y darme su amor incondicional.

A mi asesor el Dr. Juan Manuel Sierra Hernández por tenerme paciencia, comprensión y apoyarme a lo largo del trabajo, a mi co-asesor Israel Martínez Ramírez por apoyarme con los materiales necesarios para poner en práctica los interferómetros, igualmente agradezco a Marco Antonio Contreras Terán por su apoyo incondicional y diversas fuentes de información que me otorgó.

A mis amigos que Dios me dio la dicha de conocer en mi último año cursando la maestría, Daniel Ramos Gonzáles que fue quien me introdujo al laboratorio de comunicaciones de alta frecuencia y por su apoyo incondicional tanto profesional como personal, José Ramón Aviña Ortiz quien fue quien me apoyó realizando las pruebas en tiempo, además de brindarme material para el fotodetector y una gran amistad, Christian Alexis Rodríguez Salcedo por ayudarme con la construcción de la plataforma vibratoria, también por darme momentos de gracia y por su amistad incondicional. Daniel Torres Gonzáles por apoyarme cuando tenía dudas sobre varios temas de óptica, otorgarme material bibliográfico y por su amistad incondicional. De no ser por ustedes quien sabe dónde estaría.

También a mis amigos Elio, Samuel, Enrique y Amaury por siempre escucharme aun teniendo ellos sus propias batallas. Así como también su apoyo y momentos de diversión.

A mis amigos de Discord Sebastián (Doritos/Secto), Kicho, Omar, Brandon (Caramelo), Ángel (Lurkah), Rudy y Gera (Just) que aún a la distancia me apoyaron dándome moral y ánimos, además de momentos divertidos jugando videojuegos.

A mi psicólogo Otoniel Fernández por ayudarme a comprender mejor a mi mismo y a quienes me rodean, por ayudarme a salir de los problemas que me atormentaban y a la fe que me tuvo desde que nos conocimos.

A mis amigos y compañeros del laboratorio de fibras ópticas, Franco, Maximino, Stephanie, Daniela, Jesús, Liliana, Iván y Eduardo, por darme su apoyo y buenos deseos.

Agradezco igualmente al grupo de telecomunicaciones y fotónica de la DICIS, por brindarme el equipo de laboratorio para la elaboración de este trabajo.

Agradezco a la Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca (DICIS) por brindarme la infraestructura para poder trabajar además de excelentes profesores que no solo me han enseñado lecciones académicas sino de vida también.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) ahora llamada Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo financiero de la beca otorgada al CVU 1291813 con número de apoyo 850943 de la convocatoria “Becas Nacional (Tradicional 2023-1).



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación



Campus Guanajuato | División de Ingenierías

Resumen.

Este trabajo de tesis para la obtención de grado de Maestro en Ingeniería eléctrica, se desarrolló un sensor interferométrico basado en fibra óptica para la medición e implementación en sistemas de maquinado, esto con el fin de poder medir las vibraciones que se ven inducidas sobre la herramienta de corte debido a la interacción pieza/herramienta. Dicho trabajo describe el proceso de fabricación del sensor, siendo que este es un interferómetro Mach-Zehnder (MZI), a su vez se realizó una simulación para observar el comportamiento del patrón de interferencia del MZI cuando se cambian algunos parámetros de diseño, tales como su longitud y factores de acoplamiento en los acopladores ópticos, el MZI fue caracterizado en curvatura para determinar la linealidad de una zona en particular del patrón de interferencia. Se realizaron caracterizaciones de las vibraciones tanto de forma espectral como temporal utilizando un sistema de vibraciones electrónico empleando un rango de frecuencias de 1 a 10Hz y de 10 a 100Hz con incrementos de 10Hz, además de emplear diferentes tipos de señales eléctricas (senoidal, cuadrada, triangular y diente de sierra), obteniendo mediciones cualitativas, de las cuales se les aplicó el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT), esto con el fin de observar la contribución modal (en mediciones espectrales) y las frecuencias asociadas al fenómeno (en mediciones temporales). En la contribución modal se logran apreciar cambios en los modos dominantes mientras que en los modos débiles se logra observar un cambio en amplitudes considerable. En los componentes frecuenciales se logra apreciar cambios de amplitud que pueden ser empleados para obtener mediciones cuantitativas a futuro.

Abstract.

This thesis, submitted in fulfillment of the requirements for a Master's degree in Electrical Engineering, describes the development of an optical fiber-based interferometric sensor for measurement and implementation in machining systems. The sensor measures vibrations induced in the cutting tool by the workpiece/tool interaction. The thesis details the sensor's fabrication process, which involves the use of a Mach-Zehnder interferometer (MZI). A simulation was also performed to observe the behavior of the MZI's interference pattern when certain design parameters, such as its length and the coupling factors of the optical couplers, were changed. The MZI's was characterized by inducing curvature to determine the linearity of a specific region within the interference pattern. Vibrations were characterized both spectrally and temporally using an electronic vibration system with a frequency range of 1Hz to 10 Hz and 10Hz to 100 Hz in 10 Hz increments. Different types of electrical signals (sinusoidal, square, triangular, and sawtooth) were used, yielding qualitative measurements. The Fast Fourier Transform (FFT) algorithm was applied to these measurements to observe the modal contribution (in spectral measurements) and the frequencies associated with the phenomenon (in temporal measurements). The modal contribution revealed changes in the dominant modes, while the weak modes showed considerable amplitude changes. The amplitude changes observed in the frequency components can be used to obtain quantitative measurements in the future.

Índice general.

Agradecimientos	II
Resumen	IV
Abstract	V
<u>1.- Introducción</u>	1
<u>1.1.- Introducción y generalización</u>	2
<u>1.2.- Problemática</u>	3
<u>1.3.- Sensores de vibración</u>	4
<u>1.3.1.- Piezoelectricos</u>	4
<u>1.3.2 Magnetostictivos</u>	5
<u>1.3.3.- Capacitivos</u>	6
<u>1.3.4.- Inductivos</u>	7
<u>1.3.5.- Ópticos</u>	8
<u>1.4.- Objetivos</u>	9
<u>1.5.- Justificación</u>	10
<u>1.6.- Organización de la tesis</u>	10
<u>Referencias del capítulo</u>	11
<u>2.- Estado del arte</u>	16
<u>2.1- Ondas electromagnéticas</u>	17
<u>2.1.1.- Ecuaciones de Maxwell y la ecuación de onda</u>	17
<u>2.2.- Ondas acústicas</u>	19
<u>2.2.1.- Vibraciones</u>	19
<u>2.3.-Guía de onda dieléctrica u óptica</u>	20
<u>2.3.1.- Parámetro V</u>	20
<u>2.3.2.- Fibras ópticas</u>	21
<u>2.3.3.- Fibras monomodo, multimodo y el concepto de modo</u>	22
<u>2.3.4.- Ley de Snell, ángulo crítico, reflexión total interna, apertura</u>	
<u>Númerica e índice de refracción</u>	23
<u>2.3.5.- Pérdidas en la fibra óptica y ventanas de comunicaciones</u>	26
<u>2.4.- Efectos ópticos</u>	28
<u>2.5.- Coherencia temporal y espacial</u>	29
<u>2.6.- El láser</u>	29
<u>2.7.-WDM</u>	30
<u>2.8.- Amplificadores de fibra óptica</u>	31
<u>2.9.- Interferencia</u>	33
<u>2.10.- Interferómetros</u>	35
<u>2.10.1.- Interferómetro Mach-Zehnder</u>	36
<u>2.10.2.- Interferómetro Michelson</u>	37
<u>2.10.3.- Interferómetro Sagnac</u>	38
<u>2.10.4.- Interferómetro Fabry-Perot</u>	39
<u>2.10.5.- FSR</u>	40
<u>2.11.- Efecto acústico-óptico</u>	40

<u>2.11.1.- Moduladores acústico-ópticos</u>	40
<u>2.12.- Transformada rápida de Fourier</u>	41
<u>Referencias del capítulo</u>	41
<u>3.- Desarrollo del arreglo experimental, simulación, fabricación de los MZI, caracterización en curvatura y desarrollo de las pruebas</u>	46
<u>3.1.- Arreglo experimental</u>	47
<u>3.2.- Simulación de la matriz de transferencia de un MZI</u>	51
<u>3.3.- Métodos de fabricación del MZI</u>	53
<u>3.4.- Pérdidas por inserción</u>	56
<u>3.5.- Caracterización en curvatura de los MZI</u>	58
<u>3.6.- Desarrollo de las pruebas</u>	61
<u>Referencias del capítulo</u>	63
<u>4.-Pruebas y resultados</u>	66
<u>4.1.- Pruebas sobre el MZI #02 en el rango de 1Hz a 10Hz</u>	67
<u>4.2.- Pruebas sobre el MZI #02 en el rango de 10Hz a 100Hz con incrementos de 10Hz</u>	80
<u>4.3.- Pruebas en tiempo sobre la herramienta de maquinado</u>	94
<u>4.4.- Discusión</u>	96
<u>4.5.- Trabajo a futuro</u>	97
<u>Referencias del capítulo</u>	97

Índice de tablas.

Tabla 1.1.- Parámetros del acelerómetro 352C22	5
Tabla 1.2.- Parámetros del sensor RH de Temposonics	6
Tabla 1.3.- Parámetros del sensor VVB001	7
Tabla 1.4.- Parámetros del sensor sensor IMS30-15BPSNC0S	8
Tabla 1.5.- Parámetros del vibrómetro IVS-500	9
Tabla 3.1 Parámetros del método core-offset	55
Tabla 3.2 Parámetros del método peanut	56

Índice de figuras.

Fig 1.1.- Defectos del maquinado en la superficie de la aleación Inconel 718	4
Fig 1.2.- Sensor 352C22 de PCB piezotronics	5
Fig 1.3.- Sensor RH de Temposonics	6
Fig 1.4.- Sensor VVB001 de IFM	7
Fig 1.5.- sensor IMS30-15BPSNC0S de SICK	8
Fig 1.6.- Vibrómetro IVS-500 de Polytec	9
Fig 2.1.- Propagación en espacio libre de una onda electromagnética	17
Fig 2.2.- Estructura de una fibra óptica y sus tipos de índice de refracción	21
Fig 2.3.- Patrones transversales de modos guiados de bajo orden	23
Fig 2.4.- Ángulos de incidencia para obtener refracción, reflexión y el ángulo crítico	25
Fig 2.5.- Reflexión total interna dentro de una fibra óptica	25
Fig 2.6.- Ventanas de comunicación y respuesta típica a la atenuación de una fibra óptica	27
Fig 2.7.- Esquema básico de un láser	30
Fig 2.8.- Comparación espectral de un LED y un diodo láser	30
Fig 2.9.- Esquema de los niveles de energía del Er^{3+} simplificado	32
Fig 2.10.- Configuración típica de un EDFA	32
Fig 2.11.- Diagramas de energía simplificados de los iones de Er^{3+} a) bombeo de 980nm b) bombeo de 1480nm	33
Fig 2.12.- Esquema de un MZI clásico de dos brazos	36
Fig 2.13.- Esquema clásico de un MI fabricado con acopladores	38
Fig 2.14.- Esquema de un SI de fibra óptica	39
Fig 3.1.- Arreglo experimental para el desarrollo del trabajo	47
Fig 3.2.- Niveles de energía simplificados de los iones de Er^{3+} en la EDF	48
Fig 3.3.- Caracterización de la EDF	49
Fig 3.4.- Plataforma vibratoria	50

<u>Fig 3.5.- Diagrama del amplificador para el uso de la plataforma vibratoria</u>	50
<u>Fig 3.6.- Interfaz de la aplicación Frequency Generator</u>	51
<u>Fig 3.7.- Simulación del MZI</u>	52
<u>Fig 3.8.- Cambio del parámetro de longitud en la simulación</u>	52
<u>Fig 3.9.- Cambio del factor de acoplamiento en la simulación</u>	53
<u>Fig 3.10.- Esquema del MZI fabricado por el método de Core-offset</u>	54
<u>Fig 3.11.- Proceso de fabricación de los MZI con el método Core-offset</u>	54
<u>Fig 3.12.- Esquema del MZI fabricado por el método peanut</u>	55
<u>Fig 3.13.- Proceso de fabricación de los MZI con el método peanut</u>	55
<u>Fig 3.14.- Pérdidas del MZI #1</u>	56
<u>Fig 3.15.- Pérdidas del MZI #2</u>	57
<u>Fig 3.16.- Pérdidas del MZI #11</u>	57
<u>Fig 3.17.- Pérdidas del MZI #16</u>	58
<u>Fig 3.18.- Dispositivo para generar curvatura</u>	59
<u>Fig 3.19.- Espectros del MZI #2 aplicando curvatura</u>	59
<u>Fig 3.20.- Espectros del MZI #2 aplicando curvatura centrados en 1543nm</u>	60
<u>Fig 3.21.- Aproximación de curvas de la atenuación centrada en 1543nm del MZI #2</u>	60
<u>Fig 3.22.- Montaje de las pruebas en vibración</u>	62
<u>Fig 3.23.- Arreglo experimental modificado para las pruebas en tiempo</u>	62
<u>Fig 3.24.- Montaje del MZI sobre la herramienta de maquinado</u>	63
<u>Fig 4.1.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal senoidal de 1 a 10Hz</u>	67
<u>Fig 4.2.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal senoidal de 1 a 10Hz</u>	68
<u>Fig 4.3.- Acercamiento a la zona de 1542nm a 1544nm del MZI #02</u>	68
<u>Fig 4.4.- Zona de los modos dominantes del revestimiento del MZI #02 cuando se le inducen vibraciones por medio de una señal senoidal en el rango de 1 a 10Hz</u>	69
<u>Fig 4.5.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal</u>	70
<u>Fig 4.6.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.15nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal</u>	70
<u>Fig 4.7.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal</u>	71
<u>Fig 4.8.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal cuadrada de 1 a 10Hz</u>	72
<u>Fig 4.9.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada</u>	73
<u>Fig 4.10.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.16nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada</u>	73
<u>Fig 4.11.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada</u>	74
<u>Fig 4.12.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal triangular de 1 a 10Hz</u>	75
<u>Fig 4.13.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal triangular</u>	76

<u>Fig 4.14.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.15nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal triangular</u>	76
<u>Fig 4.15.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal triangular</u>	77
<u>Fig 4.16.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal diente de sierra de 1 a 10Hz</u>	78
<u>Fig 4.17.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra</u>	79
<u>Fig 4.18.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.15nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra</u>	79
<u>Fig 4.19.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra</u>	80
<u>Fig 4.20.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal senoidal de 10 a 100Hz</u>	81
<u>Fig 4.21.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal senoidal de 10 a 100Hz</u>	82
<u>Fig 4.22.- Zona de los modos dominantes del revestimiento del MZI #02 cuando se le inducen vibraciones por medio de una señal senoidal en el rango de 10 a 100Hz</u>	83
<u>Fig 4.23.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal (10Hz-100Hz)</u>	83
<u>Fig 4.24.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.16nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal (10Hz a 100Hz)</u>	84
<u>Fig 4.25.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal (10Hz a 100Hz)</u>	85
<u>Fig 4.26.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal cuadrada de 10 a 100Hz</u>	86
<u>Fig 4.27.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada (10Hz-100Hz)</u>	87
<u>Fig 4.28.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.16nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada (10Hz-100Hz)</u>	87
<u>Fig 4.29.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada (10Hz a 100Hz)</u>	88
<u>Fig 4.30.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal triangular de 10 a 100Hz</u>	89
<u>Fig 4.31.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal triangular (10Hz-100Hz)</u>	90
<u>Fig 4.32.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.16nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal triangular (10Hz-100Hz)</u>	90
<u>Fig 4.33.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal triangular (10Hz a 100Hz)</u>	91
<u>Fig 4.34.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal diente de sierra de 10 a 100Hz</u>	92
<u>Fig 4.35.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra (10Hz-100Hz)</u>	92
<u>Fig 4.36.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.16nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra(10Hz-100Hz)</u>	93

<u>Fig 4.37.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra (10Hz a 100Hz)</u>	94
<u>Fig 4.38.- Respuesta en tiempo del MZI #02 sin vibración y cuando se le aplica vibración</u>	95
<u>Fig 4.39.- FFT de las respuestas en tiempo del MZI #02</u>	96

Capítulo 1.

Introducción.

En este capítulo se describe de forma general las vibraciones, la problemática que atiende este trabajo, los objetivos o finalidades del trabajo realizado a lo largo de esta travesía, así como también la descripción de algunos productos comerciales en el nicho de los sensores de vibración.

1.1.- Introducción y generalización.

Desde tiempos remotos, el ser humano ha conocido las vibraciones como un tema de interés científico. Tanto es así que el desarrollo de teoría sobre las vibraciones tiene una larga historia, extendiéndose desde hace cuatro siglos atrás y que aún sigue siendo objeto de investigación científica [1]. más aun tratándose de quienes se encuentran en áreas de investigación relacionadas a mecánica y otras áreas ajenas a la propia mecánica.

Muchos investigadores pueden ver las vibraciones como algo útil en ciertas instancias, otros la pueden ver como un problema que debe ser encontrado y erradicado o por lo menos parcialmente, ya que como es bien sabido algunas cosas no pueden eliminarse totalmente de un sistema.

Ahora bien, ¿qué son las vibraciones?

Las vibraciones como concepto básico son cualquier movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo, al igual que una oscilación [2], ahora dentro de un ámbito más específico. Las vibraciones son un fenómeno común en la naturaleza [3], y también son prevalentes en sistemas mecánicos, que constantemente afectan el rendimiento y la estabilidad de dichos sistemas [4].

¿Por qué las vibraciones son tan importantes?

Esta pregunta si bien se responde con la respuesta anterior, se debe de profundizar aún más, ya que estas pueden influir tanto de forma positiva como negativa. Iniciando con los pros de las vibraciones, algunos Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS) pueden transformar energía a partir de fuentes de energía externas como, por ejemplo, la luz solar, corrientes de viento, radiación electromagnética, calor o vibraciones [1], a su vez también una ventaja de las vibraciones se encuentra en el mantenimiento predictivo de maquinaria, ya que se hace un análisis en las vibraciones para determinar una posible falla [5].

Como dato interesante. El análisis de vibraciones se comenzó a utilizar el análisis de vibraciones en 1960 y 1970. Donde se observaban desplazamiento y velocidades, hasta que este evolucionó al punto de emplear técnicas más rigurosas como la transformada de Fourier para encontrar frecuencias anormales y detectar posibles fallos [5].

En cuanto a las contras de este fenómeno se tienen bastantes ya que afectan la estabilidad operacional, la precisión, la integridad de sistemas críticos [4], lo que provoca la existencia de tecnologías capaces de aislar las vibraciones. Otro punto en contra radica ahora en este trabajo, ya que en el maquinado las vibraciones afectan de distintas formas la fabricación de piezas [6].

1.2.- Problemática.

En el trabajo de Murat Sarıkaya [6]. Se nos explican diversos problemas o dificultades que pueden ocurrir en el maquinado de superaleaciones, cabe aclarar que estos problemas no son únicamente exclusivos de las superaleaciones, realmente puede ocurrir en otro tipo de materiales que se empleen en un torno, con la diferencia de que pueden aparecer en mayor o menor medida.

Tales problemas pueden radicar en el aumento de temperatura debido a la fricción y debido a las altas velocidades genera vibraciones. Como lo indica Murat Sarıkaya en su trabajo. La resistencia contra la deformación en la zona de corte aumenta debido al endurecimiento por deformación de los materiales. Consecuentemente, a medida que la vibración debido al incremento de la velocidad de corte. La rugosidad de la superficie maquinada aumenta y por lo tanto deteriora la morfología de la superficie [6].

Lo anterior descrito nos indica que las vibraciones afectan la estructura de la pieza a fabricar, junto a otros problemas que no son de interés inmediato para este trabajo tales como calor, fricción o las interfaces de las herramientas utilizadas [6, 7].

Dado que las vibraciones por si solas afectan la superficie del material al momento de maquinar, se pueden encontrar varios defectos a escala microscópica que evitan a la pieza poseer una superficie lisa, entre estos defectos se pueden encontrar cavidades [6, 8, 9], surcos [6, 10-12], crestas [6, 9], marcas por vibraciones [6, 12-14], marcas de rasguños [6][12][14], grietas [6, 15], superficies quemadas [6, 12, 15], restos de rebaba [6, 9, 14, 16], desgarres [6, 9, 12], manchas [6, 10], materiales adheridos [6, 9, 11, 12, 14, 15], arrugas [6, 11], entre otros. Estos defectos no solo afectan en lo estético sino también en el desempeño mecánico de la pieza fabricada [6, 17], lo que puede causar problemas en un sistema o puede que exista un riesgo en la seguridad de las personas.

Algunos de estos defectos son mostrados en la figura 1.1, esta figura fue tomada del trabajo [9], que a su vez es reportado en [6] dado que es un estado del arte.

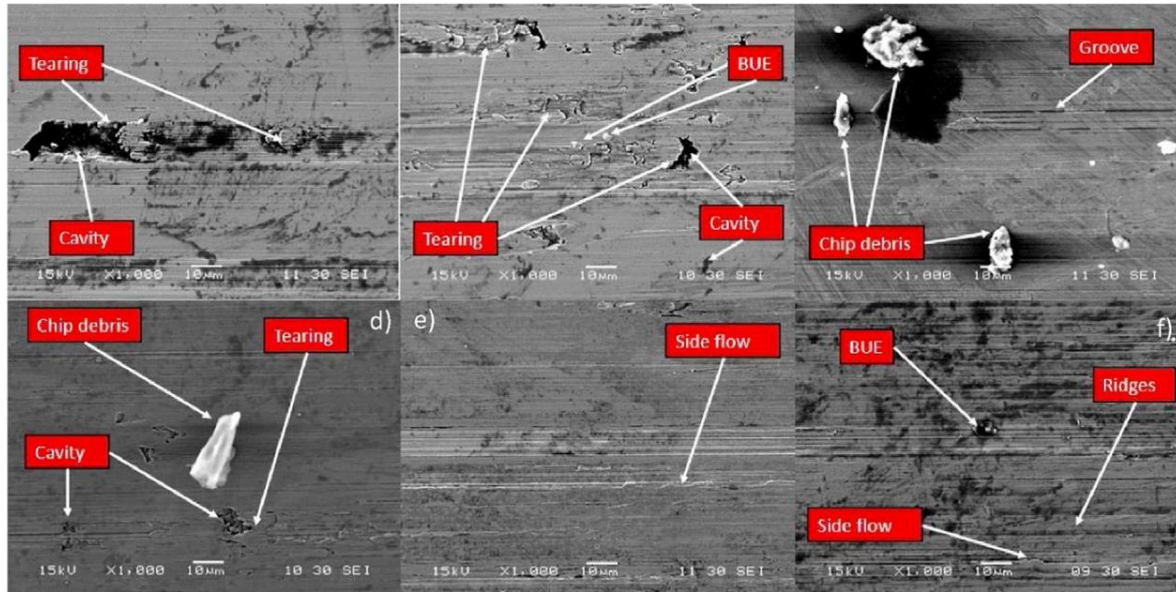


Fig 1.1.- Defectos del maquinado en la superficie de la aleación Inconel 718 [6, 9].

Como logra apreciarse en la figura 1.1, estos son algunos de los defectos que pueden ocurrir en el maquinado y muchos de estos pueden ser causados por las vibraciones inducidas sobre la herramienta. Por ello es importante detectarlas debidamente para así aumentar la vida útil y el desempeño de las piezas.

1.3.- Sensores de vibración.

En base a la problemática se debe comprender que la mejor forma de detectar vibraciones es en base a las tecnologías actuales, dichas tecnologías vienen en forma de sensores ¿Cuál es el objetivo del sensor? Simple, tomar el parámetro físico y transmitir una señal eléctrica o de otro tipo que indique que en efecto se tiene detectado este parámetro de forma cualitativa o cuantitativa.

Para el caso de las vibraciones se tienen varios tipos de sensores que son capaces de detectar y medir este parámetro físico, entre los cuales están los sensores piezoeléctricos [4, 18-21], magnetostrictivos [4, 22-24], capacitivos [4, 25, 26], inductivos [4, 27, 28] y ópticos [4, 29-31].

1.3.1.- Piezoeléctricos.

Este es uno de los sensores de vibración más comunes en el mercado industrial, primeramente, estos emplean el dichoso efecto piezoeléctrico, el cual es bastante simple y tiene muchas aplicaciones, medición de vibraciones, generación de energía, entre otras. De forma básica. El efecto piezoeléctrico consiste en someter sobre una fuerza, precisión o

deformación un material, dicho material después de someterse al estrés produce electricidad [21]. En otras palabras, convierte energía acústica o mecánica en energía eléctrica. Dicho efecto tiene su inverso, para cuando se le aplica un campo eléctrico al material este último produce energía acústica [21].

Un ejemplo comercial de este tipo de sensores es el siguiente.

El acelerómetro 352C22, este lograr medir vibraciones siendo montado en el chasis del dispositivo a monitorear, los puntos principales de este sensor son baja impedancia de salida, bajo ruido, compatibilidad con sistemas de adquisición, es un dispositivo intrínseco. Su precio ronda en los \$107.50 USD. La figura 1.2 muestra el sensor, esta imagen es tomada de la página oficial de PCB Piezotronics [32].



Fig 1.2.- Sensor 352C22 de PCB piezotronics [32].

Los parámetros por destacar de este sensor son mostrados en la tabla 1.1.

Parámetro	Unidades
Sensibilidad	1.0mV/(m/s ²)
Rango de medición	±4900 m/s ² pk
Resolución de banda ancha	0.04 m/s ² rms
Rango de frecuencia	(±5%) 1.0 a 10000Hz
Elemento sensitivo	Cerámico
Peso	0.5g

Tabla 1.1.- Parámetros del acelerómetro 352C22 [32].

1.3.2 Magnetostrictivos.

Los sensores magnetostrictivos operan bajo el efecto magnetostrictivo, aunque suene redundante. Este efecto es relativamente similar al efecto piezoeléctrico, dicho efecto tiene varias aplicaciones, medición de torque, medición de vibraciones, entre otras.

De manera concisa. El efecto magnetostrictivo consiste en convertir energía mecánica a energía magnética y viceversa [23]. La magnetostricción es el cambio de la estructura de un material al someterse a un campo magnético externo [24].

Un ejemplo en la industria de este sensor viene por parte de la empresa Temposonics. Ya que esta empresa tiene una amplia variedad de sensores magnetostrictivos, de los cuales se dividen en series, para este caso se muestran las series R, específicamente el sensor RH, si bien su precio no aparece en la página oficial en muchas otras referencias su precio ronda entre los \$16000MXN y \$23000MXN. Este es mostrado en la figura 1.3, esta imagen es tomada de la página de Temposonics [33].



Fig 1.3.- Sensor RH de Temposonics [33].

Sus especificaciones más destacables son mostradas en la tabla 1.2.

Parámetro	Unidad
Vibración	10-2000Hz
Linealidad	$\leq \pm 0.01\%$ F.S.
Voltaje de operación	24V DC
Temperatura de operación	-40 a +75°C

Tabla 1.2.- Parámetros del sensor RH de Temposonics [33].

1.3.3.- Capacitivos.

Este tipo de sensores son bastante simples, ya que logran obtener mediciones en base a los cambios de capacitancia a los que se ven sometidos por diversos parámetros físicos, estos sensores son ampliamente utilizados como acelerómetros, para medición de vibraciones, sistemas de navegación, entre otros [25, 26].

Estos internamente cuentan con un convertidor de capacitancia a voltaje, de modo que los cambios de capacitancia se ven reflejados en niveles de diferencia de potencial [25].

Un ejemplo de sensor de vibración capacitivo es el VVB001 de la empresa IFM, este permite la recepción de datos por medio de sistemas ethernet y con una amplia robustez, su precio establecido es de \$10,255.00 MXN. El sensor es mostrado en la figura 1.4, esta imagen es tomada de la página oficial de IFM [34].



Fig 1.4.- Sensor VVB001 de IFM [34].

Los parámetros más destacables de este sensor son mostrados en la tabla 1.3.

Parámetro	Unidad
Rango de frecuencias	2-10000Hz
Rango de vibraciones	0-45mm/s
Voltaje de operación	18-30VDC
Precisión	<4KHz +/-10%

Tabla 1.3.- Parámetros del sensor VVB001 [34].

1.3.4.- Inductivos.

Este tipo de sensores cuentan con estructuras simples y son simples de fabricar, estos tienden a ser empleados como sensores de proximidad usando cambios en la inductancia, sin embargo, existe la desventaja que no suelen detectar tan eficazmente materiales no conductores o no magnéticos [27].

Entre algunos ejemplos se encuentra el sensor IMS30-15BPSNC0S de la empresa SICK, este si bien es un sensor de proximidad se puede emplear para medir vibraciones con el arreglo adecuado. Su precio al público se encuentra en \$2346.98MXN, en la figura 1.5 se muestra el sensor, esta imagen es tomada de la página oficial de SICK [35].



Fig 1.5.- sensor IMS30-15BPSNC0S de SICK [35].

Los parámetros más destacables de este sensor son mostrados en la tabla 1.4.

Parámetro	Unidad
Voltaje de operación	7.2-60VDC
histéresis	3%-20%
Frecuencia de conmutación	300Hz
Resistencia a la vibración	10-2000Hz

Tabla 1.4.- Parámetros del sensor sensor IMS30-15BPSNC0S [35].

1.3.5.- Ópticos.

Estos sensores pueden estar asociados con las fibras ópticas o con elementos de luz láser, donde el parámetro físico a medir puede generar un cambio en la amplitud o en la fase de la señal óptica [4, 29, 30].

Existen diversos ejemplos comerciales, pero el que más llama la atención es el vibrómetro IVS-500 de Polytec, este vibrómetro es capaz de medir vibraciones sin necesidad de estar en contacto con la superficie, es decir es un instrumento no invasivo. Todo esto lo logra a través de la luz laser, sí bien en la página no especifica el precio a menos de que se envíe una cotización se asume que sea un instrumento caro, ya que en páginas como Ebay el precio de este instrumento ronda aproximadamente en los \$5000USD. En la figura 1.6 se muestra el vibrómetro IVS-500, esta imagen es obtenida de la página oficial de Polytec [36].



Fig 1.6.- Vibrómetro IVS-500 de Polytec [36].

Los parámetros más destacables del vibrómetro son mostrados en la tabla 1.5.

Parámetro	Unidad
Vibración Máxima medible	100KHz
Protección	IP 64
Voltaje de operación	11-14.5VDC
Visibilidad máxima	53mm*n(138mm) n=0, 1, 2, ...

Tabla 1.5.- Parámetros del vibrómetro IVS-500 [36].

1.4.- Objetivos.

Objetivo general.

Diseñar e implementar un interferómetro multimodal del tipo Mach-Zehnder (MZI, Mach-Zehnder Interferometer) basado en fibra óptica utilizando diferentes técnicas de fabricación para su aplicación como sensor para la detección y medición de la vibración en el proceso de maquinado.

Objetivos específicos.

- Fabricar varios interferómetros del tipo Mach-Zehnder empleando distintas técnicas o métodos de fabricación.
- Caracterización experimental de curvatura de los interferómetros fabricados por medio de una fuente de luz de amplio espectro de ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission).
- Diseñar un sistema electrónico capaz de inducir el parámetro de vibración para el estudio de los interferómetros fabricados.

- Realizar un análisis del comportamiento modal de los interferómetros fabricados, sometiendo los espectros de potencia de salida a la transformada rápida de Fourier (FFT).
- Caracterizar los interferómetros empleando el sistema de vibraciones previamente fabricado en los rangos de 1Hz a 10Hz y de 10Hz a 100Hz con incrementos de 10Hz, con el fin de modular los espectros de interferencia a causa de este parámetro.
- Elegir los mejores de los MZI para emplear pruebas en tiempo con la barra de interiores o bien la herramienta empleada en el maquinado.

1.5.- Justificación.

Los interferómetros basados en fibra óptica han demostrado ser dispositivos bastante versátiles, compactos y sensibles [40]. Sumando que gracias a que las fibras ópticas son inmunes a las interferencias electromagnéticas (EMI) [4, 29, 30] les da una enorme ventaja en contraste con sus homólogos los sensores electrónicos. Estudios pasados han demostrado que los interferómetros en general pueden medir parámetros físicos como lo son la curvatura, torsión, tensión, temperatura, entre otros [4] e incluso pueden medir más de un parámetro a la vez [40].

En la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca (DICIS) de la Universidad de Guanajuato se cuentan con una gran variedad de trabajos publicados de interferómetros y no solo se limitan a la arquitectura Mach-Zehnder. Entre estos trabajos se encuentran [40-45].

Ahora en cuanto a su uso en las vibraciones igualmente ya han sido documentados varios trabajos, por ejemplo [29-31, 37-39]. Por lo que estos trabajos motivan a emplear la detección de vibraciones con MZI en el maquinado. Además, varios trabajos presentan MZIs modales mientras que este trabajo se hará uso de MZIs multimodales, haciendo que sea un dispositivo más simple y contribuyendo así con el estudio de los sensores basados en fibra óptica en este rubro.

1.6.- Organización de la tesis.

En el **Capítulo 2** se hará exposición sobre las bases teóricas en las que se involucran el principio de funcionamiento de los interferómetros de manera general, comenzando desde qué es la interferometría, abarcando los tipos de interferómetros basados en fibra óptica existentes, se hará extensión sobre la matriz de transferencia de un MZI, el uso de la transformada rápida de Fourier, teoría de los EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) y el fenómeno ASE (Amplified Spontaneous Emission) y otras fuentes de luz de amplio espectro.

En el **Capítulo 3** se muestran los procesos por lo cuales se desarrolló este trabajo, dicho de otra forma, es la metodología, en ella se encuentran la caracterización de la fuente ASE, la fabricación de los MZIs y su caracterización en curvatura, añadiendo también cómo se fabricó el sistema de vibraciones, el desarrollo de las pruebas en vibración, tanto en espectro como en tiempo.

En el **Capítulo 4** se expondrán los resultados obtenidos de las pruebas al inducir vibraciones sobre los MZI, así como también una breve comparación con otros trabajos, esto incluye tanto sus arreglos experimentales como sus resultados.

Referencias del capítulo.

- [1] S. Garus *et al.*, “Mechanical vibrations: recent trends and engineering applications,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, pp. 140351–140351, Jan. 2022, doi: 10.24425/bpasts.2022.140351.
- [2] S. S. Rao, *Vibraciones Mecánicas*, 5ª ed., trad. R. Navarro Salas, rev. téc. D. Sepúlveda García, R. Rodríguez Figueroa, y G. del Valle Díaz Muñoz. Naucalpan de Juárez, México: Pearson, pp 13, 2012.
- [3] X. Liu, B. Jin, Q. Bai, Y. Wang, D. Wang, and Y. Wang, “Distributed Fiber-Optic Sensors for Vibration Detection,” *Sensors*, vol. 16, no. 8, p. 1164, Jul. 2016, doi: 10.3390/s16081164.
- [4] Z. Wu *et al.*, “Mechanical Modeling and Dynamic Characteristics of a Three-Directional Vibration Absorber,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 8, p. 4420, Apr. 2025, doi: 10.3390/app15084420.
- [5] H. E. Crespo Azanza, C. P. Arias Reyes, and C. E. Zhigüe Tene, “Evolución del Análisis de Vibraciones en Mantenimiento Predictivo, en Relación a los Patrones de Vibración en Elementos Mecánicos,” *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 4, pp. 2444–2452, Aug. 2024, doi: 10.37811/cl_rcm.v8i4.12488.
- [6] M. Sarikaya *et al.*, “A state-of-the-art review on tool wear and surface integrity characteristics in machining of superalloys,” *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 35, pp. 624–658, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cirpj.2021.08.005.
- [7] A. Ginting and M. Nouari, “Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material,” *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 46, no. 7–8, pp. 758–768, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.035.
- [8] M. K. Gupta *et al.*, “Experimental characterisation of the performance of hybrid cryo-lubrication assisted turning of Ti–6Al–4V alloy,” *Tribol Int*, vol. 153, p. 106582, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106582.

- [9] M. A. M. Ali, A. I. Azmi, M. N. Murad, M. Z. M. Zain, A. N. M. Khalil, and N. A. Shuaib, “Roles of new bio-based nanolubricants towards eco-friendly and improved machinability of Inconel 718 alloys,” *Tribol Int*, vol. 144, p. 106106, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2019.106106.
- [10] N. S. R. K *et al.*, “Investigation of surface modification and tool wear on milling Nimonic 80A under hybrid lubrication,” *Tribol Int*, vol. 155, p. 106762, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106762.
- [11] S. Sartori, A. Ghiotti, and S. Bruschi, “Solid Lubricant-assisted Minimum Quantity Lubrication and Cooling strategies to improve Ti6Al4V machinability in finishing turning,” *Tribol Int*, vol. 118, pp. 287–294, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2017.10.010.
- [12] X. Liang, Z. Liu, G. Yao, B. Wang, and X. Ren, “Investigation of surface topography and its deterioration resulting from tool wear evolution when dry turning of titanium alloy Ti-6Al-4V,” *Tribol Int*, vol. 135, pp. 130–142, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.02.049.
- [13] M. Lotfi, S. Amini, and J. Akbari, “Surface integrity and microstructure changes in 3D elliptical ultrasonic assisted turning of Ti-6Al-4V: FEM and experimental examination,” *Tribol Int*, vol. 151, p. 106492, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106492.
- [14] Q. An, C. Cai, F. Zou, X. Liang, and M. Chen, “Tool wear and machined surface characteristics in side milling Ti6Al4V under dry and supercritical CO₂ with MQL conditions,” *Tribol Int*, vol. 151, p. 106511, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106511.
- [15] X. Liang and Z. Liu, “Tool wear behaviors and corresponding machined surface topography during high-speed machining of Ti-6Al-4V with fine grain tools,” *Tribol Int*, vol. 121, pp. 321–332, May 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.01.057.
- [16] P. Shah, N. Khanna, and Chetan, “Comprehensive machining analysis to establish cryogenic LN₂ and LCO₂ as sustainable cooling and lubrication techniques,” *Tribol Int*, vol. 148, p. 106314, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106314.
- [17] A. U. H. Mohsan, Z. Liu, and G. K. Padhy, “A review on the progress towards improvement in surface integrity of Inconel 718 under high pressure and flood cooling conditions,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, no. 1–4, pp. 107–125, Jul. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9737-3.
- [18] Z. Abas, D. H. Yang, H. S. Kim, M. K. Kwak, and J. Kim, “Characterization of Electro-Active Paper Vibration Sensor by Impact Testing and Random Excitation,” *Int J Appl Mech*, vol. 07, no. 04, p. 1550065, Aug. 2015, doi: 10.1142/S1758825115500659.
- [19] S. Tadigadapa and K. Mateti, “Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives,” *Meas Sci Technol*, vol. 20, no. 9, p. 092001, Sep. 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/9/092001.

- [20] Y. Zhang, X. Li, J. Fu, L. Liu, C. Zhang, and J. Duan, “Low-Cost and Paper-Based Micro-Electromechanical Systems Sensor for the Vibration Monitoring of Shield Cutters,” *Sensors*, vol. 24, no. 16, p. 5349, Aug. 2024, doi: 10.3390/s24165349.
- [21] A. Manbachi and R. S. C. Cobbold, “Development and Application of Piezoelectric Materials for Ultrasound Generation and Detection,” *Ultrasound*, vol. 19, no. 4, pp. 187–196, Nov. 2011, doi: 10.1258/ult.2011.011027.
- [22] H.-C. Lee and W.-H. Bae, “Study on the Elimination of Irreversible Magnetic Components Using Anhysteretization in a Magnetostrictive Vibration Sensor,” *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, vol. 20, no. 9, pp. 841–848, Sep. 2010, doi: 10.5050/KSNVE.2010.20.9.841.
- [23] F. T. Calkins, A. B. Flatau, and M. J. Dapino, “Overview of Magnetostrictive Sensor Technology,” *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 18, no. 10, pp. 1057–1066, Oct. 2007, doi: 10.1177/1045389X06072358.
- [24] A. G. Olabi and A. Grunwald, “Design and application of magnetostrictive materials,” *Mater Des*, vol. 29, no. 2, pp. 469–483, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2006.12.016.
- [25] C.-T. Chiang, C.-I. Chang, and W. Fang, “Design of a Digitized Vibration Detector Implemented by CMOS Digitized Capacitive Transducer With In-Plane SoI Accelerometer,” *IEEE Sens J*, vol. 14, no. 8, pp. 2546–2556, Aug. 2014, doi: 10.1109/JSEN.2014.2303646.
- [26] C.-P. Hsu, M.-C. Yip, and W. Fang, “Implementation of a gap-closing differential capacitive sensing Z -axis accelerometer on an SOI wafer,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 7, p. 075006, Jul. 2009, doi: 10.1088/0960-1317/19/7/075006.
- [27] P.-H. Lo, S.-H. Tseng, J.-H. Yeh, and W. Fang, “Development of a proximity sensor with vertically monolithic integrated inductive and capacitive sensing units,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, no. 3, p. 035013, Mar. 2013, doi: 10.1088/0960-1317/23/3/035013.
- [28] T. Reininger, F. Welker, and M. von Zeppelin, “Sensors in position control applications for industrial automation,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 129, no. 1–2, pp. 270–274, May 2006, doi: 10.1016/j.sna.2005.09.056.
- [29] P. Kishore, D. Dinakar, K. Srimannarayana, and P. Vengal Rao, “Vibration sensor using 2×2 fiber optic coupler,” *Optical Engineering*, vol. 52, no. 10, p. 107104, Oct. 2013, doi: 10.1117/1.OE.52.10.107104.
- [30] Z. Zhang and X. Bao, “Continuous and Damped Vibration Detection Based on Fiber Diversity Detection Sensor by Rayleigh Backscattering,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 7, pp. 832–838, Apr. 2008, doi: 10.1109/JLT.2008.919446.
- [31] Q. Sun, D. Liu, J. Wang, and H. Liu, “Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-

Zehnder interferometer,” *Opt Commun*, vol. 281, no. 6, pp. 1538–1544, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.optcom.2007.11.055.

[32] PCB Piezotronics, “accelerometer Model 352C22”, <https://www.pcb.com/products?m=352C22>.

[33] Temposonics, “R-series RH”, <https://www.temposonics.com/Products/IndustrialPositionSensors/R-SeriesPositionSensors/R-SeriesRH>.

[34] IFM, “Detector de vibraciones VVB001”, <https://www.ifm.com/mx/es/product/VVB001>.

[35] SICK, “Sensores de proximidad inductivos IMS30-15BPSNC0S”, <https://www.sick.com/cl/es/productos/sensores-de-deteccion/sensores-de-proximidad-inductivos/ims/ims30-15bpsnc0s/p/p653451>

[36] Polytec, “IVS-500 Industrial Vibration Sensor”, <https://www.polytec.com/int/vibrometry/products/single-point-vibrometers/ivs-500-industrial-vibration-sensor>.

[37] X. Hong, J. Wu, C. Zuo, F. Liu, H. Guo, and K. Xu, “Dual Michelson interferometers for distributed vibration detection,” *Appl Opt*, vol. 50, no. 22, p. 4333, Aug. 2011, doi: 10.1364/AO.50.004333.

[38] A. Fichtner *et al.*, “An illustrated guide to: Distributed and integrated fibre-optic sensing in seismology,” *Earthquake Science*, vol. 38, no. 1, pp. 67–77, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.eqs.2024.09.006.

[39] S. Liang *et al.*, “Fiber-optic intrinsic distributed acoustic emission sensor for large structure health monitoring,” *Opt Lett*, vol. 34, no. 12, p. 1858, Jun. 2009, doi: 10.1364/OL.34.001858.

[40] E. Huerta-Mascotte *et al.*, “A Core-Offset Mach Zehnder Interferometer Based on A Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber and Its Torsion Sensing Application,” *Sensors*, vol. 16, no. 6, p. 856, Jun. 2016, doi: 10.3390/s16060856.

[41] J. M. Sierra-Hernandez *et al.*, “Torsion sensing setup based on a three beam path Mach–Zehnder interferometer,” *Microw Opt Technol Lett*, vol. 57, no. 8, pp. 1857–1860, Aug. 2015, doi: 10.1002/mop.29208.

[42] D. Jauregui-Vazquez *et al.*, “Highly sensitive curvature and displacement sensing setup based on an all fiber micro Fabry–Perot interferometer,” *Opt Commun*, vol. 308, pp. 289–292, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.optcom.2013.07.041.

[43] J. C. Hernández-García *et al.*, “Use of noise-like pulses in fiber optic interferometric devices to improve sensitivity of vibration sensor,” in *Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications XXV*, P. R. Herman, R. Osellame, and A. Ben-Yakar, Eds., SPIE, Mar. 2025,

p. 44. doi: 10.1117/12.3037629.

[44] J. A. Martín-Vela *et al.*, “Highly Sensitive Fiber Ring Laser Sensor for Curvature Using a Modal Interferometer,” *IEEE Sens J*, vol. 20, no. 17, pp. 9864–9870, Sep. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2991960.

[45] M. Bianchetti *et al.*, “A Fabry–Pérot Sensing Setup Based on a Coreless Fiber for the Measurement of Ethanol Concentration in Water-based Solutions,” *Sensors and Materials*, vol. 37, no. 1, p. 13, Jan. 2025, doi: 10.18494/SAM5310.

Capítulo 2.

Estado del arte.

Este capítulo está conformado por la teoría que rige a las ondas electromagnéticas, las fibras ópticas, la interferencia, los interferómetros basados en fibra óptica, de los cuales se encuentran el interferómetro Mach-Zehnder (MZI), interferómetro Michelson (MI), interferómetro Sagnac (SI) y el interferómetro Fabri-Perot (FPI), tipos de fibra (mono modo y multimodo), lo básico de un LÁSER, moduladores acusto-ópticos, teoría del funcionamiento del EDFA y muchos otros conceptos que se requirieron para concretar este trabajo.

2.1- Ondas electromagnéticas.

Lo primordial es comprender qué es una onda. Una onda no es más que una propagación de perturbaciones que además porta energía [1]. Teniendo en cuenta esto, una onda electromagnética involucra que un campo eléctrico ($\mathbf{E}$) variable induce un campo magnético ($\mathbf{H}$) variable y viceversa [2] o bien es una combinación de ambos campos, ahora en cuanto a su generación, como lo explica la literatura en [3] y [4]. Supongamos una carga estática, dicha carga va a producir un campo eléctrico alrededor de ella, ahora si esta carga está en movimiento va a producir un campo magnético debido a que está variando el campo eléctrico, por consecuencia ambos campos comienzan a interactuar generando perturbaciones electromagnéticas que se propagan en el espacio, generando así una onda electromagnética.

De las características más notables de este tipo de ondas se encuentran las siguientes. No necesita ningún medio que la propague o soporte, estas pueden propagarse en el vacío [2, 4] debido a que no aparece ninguna partícula del medio que infiera o provoque las perturbaciones del movimiento oscilatorio. Esto es obra de la variación existente entre el campo eléctrico y el campo magnético en un punto del espacio y no de cargas oscilatorias que se acoplan entre sí [2], en palabras más cortas, se producen moviendo cargas [4]. Son ondas transversales, lo que significa que el campo eléctrico y el campo magnético son perpendiculares entre sí en la dirección de propagación [3, 4]. La característica más importante, radica en que las ondas electromagnéticas viajan a una velocidad relativa en espacio libre, llamada velocidad de la luz [3, 4].

En la figura 2.1 se muestra una onda electromagnética viajando en espacio libre, dicha figura es tomada de [2].

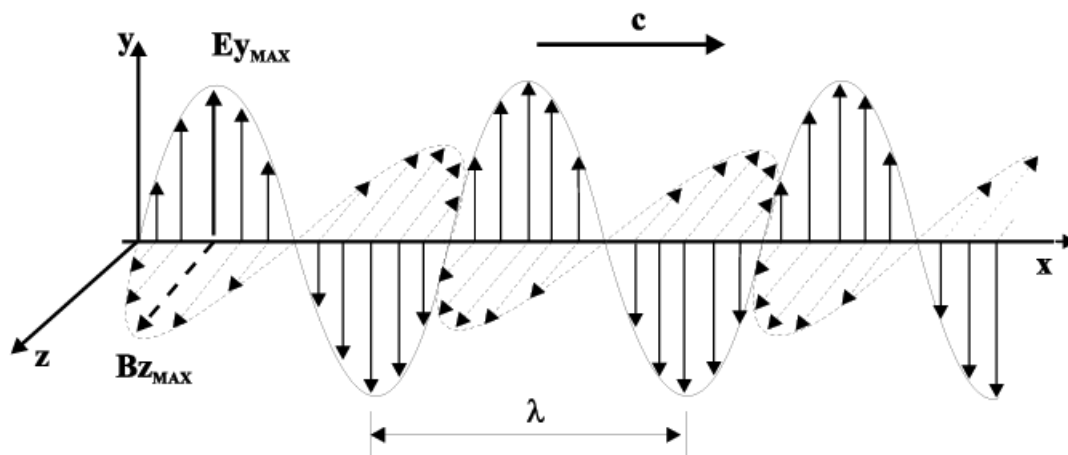


Fig 2.1.- Propagación en espacio libre de una onda electromagnética [2].

2.1.1.- Ecuaciones de Maxwell y la ecuación de onda.

Todo fenómeno electromagnético, esto incluye la propagación de la luz en fibras ópticas [5], recordando que la luz es un tipo de onda electromagnética, que en algunos

casos tiende a comportarse como partícula [1]. Regresando al tema, las ecuaciones de Maxwell rigen a los fenómenos electromagnéticos, cada una de estas es mostrada de la ecuación 2.1 a la 2.4 [3, 5-7].

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

Estas son las ecuaciones de Maxwell, de forma generalizada, la ecuación 2.1 corresponde a la ley de inducción electromagnética; la ecuación 2.2 corresponde a la ley de Ampère; la ecuación 2.3 corresponde a la ley de Gauss; y la ecuación 2.4 corresponde al flujo magnético y que indica que no existen los monopolos magnéticos [7]. Donde $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$ son los campos eléctricos y magnéticos respectivamente; mientras que $\mathbf{J}$ es la densidad en corriente; ρ_f es la densidad de carga eléctrica; por último, $\mathbf{D}$ y $\mathbf{B}$ las densidades de los campos eléctricos y magnéticos respectivamente, que a su vez se expresan de la siguiente manera como se muestra en las ecuaciones 2.5 y 2.6, donde $\mathbf{P}$ es la densidad polarización, $\mathbf{M}$ el momento dipolar, ϵ_0 y μ_0 son las constantes de permitividad eléctrica y permeabilidad magnética respectivamente[5, 6].

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

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

Estas seis ecuaciones son empleadas para describir fenómenos electromagnéticos, para nuestro caso donde se requiere conocer la propagación de la luz en las fibras ópticas, se deben tomar ciertas consideraciones, ya que al tratarse de luz propagándose en una fibra óptica se tiene que $\mathbf{J} = 0$, $\mathbf{M} = 0$ y $\rho_f = 0$ [5], esto debido a que la fibra óptica es una guía de onda dieléctrica. En cuanto a la obtención de la ecuación de onda, tomando las anteriores consideraciones, lo primero es tomar la ecuación 2.1 y en ambos la dos de la ecuación aplicar un producto cruz con el operador nabla, tal y como se muestra en la ecuación 2.7.

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

Comenzando por el lado izquierdo se aplica la siguiente identidad mostrada en la ecuación 2.8.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (2.8)$$

En base a la ecuación 2.3 y 2.5, además de que la densidad de carga eléctrica es cero, se tiene la ecuación 2.9.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.9)$$

La ecuación 2.9 se sustituye en la ecuación 2.8, por último, ese resultado se sustituye en la ecuación 2.7, a su vez se opta por desarrollar más el lado derecho de la misma ecuación, obteniendo 2.10.

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) \quad (2.10)$$

Sustituyendo la ecuación 2.2 en la ecuación 2.10, se obtiene la ecuación 2.11.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

En base a la ecuación 2.11, se sustituye la ecuación 2.5, tomando en cuenta la ecuación 2.12, donde c es la velocidad de la luz en el vacío, obteniendo la ecuación 2.13, la ecuación de onda.

$$\frac{1}{c^2} = \mu_0 \epsilon_0 \quad (2.12)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Con esta ecuación se puede describir la propagación de la luz en las fibras ópticas, colocando las condiciones de frontera adecuadas, claro. Para observar una demostración más detallada de esta ecuación puede consultar [5] o [6].

2.2.- Ondas acústicas.

Como ya se definió en la sección de ondas electromagnéticas, una onda es una propagación de perturbaciones [1]. Ahora bien, la acústica se define como la generación, transmisión y recepción de energía en forma de vibraciones [8]. Ahora bien, una onda acústica puede ser vista como perturbaciones en el ambiente, ya sea perturbaciones en el agua o algún otro fluido y por perturbaciones extremadamente pequeñas en la presión [9].

2.2.1.- Vibraciones.

Cualquier movimiento que se repita después de un intervalo de tiempo se conoce como vibración y a su vez es la definición de oscilación [10]. Existen varios tipos de vibración entre los cuales se encuentran la vibración libre y la vibración forzada. La vibración libre es aquella se produce dejando que el sistema vibre por sí mismo después de una perturbación inicial. Para que se considere “libre” no debe actuar ninguna fuerza externa [10].

La vibración forzada como bien dice su nombre se produce cuando se somete a una fuerza externa que puede ser una fuerza repetitiva, un ejemplo claro es la oscilación que aparece en máquinas como los motores [10]. Existe un problema en el que radica que, si la frecuencia de vibración por parte de la fuerza externa coincide con la frecuencia natural del sistema, esto genera oscilaciones más fuertes que son un riesgo, como en el caso de los terremotos, este fenómeno es conocido como resonancias [10].

2.3.-Guía de onda dieléctrica u óptica.

Una guía de onda óptica no es más que una estructura dieléctrica, la cual puede dirigir o transmitir energía de ondas electromagnéticas (luz) en el rango de longitudes de onda desde el espectro visible (400nm-700nm), el espectro infrarrojo (mayor a 700nm) y en casos especiales en el rango del espectro ultravioleta (menor a 400nm) [11], este tipo de guías de onda emplean el principio de reflexión total interna para que así la luz sea dirigida desde el inicio de la guía de onda hasta su final, este principio se logra cuando se rodea el camino óptico con un material de índice de refracción menor [12].

De manera que las guías de onda ópticas están formadas por tres partes, la primera es la parte central que conocida como núcleo y es donde se transmite la mayor parte de la luz, la segunda es el revestimiento la cual tiene un índice de refracción menor al núcleo, esta rodea el núcleo para así lograr la reflexión total interna y por último un recubrimiento de protección para poder manipular la guía de onda [11], más adelante en este capítulo se explica lo que es el índice de refracción.

Toda guía de onda óptica tiene una característica conocida como longitud de onda de corte o frecuencia de corte [12], prácticamente son algo similar ya que conociendo una se obtiene la otra, aunque en la mayoría de los casos los fabricantes emplean la longitud de onda de corte en sus hojas de datos.

La longitud de onda de corte es la condición en la que la guía de onda puede propagar un solo modo [12], si se emplea una longitud de onda menor a la longitud de onda de corte se puede propagar más de un solo modo, esto se relaciona con otro parámetro importante llamado parámetro V [5].

2.3.1.- Parámetro V.

El parámetro V determina el número de modos que puede soportar o propagar una guía de onda óptica, cuando la guía de onda solo puede propagar un solo modo o se comporta como monomodo el valor de V tiene que ser inferior a 2.405 [1, 5, 12], en caso de que su valor sea superior a 2.405 la guía de onda se comporta como multimodo, por supuesto para obtener este valor se emplea la ecuación 2.14.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \left(\sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \right) \quad (2.14)$$

En esta ecuación “a” corresponde al radio de la guía de onda; λ corresponde a la longitud de onda; n_{co} corresponde al índice de refracción del núcleo; y n_{cl} corresponde al índice de refracción del revestimiento. Con esta ecuación se puede conocer cuando una guía de onda actúa como multimodo.

2.3.2.- Fibras ópticas.

Realmente desde que comenzó la sección 2.3 se hacía referencia a las fibras ópticas, de manera detalla una fibra óptica es una guía de onda óptica con una geometría cilíndrica [4, 13], dicha estructura radica en un cilindro central que funge como el núcleo que su vez es rodeado por otro cilindro de menor índice de refracción, el cual es el revestimiento [1, 5].

Existen fibras ópticas con dos tipos de índice, las de índice escalonado y las de índice graduado. ¿Cuál es la diferencia? Simple, la fibra óptica de índice escalonado tiene un cambio abrupto entre los índices de refracción del núcleo y del revestimiento a lo largo del radio de la fibra óptica, mientras que la de índice graduado su índice de refracción del núcleo tiende a reducirse gradualmente a lo largo del radio de la fibra hasta llegar al revestimiento [1, 4, 5, 11], en la figura 2.2 se muestran estos comportamientos, dicha imagen es obtenida de [4].

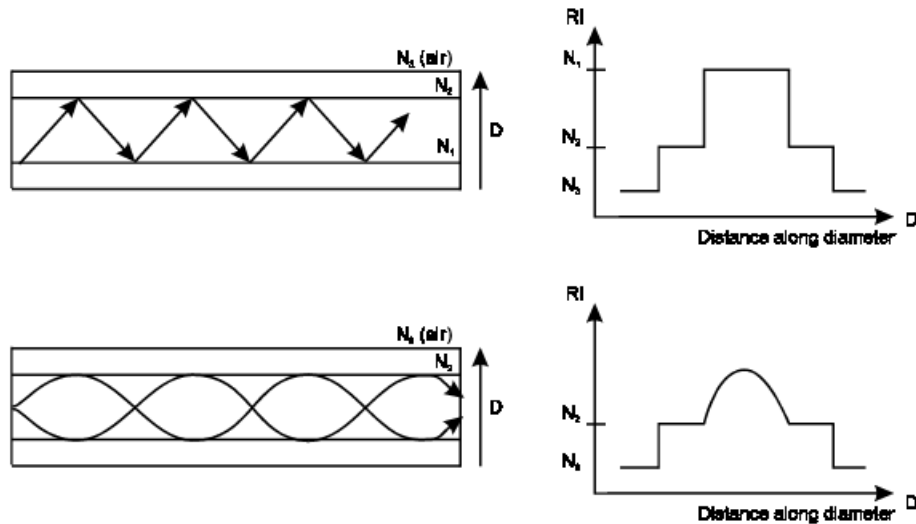


Fig 2.2.- Estructura de una fibra óptica y sus tipos de índice de refracción [4].

El material principal de las fibras ópticas es el vidrio de sílice debido a sus propiedades de bajas pérdidas, este material es fusionado con moléculas de SiO_2 para ser sintetizado [5]. Ahora lo más importante es lograr que los índices de refracción para el

núcleo y el revestimiento sean distintos, para ello se emplean dopantes que afecten el índice de refracción, tales como: GeO_2 y P_2O_5 para dopar el núcleo, ya que estos incrementan el índice de refracción, en tanto para el revestimiento se emplea boro y flúor debido a que reducen el índice de refracción [5].

2.3.3.- Fibras monomodo, multimodo y el concepto de modo.

Anteriormente en las secciones 2.3 y 2.3.1 se hace mención del comportamiento monomodo y multimodo, igualmente en fibras ópticas existen fibras ópticas monomodo y multimodo, ¿cuál es la diferencia? Su diferencia radica en el tamaño de su núcleo, siendo que para una fibra monomodo típicamente el radio del núcleo es inferior a $5\mu\text{m}$ mientras que para una multimodo se tienen radios de $25\mu\text{m}$ [5].

El concepto de modo puede ser relativamente abstracto para quienes comienzan en el nicho de la óptica, no obstante, la definición de modo es un campo de distribución transversal que se propaga a lo largo de la fibra óptica sin ningún cambio en su campo de distribución con la excepción de algunos cambios en la fase, matemáticamente es definido por la ecuación 2.15 [1].

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.15)$$

En ella $\psi(x, y)$ representa el campo transversal del perfil; β representa la constante de propagación; los modos se propagan en la dirección z por lo que se emplea en forma de exponencial compleja para representar una onda electromagnética; por lo que ω representa la frecuencia de dicha onda electromagnética [1].

Sí bien este concepto es algo abstracto también se debe dejar en claro que para la caracterización de las fibras ópticas se emplean un numero finito de modos que son guiados a lo largo de la fibra, cada modo tiene su propio perfil de campo transversal por lo que consecuentemente a cada modo le corresponde igualmente un valor definido de β [1]. Ahora hay un problema ¿cómo se obtienen los perfiles de campo transversal y las constantes de propagación? Ambos parámetros se obtienen resolviendo las ecuaciones de Maxwell o en específico la ecuación de onda (ecuación 2.13) [1].

Entonces en base a lo anterior se tiene otra definición un poco más simple de lo que es un modo, esta radica en que un modo es una solución a la ecuación de onda que describe la propagación de una onda electromagnética (luz) a lo largo de la fibra óptica. En este ámbito se han observado diversos modos colocando la fibra mirando a una pantalla, de manera que se observan los patrones de los campos transversales, en la figura 2.3 se muestran varios de estos patrones, dicha figura es tomada de [1].

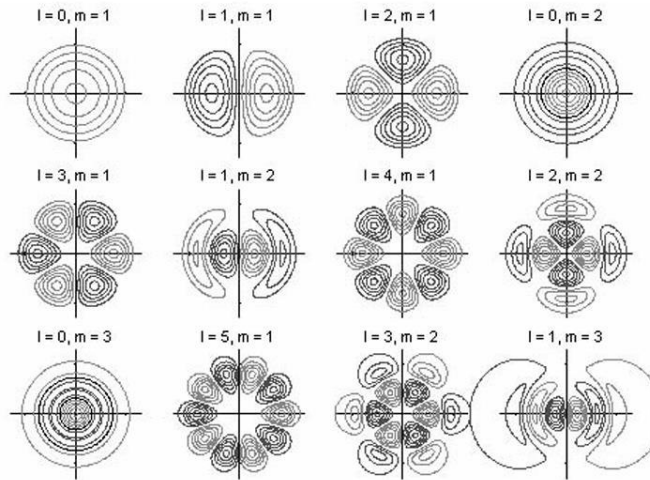


Fig 2.3.- Patrones transversales de modos guiados de bajo orden [1].

En la figura 2.3 se muestran dos valores “l” y “m”, estos valores especifican el nombre y apellido del modo, estos son los más conocidos y tienen por nombre LP_{lm} que es el acrónimo de linealmente polarizado, por lo que el principal de ellos es el LP_{01} , alias el modo fundamental [1]. Ahora en base a esta figura se observa que un modo también puede ser definido como una distribución de intensidad.

2.3.4.- Ley de Snell, ángulo crítico, reflexión total interna, apertura numérica e índice de refracción.

La luz tiende a viajar a distintas velocidades cuando se propaga en un medio como lo es la fibra óptica, vidrio, agua, etc [1, 4]. Existe un cociente que permite conocer que tan lento o rápido viaja la luz dentro de un medio en comparación con la velocidad de la luz en el vacío, este es conocido como el índice de refracción [1, 4, 14]. Este cociente es mostrado en la ecuación 2.16.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.16)$$

Donde n es el índice de refracción del material; c la velocidad de la luz en el vacío; y v la velocidad de la luz en el medio, con la ecuación 2.16 se puede definir que a mayor índice de refracción la luz es más lenta en ese medio, mientras que si el índice de refracción es menor la velocidad será mayor [1, 4, 14].

Willebrod van Roijen Snell fue un astrónomo y matemático neerlandés que describió una relación de la refracción de la luz viajando en distintos medios en 1621 [4]. Esta relación es mostrada en la ecuación 2.17.

$$n_{co}\sin(\theta_1) = n_{cl}\sin(\theta_2) \quad (2.17)$$

En donde n_{co} es el índice de refracción del núcleo; n_{cl} es el índice de refracción del revestimiento; θ_1 es el ángulo de incidencia del rayo de luz; mientras que el θ_2 es el ángulo del rayo de luz refractado [4]. Esta relación también puede ser descrita con cosenos como en [11] la única diferencia entre ellas es donde se toma el ángulo.

En base a esta ley se puede describir el ángulo crítico, como el ángulo θ_1 que logra que el ángulo θ_2 (que es el de refracción) sea igual a 90° , el rayo de luz que pertenece a θ_2 se propaga de forma paralela en la interfaz la guía de onda, es decir se queda confinado entre el núcleo y el revestimiento [4, 11], el ángulo crítico está dado por la ecuación 2.18.

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_{cl}}{n_{co}}\right) \quad (2.18)$$

Dónde θ_c es el ángulo crítico, mientras que los índices de refracción ya son conocidos por la descripción de la ecuación 2.18.

La reflexión interna tiene bastante que ver con los dos conceptos anteriores, por ello se otorga este contexto, es importante este principio ya que está es la manera en la que operan las fibras ópticas de índice escalonado, dicho principio se logra cuando el ángulo de incidencia es mayor al ángulo crítico θ_c , esto va a provocar que exista una reflexión del rayo de luz incidente dentro del núcleo, dicho rayo o haz de luz se queda confinado dentro del núcleo, por ello es importante que el revestimiento tenga un índice de refracción inferior al del núcleo de lo contrario este principio no ocurre [4, 15]. Este principio logra propagar la mayor cantidad de energía del haz de luz siendo en los casos reales del 99.9% e idealmente el 100% de la energía del rayo incidente [4].

En la figura 2.4 se muestran los ángulos de incidencia cuando se refracta el haz de luz, cuando viaja de forma paralela entre ambos medios (núcleo y revestimiento) y cuando se refleja el haz de luz, esta imagen es tomada de [4]; mientras que la figura 2.5 muestra la reflexión total interna dentro de una fibra óptica, esta imagen es tomada de [15].

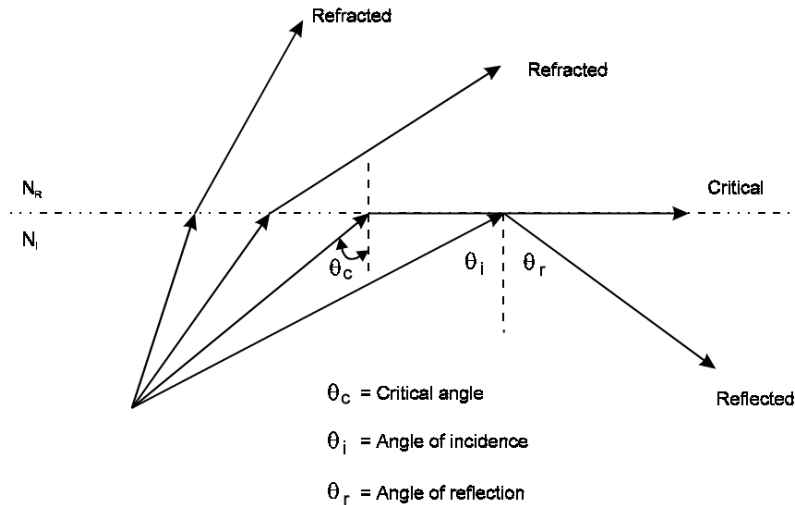


Fig 2.4.- Ángulos de incidencia para obtener refracción, reflexión y el ángulo crítico [4].

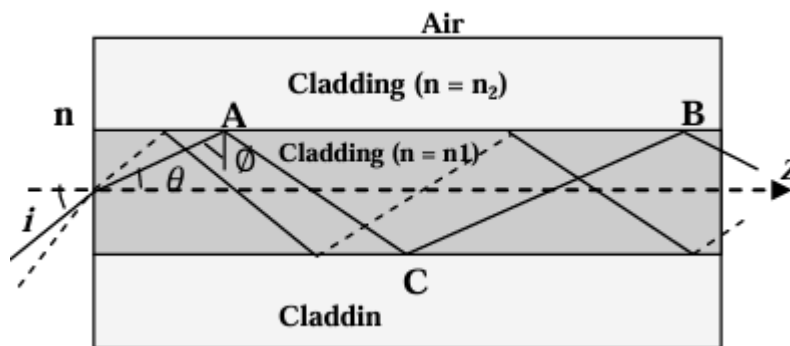


Fig 2.5.- Reflexión total interna dentro de una fibra óptica [15].

Con lo anteriormente fomentado, el ángulo de incidencia debe ser mayor al ángulo crítico es requisito para que la luz puede viajar dentro de la fibra óptica y que se cumpla el principio de reflexión total interna, sin embargo, existe un límite en el ángulo de incidencia para que logre entrar en el núcleo y se propague exitosamente, cualquier haz que sea de un ángulo menor al ángulo crítico se verá propagado en el revestimiento hasta cierta distancia para luego desaparecer [4].

Como la estructura de la fibra óptica es cilíndrica existe en su entrada un cono, dicho cono es imaginario. Para que la luz pueda entrar al núcleo a través del cono, todos los rayos o haces deberán golpear el revestimiento teniendo un ángulo de incidencia superior al ángulo crítico, de manera que el haz pueda transmitirse exitosamente. Este cono es conocido como cono de aceptación.

Como se aprecia en la figura 2.5, los haces de luz pueden entrar dentro de la

fibra óptica en diferentes ángulos y aun así mantener la reflexión total interna, ya que se habló del cono de aceptación, este último se relaciona con el concepto de apertura numérica, este parámetro controla cuanta luz puede entrar dentro de la fibra óptica midiendo el ángulo óptimo para que ocurra la reflexión total interna, el cono de aceptación es complicado de determinar, no obstante, la apertura numérica puede determinarse con la ecuación 2.19 [4, 15].

$$NA = \sin(\theta_{NA}) = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.19)$$

Donde θ_{NA} es el ángulo del cono de aceptación; mientras que n_{co} y n_{cl} son los índices de refracción del núcleo y del revestimiento respectivamente. Esta ecuación representa la relación entre el cono de aceptación y la apertura numérica [4, 15].

Otra definición más simple de la apertura numérica es la medida que especifica la habilidad para recolectar luz de una fibra óptica [4]. Por lo que se puede inferir que, a mayor apertura numérica, mayor será la cantidad de luz confinada dentro de la fibra óptica. Además, este parámetro permite que sea más simple acoplar la luz dentro de la fibra cuando se trata de aperturas numéricas altas [4, 15].

2.3.5.- Pérdidas en la fibra óptica y ventanas de comunicaciones.

La atenuación en las fibras ópticas ocurre debido a diversos problemas, entre ellos se encuentra la dispersión, absorción vibracional y por la dispersión del material causada por impurezas en el proceso de fabricación [13].

En base a lo anterior, es importante conocer cuanta potencia se está perdiendo desde la entrada a la salida de la fibra óptica [5], por lo que se utiliza la ecuación 2.20.

$$P_T = P_0 e^{-\alpha L} \quad (2.20)$$

En ella P_T es la potencia de a transmitida o la potencia de salida; P_0 es la potencia de entrada; L es la longitud física de la fibra óptica; y por último α es la constante de atenuación que es medida a partir de las pérdidas totales de la fibra óptica, comúnmente la constante de atenuación es medida en dB/Km [1, 5]. Con ello es posible utilizar la ecuación 2.21 para la obtención de la constante de atenuación.

$$\alpha_{dB} = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_T}{P_0} \right) = 4.343\alpha \quad (2.21)$$

Particularmente los decibeles o dB son empleados para conocer pérdidas o ganancias en diversos sistemas, los decibeles están relacionados con el cociente o la tasa de dos cantidades de energía [1], tomando en cuenta la ecuación 2.20, si eliminamos L de ella únicamente se está calculando las pérdidas de la entrada a la salida sin tomar en cuenta la distancia de la fibra, el uso de una escala logarítmica se debe a que si el cociente de ambas energías varía bastante el uso de una escala lineal puede no ser conveniente [1].

Como es de esperarse, la atenuación también depende de la longitud de onda incidente en la fibra óptica, en ciertas longitudes de onda se puede apreciar baja atenuación siendo que la menor pérdida se encuentra en 0.2dB/Km [5], en las zonas donde existe baja atenuación se conocen como ventanas de comunicación de las cuales existen tres [4]. En la figura 2.6 se muestran las ventanas de comunicación de una fibra óptica monomodo, dicha figura es tomada de [4].

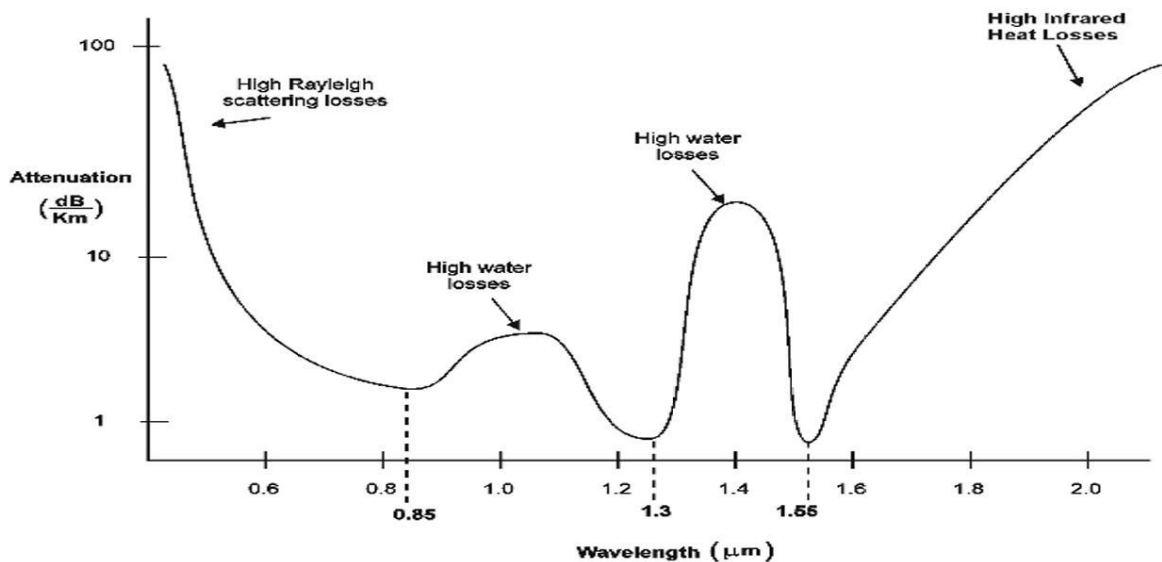


Fig 2.6.- Ventanas de comunicación y respuesta típica a la atenuación de una fibra óptica [4].

En la figura 2.6 se aprecia que en las longitudes de onda de 0.85μm, 1.3μm y 1.55μm tienen baja atenuación, siendo que para la primera ventana de comunicaciones de 0.85 μm, en esta ventana los fotodetectores y las fuentes de emisión eran simples y de bajo costo, además eficientes [4], es la longitud de onda preferida para sistemas de corto alcance, su rango de atenuación ronda entre 2 a 3.2 dB/Km [4, 16].

La segunda ventana de comunicaciones en 1.3μm es preferida en la mayoría de los sistemas de comunicación por las atenuaciones aún más bajas que en la primera ventana, estas pérdidas rondan entre 0.3 a 0.9 dB/Km [4], sin embargo, existe la desventaja que las fuentes de emisión son relativamente caras y complicadas de fabricar. No obstante,

esta longitud de onda es empleada en sistemas de largo alcance y de alta velocidad [4, 16].

La tercera ventana de comunicaciones que se encuentra en $1.55\mu\text{m}$, exhibe las menores pérdidas entre todas las ventanas, siendo que estas radican entre 0.15 a 0.6 dB/Km [4, 5, 16], sí bien, esta ventana es perfecta por sus bajas pérdidas, tiene el inconveniente de que los dispositivos de transmisión y recepción no son tan avanzados y aún algunos se encuentran en una fase experimental en comparación con los dispositivos de la segunda ventana, no obstante a futuro se esperan grandes avances debido a las bajas pérdidas [4].

2.4.- Efectos ópticos.

La luz tiende a tener ciertos comportamientos cuando interactúa con la materia, dando así varios efectos ópticos. Entre ellos se encuentran la refracción, reflexión, dispersión y difracción.

Cuando la luz se propaga de un medio con un índice de refracción definido a otro medio con un índice de refracción distinto o bien de un medio a otro medio con distinta densidad, esto va a provocar que la luz que se está propagando cambie de dirección, este fenómeno es conocido como refracción [3, 17]. Un ejemplo de la refracción puede ser visto en la figura 2.4.

La reflexión es un fenómeno que se observa en ondas electromagnéticas por lo que no se limita solo a la luz, cuando la onda electromagnética encara la superficie de un medio mientras la onda se transmite por otro medio, la onda electromagnética regresa al mismo medio de donde proviene [18]. Para una definición más rigurosa, cuando un haz de luz impacta en la superficie de un material transparente o en una interfaz de dos medios transparentes (aire y vidrio), parte de la luz siempre es dispersada hacia atrás, esto se le conoce como reflexión [3].

La difracción es un fenómeno que ocurre en las ondas (en general, ya sea electromagnética o acústica) cuando se encuentran con alguna estructura física, cuando esto ocurre la onda se dispersa alrededor de la estructura que bloquea su paso [3, 19].

La dispersión es el fenómeno que ocurre cuando las ondas de diferentes longitudes de onda se propagan a distintas velocidades cuando atraviesan un medio, haciendo que las ondas se separen [20]. Existe otra “dispersión” o por lo menos la traducción al español así lo dice, esta es el scattering, únicamente se dará la definición de Rayleigh Scattering. La dispersión de Rayleigh es aquella dispersión de la radiación electromagnética en partículas que son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la radiación, tamaños que radican en por debajo de $1\mu\text{m}$ [3, 21].

También existe la dispersión cromática, cuando una onda electromagnética

interactúa con los electrones ligados de un material dieléctrico, la respuesta del medio en general depende de la frecuencia óptica o de la longitud de onda [5]. Esta propiedad se manifiesta en el índice de refracción, haciéndolo dependiente de la frecuencia óptica [5]. La dispersión cromática se relaciona a las frecuencias de resonancia a las cuales el medio absorbe radiación electromagnética a través de oscilaciones de los electrones ligados [5].

2.5.- Coherencia temporal y espacial.

La coherencia es un concepto importante en óptica, este describe que tan diferentes son los valores del campo óptico complejo (la fase). Este valor puede tener cambios en espacio y/o tiempo [3, 22]. Se dice que un campo óptico es coherente cuando se tiene una relación de fase estable y predecible [3, 22]. Existe la coherencia parcial, esta indica que la relación de fase no es del todo perfecta, haciendo que llegue a perderse la coherencia a lo largo del tiempo y/o espacio [3, 22].

Existen dos tipos de coherencia, la coherencia temporal y la coherencia espacial. La coherencia temporal es el grado de relación de fase entre los campos eléctricos en un punto del espacio, pero en diferentes instantes de tiempo, siendo que la alta coherencia espacial temporal indica que las oscilaciones del campo óptico mantienen la misma fase a lo largo del tiempo [3, 6, 22].

La coherencia espacial es el grado de relación de fase entre los campos eléctricos en diferentes posiciones transversales a lo largo del haz de luz, alta coherencia espacial indica que tan fuerte es la direccionalidad y la concentración de los haces de un láser, además de la calidad del haz [3, 6, 22].

2.6.- El láser.

La palabra láser es un acrónimo que por sus siglas en inglés indica: Light Amplification by Stimulated Emission Radiation o bien en español Luz amplificada por emisión de radiación estimulada [6]. Los láseres constan de tres partes fundamentales para su funcionamiento las cuales son: Medio de ganancia, cavidad resonante y el mecanismo de excitación o bombeo [2]. El funcionamiento del Láser radica en que el bombeo suministra energía al medio de ganancia, esto en consecuencia hará que la energía sea amplificada, en cuanto a la cavidad resonante que es un componente fundamental, puede ser una estructura o bien dos espejos, uno totalmente reflejante y otro parcialmente reflejante, esto va a conseguir que la energía se siga amplificando y que a su vez sea emitida [2], en la figura 2.7 puede apreciarse el esquema de un láser, esta figura es tomada de [2].

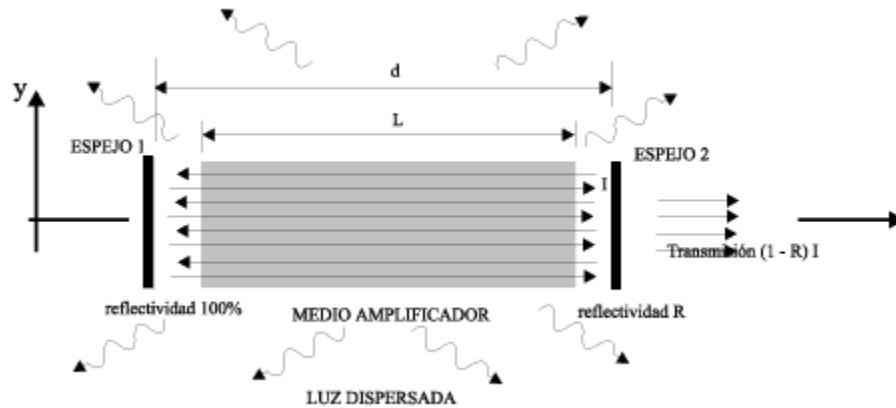


Fig 2.7.- Esquema básico de un láser [2].

La luz láser tiene diversas propiedades que lo vuelven especial, entre ellas se encuentran la direccionalidad, la monocromaticidad y la coherencia [6], el medio activo puede ser un material gaseoso como lo es el gas He-Ne o un material sólido como un cristal de rubí [6].

La direccionalidad se refiere a la capacidad de la luz láser para mantenerse en una dirección determinada, precisa y estrecha a medida de la propagación [6], la monocromaticidad hace referencia a que la luz láser consiste únicamente de un solo color, en otras palabras, la luz láser consiste en una sola longitud de onda, por último, la coherencia [6] que se describió en la sección 2.5, por lo que no se volverá a describir. En la figura 2.8 se muestra el espectro de un LED contra el espectro de un diodo láser, esta figura pertenece a [1].

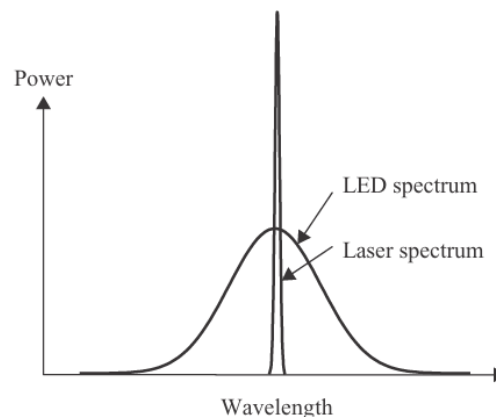


Fig 2.8.- Comparación espectral de un LED y un diodo láser [1].

2.7.-WDM.

WDM es un acrónimo que por sus siglas en inglés significa Wavelength

Division Multiplexing o en español, Multiplexación por división de longitud de onda [4, 14, 23]. Es un método comúnmente utilizado en sistemas de comunicación para incrementar el ancho de banda, esta técnica trabaja multiplexando distintas longitudes de onda dentro de la fibra óptica [4]. Filtros ópticos son empleados para transmitir de forma precisa y definida las longitudes de onda, los filtros ópticos también sirven para asegurar que las señales de distintas fuentes no se sobrepongan [4].

La técnica permite enviar miles de señales diferentes que son portadas a lo largo de una sola fibra óptica, es posible separar las distintas longitudes de onda de una fuente de luz independiente o independientes, estos pueden ser varios láseres o un solo LED, la técnica va a separar los distintos componentes de luz por medio de acopladores sensibles a la longitud de onda [14].

2.8.- Amplificadores de fibra óptica.

La fibra dopada con erbio (EDF) es un tipo de fibra óptica que su núcleo está dopado con iones de erbio Er^{3+} [24], es una invención de la década de los 80s que ha demostrado ser versátil con un amplio rango de aplicaciones hasta hoy en día, entre algunas aplicaciones se encuentran: Fuentes de amplio espectro, amplificadores ópticos y láseres sintonizables [24]. La banda ancha de las fuentes ópticas ha sido aplicada en diversas áreas de interés como lo son la caracterización de dispositivos ópticos, giroscopios, etc. La emisión espontánea amplificada (ASE) en la EDF se emplea para la construcción de fuentes de luz de alta potencia y amplio espectro [24, 25].

El amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) fue un invento revolucionario para los sistemas de comunicaciones en los 90s [24], un EDFA es comúnmente utilizado en sistemas de comunicación, ya que tienen gran ventaja contra los amplificadores ópticos basados en semiconductores, las ventajas del EDFA son: Alta ganancia, alta potencia óptica, baja diafonía entre los canales de longitud de onda, acoplamiento simple [26].

El proceso de amplificación de una EDF normalmente es descrito por un sistema de 3 niveles, Cuando la EDF es bombeada por un láser de 974nm, los iones de Er^{3+} son excitados del estado de baja energía (E1) a el estado de energía más alto (E3), los iones excitados de erbio en el estado E3 decaen al nivel de energía E2 (metaestable) a través de la emisión no radiativa [24]. Los iones excitados en E2 eventualmente regresan al estado E1 a través de la emisión espontánea, la cual produce fotones dentro del rango de longitudes de onda desde 1520nm a 1570nm. La emisión espontánea será amplificada a lo largo que se propague dentro de la fibra, especialmente si la potencia de bombeo se ve incrementada. Por lo que ahora se pasa página a la emisión espontánea amplificada o ASE, ya que está cubre del rango de longitudes de onda desde 1520nm a 1570nm, siendo posible usarse como fuente de amplio espectro [24]. La figura 2.9 muestra este proceso, dicha figura es tomada de [24].

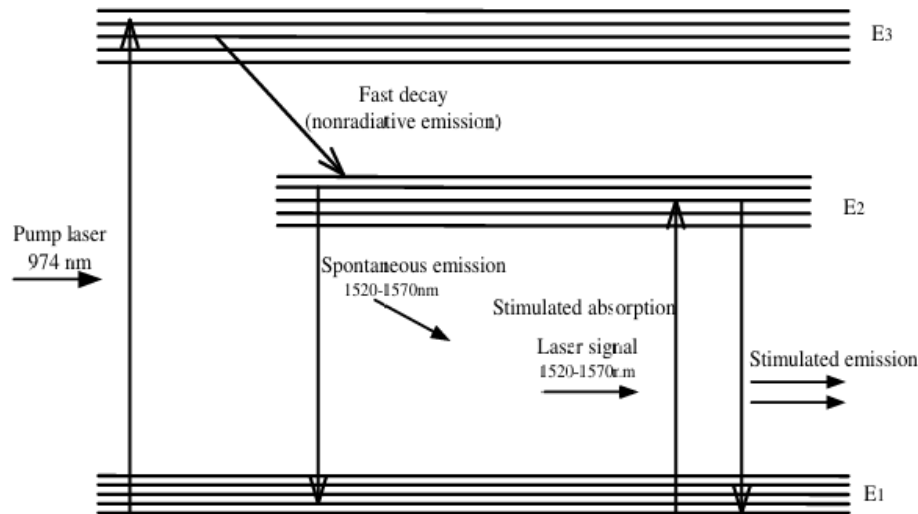


Fig 2.9.- Esquema de los niveles de energía del Er^{3+} simplificado [24].

Ahora en base a la literatura de [16]. El EDFA debe ser ópticamente bombeado por una fuente de alta potencia. En los arreglos más comunes es empleado un WDM para combinar la longitud de onda del bombeo a la EDF, el uso del WDM es preferente a un acoplador óptico debido a que en el proceso de combinación el acoplador tiene pérdidas significativas. Se emplea un aislador óptico para evitar el impacto de las reflexiones debido a la interacción de las interfaces de los componentes ópticos. Ya que el EDFA otorga una ganancia óptica amplia, cualquier vestigio de reflexión es capaz de causar oscilaciones y por tanto degradar el desempeño del EDFA [16], en la figura 2.10 se muestra el esquema típico de un EDFA, esta figura es tomada de [16].

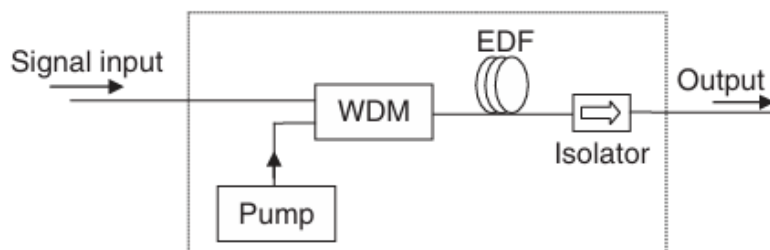


Fig 2.10.- Configuración típica de un EDFA [16].

En cuanto a su proceso de bombeo se vuelve a mencionar un sistema de 3 niveles. La banda prohibida entre el estado base o de baja energía y el estado excitado es aproximadamente de 1.268 eV; por tanto, el bombeo de fotones a 980 nm son aceptados para lograr excitar los iones del nivel base al nivel excitado, lo que crea una inversión de población. Exactamente los portadores de energía permanecen 1 μs en el estado excitado y

después decaen al estado metaestable por medio de una emisión o transición no radiativa. Gracias a este proceso la energía que se pierde es transformada en fotones en la fibra, lo que provoca el característico color verde o fluorescencia de la EDF. La banda de energía del estado metaestable se extiende aproximadamente de 0.8eV a 0.84eV, los cuales corresponden a las longitudes de onda de 1480nm a 1550nm [16, 26].

Ahora dentro de la banda de energía del estado metaestable, los portadores tienden a moverse hacia la parte inferior desde la parte superior de la banda través de un proceso conocido como relajación intrabanda. Para finalizar, la recombinación radiativa ocurre cuando los portadores de la parte inferior del estado metaestable pasan al estado base, emitiendo así fotones en la longitud de onda de 1550nm. El tiempo de vida de un portador ronda en los 10ms, lo cual es con creces mayor al tiempo de vida de un portador del estado excitado. Gracias a esto, un bombeo de 980nm permite que la mayor parte de portadores sean acumulados en el estado metaestable, haciendo que al final el sistema se simplifique a dos niveles para la mayoría de las aplicaciones que se pueden emplear. No obstante, la EDF puede ser bombeada con una longitud de onda de 1480nm, lo que corresponde a la banda prohibida del estado metaestable y el estado base, es decir, el sistema se simplifica a dos niveles, debido a que a esa longitud de onda los portadores son excitados directamente al estado metaestable [16, 26].

En la figura 2.11 se muestran ambos casos cuando se bombea con 980nm y 1480nm, esta figura es obtenida de [16]

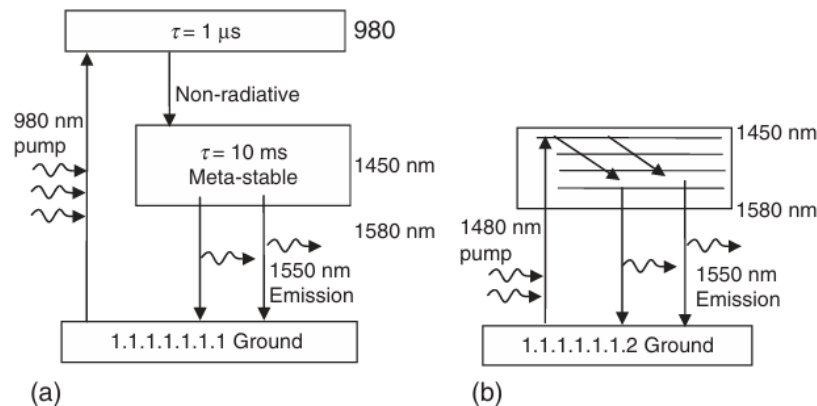


Fig 2.11.- Diagramas de energía simplificados de los iones de Er^{3+} a) bombeo de 980nm b) bombeo de 1480nm [16].

2.9.- Interferencia.

La interferencia óptica corresponde a la interacción de dos o más ondas de luz que dan como resultado una irradiancia o intensidad que se desvía de la suma cada uno de los componentes de las irradiancias [3], es decir, no es como tal una superposición, aunque en cierta medida tiene que ver. Los dispositivos que producen interferencia en sistemas

ópticos son conocidos como interferómetros [3]. La luz es un fenómeno vectorial, por lo que se puede aprovechar para obtener un entendimiento intuitivo para la interferencia, obteniendo de cierta forma la ecuación de interferencia por medio de cantidades escalares. En base al principio de superposición la intensidad del campo eléctrico en un punto en el espacio puede describirse como la suma de varios campos eléctricos, para el caso más simple se consideran dos campos, no obstante, es más simple trabajar con escalares que con vectores por ello se reemplazan los vectores del campo eléctrico con las intensidades o irradiancias para un análisis más simple [3]. La ecuación 2.22 muestra la ecuación de interferencia.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad (2.22)$$

En ella el termino I representa la irradiancia total; mientras que I_1 e I_2 representan la irradiancia del primer haz de luz y del segundo; el último término de la suma representa la interferencia que está ligado a un ángulo δ el cual representa la diferencia de fase entre ambos haces de luz. Gracias a la diferencia de fase se pueden obtener dos tipos de interferencia; interferencia constructiva y destructiva [3].

Cuando el $\cos(\delta) = 1$, es decir $\delta = \pm 2\pi n$, donde n es un numero positivo real, se obtiene la irradiancia máxima total del sistema, siendo que es la suma de las irradiancias y el termino de interferencia, esto quiere decir que los haces de luz están en fase, haciendo referencia a la interferencia total constructiva. Cuando $0 < \cos(\delta) < 1$, se encuentran fuera de fase, no obstante, esta diferencia de fase no es muy amplia, esto indica que hay una contribución constructiva, de ahí el nombre [3].

En cambio, cuando el $\cos(\delta) = 0$, ocurre cuando los haces están fuera de fase 90° , caso contrario donde los haces sí estaban en fase, esto provoca que la irradiancia sea total sea la suma de la I_1 e I_2 . Mientras tanto si $0 > \cos(\delta) > -1$ se obtiene la interferencia destructiva, ya que esto lejos de darle una contribución en forma de “suma” a la irradiancia total la va a hacer más pequeña, por ello se dice que este es un comportamiento destructivo, por último, cuando $\cos(\delta) = -1$ se obtiene la irradiancia mínima total del sistema, e igualmente ha ce referencia a la interferencia total destructiva [3].

Existen condiciones a considerar para que la interferencia sea existente en un sistema. La primera es que para que dos haces de luz interfieran entre sí y produzcan un patrón estable, deben tener la misma frecuencia o por lo menos debe ser lo bastante cerca. Una diferencia significativa en la frecuencia puede resultar en una variación rápida que se vuelve dependiente del tiempo y la diferencia de fase, lo que provoca que el termino de interferencia sea en promedio cero. Por ejemplo, sí se tienen dos fuentes de luz blanca los componentes rojos solo interfieren con los rojos, los azules con los azules y los verdes con

los verdes. La segunda condición es que las ondas tengan una amplitud igual o por lo menos similar para observar patrones claros en la interferencia, las zonas espectrales que tienden a cero son regiones de interferencia destructiva, mientras que las que zonas que tienden a la potencia máxima se conocen son regiones de interferencia constructiva (oscuridad = interferencia destructiva, luz= interferencia constructiva). La tercera condición es que los haces de luz que estén interfiriendo deben estar en fase, es decir, que la fuente de luz sea coherente [3, 27].

2.10.- Interferómetros.

La interferencia es una cualidad que aparece en las ondas electromagnéticas, esta tiene aplicaciones en diversos campos de interés como en la ciencia, tecnología y medicina [28]. El fenómeno de la interferencia es empleado en muchos sistemas de medición de alta precisión. El patrón de franjas depende mayoritariamente en la diferencia de los caminos óptico y las características de la fuente de luz que se está empleando. La existencia de las franjas depende de la coherencia espacial y temporal de la fuente de luz [29]. El camino óptico puede ser controlado por medio de guías de onda como lo son las fibras ópticas. El uso de fibras ópticas permite crear dispositivos extremadamente compactos y económicos [29].

Entre tantas ventajas que ofrecen las fibras ópticas está su habilidad para mitigar los efectos de distorsión de frente de onda por turbulencias atmosféricas, sus divisores de haz son compactos al igual que sus acopladores, Estas habilidades hacen a las fibras ópticas un medio adecuado para la transportación de luz en interferómetros, los cuales son utilizados para la detección de ondas gravitacionales, sensores de intrusos, monitoreo de salud estructural, sistemas de detección de fugas de gran longitud y sensores perturbados [30-32].

Entre otras ventajas de las fibras ópticas que las vuelven útiles en las tecnologías de medición, es decir, sensores, son su alta sensibilidad, respuesta rápida a parámetros físicos tales como temperatura y tensión, cuentan con inmunidad a las perturbaciones de ruido electromagnético, un consumo de potencia bajo y su potencial para la multiplexación a gran escala [33].

De forma concisa, la interferometría está basada en la superposición de dos o más haces de luz para la medición de fase ente ellos. Los interferómetros emplean dos haces de luz con la misma frecuencia. Comúnmente un haz de luz incidente dentro del interferómetro es dividido en dos o más partes, para después ser recombinados para crear el patrón de interferencia [34].

Un interferómetro de fibra óptica usa la interferencia entre dos haces de luz que han sido propagados a través de distintos caminos ópticos en un solo o dos diferentes

caminos ópticos (por ejemplo, las fibras ópticas). Por tanto, requieren componentes como divisores de haz y acopladores de haz. Los interferómetros brindan información temporal y espacial por medio de su señal, esto permite que se puedan obtener mediciones cuantitativas por medio de los cambios de la longitud de onda, fase, intensidad, frecuencia, ancho de banda, etc [35].

2.10.1.- Interferómetro Mach-Zehnder.

Los MZIs han sido comúnmente usados en diversas aplicaciones debido a sus configuraciones. Los primeros MZIs contaban con dos brazos independientes, los cuales son el brazo de referencia y el brazo de detección, cabe recalcar que uno de los brazos debe tener una longitud distinta al otro. La luz incidente es dividida en ambos brazos mediante un acoplador de fibra, posteriormente se recombinan ambos haces por medio de otro acoplador de fibra. La luz recombinada ya contiene el componente de la interferencia de acuerdo con la diferencia de caminos ópticos existente entre ambos brazos. En cuanto a aplicaciones de detección, el brazo de referencia se mantiene aislado de variaciones externas y solo el brazo de detección se le induce el parámetro físico a medir, esto provoca cambios en el índice de refracción que a su vez cambia el camino óptico ($OPL=nL$, n es el índice de refracción y L la longitud), esta variación en el camino óptico se puede detectar de forma simple analizando la variación del patrón de interferencia [36]. El esquema de un MZI de dos brazos es mostrado en la figura 2.12, dicha figura es obtenida de [16].

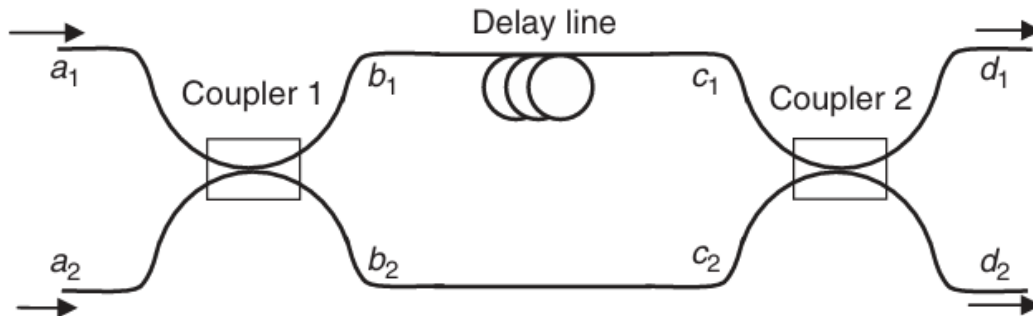


Fig 2.12.- Esquema de un MZI clásico de dos brazos [16].

Este MZI puede representarse de forma matricial, ya que con dos matrices se pueden representar los acopladores ópticos y con una matriz se puede representar los caminos ópticos [16]. La matriz de transferencia de un MZI es mostrada en la ecuación 2.23.

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\varepsilon} & j\sqrt{\varepsilon} \\ j\sqrt{\varepsilon} & \sqrt{1-\varepsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_1L_1} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_2L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-\varepsilon} & j\sqrt{\varepsilon} \\ j\sqrt{\varepsilon} & \sqrt{1-\varepsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

En la ecuación 2.23, ε representa el factor de acoplamiento de los acopladores ópticos, por ejemplo si el acoplador tiene un reparto de potencia de 70/30, quiere decir que

$\varepsilon = 0.7$ o $\varepsilon = 0.3$, el orden no es de importancia ya que la misma matriz se encarga de colocar el otro valor complementario del acoplador; n_1 y n_2 representan los índices de refracción del brazo de referencia y del brazo de medición respectivamente; L_1 y L_2 son las longitudes de los brazos anteriormente mencionados; λ es la longitud de onda; a_1 y a_2 son la entrada del MZI, usualmente solo se utiliza a_1 , por lo que en la mayoría de los casos a_2 es cero; por último, d_1 y d_2 son las salidas del MZI, la diferencia entre ellas es que tienen una diferencia de fase de 90° [16].

El esquema de emplear dos brazos en un MZI fue reemplazado, los esquemas más modernos de un MZI radican en crear los acopladores por medio de imperfecciones al fusionar dos fibras ópticas, esto provoca que el haz de luz que es guiado por el núcleo se acople en el revestimiento de la misma fibra y posteriormente se reacople, lo que provoca interferencia, esto da lugar a MZIs más compactos e igual de eficientes; cabe recalcar que los modos del revestimiento tienen un índice de refracción efectivo más bajo que el modo del núcleo [29].

Existen diversas formas de crear MZIs, entre ellas se encuentran utilizar rejillas de periodo largo [37], fusionar dos fibras con los núcleos desplazados (core-offset), emplear fibras especiales como camino óptico (fibra de cristal fotónico, fibras de núcleos más pequeños), adelgazando las fibras, entre otras técnicas [29]. Algunos ejemplos de MZIs basados en fibra óptica son mostrados en el siguiente capítulo.

2.10.2.- Interferómetro Michelson.

Los MIs son relativamente similares a los MZIs. El concepto básico es la interferencia entre los haces en dos brazos, no obstante, cada haz es reflejado en el extremo de cada brazo en un MI [38]. Se podría decir que un MI es la mitad de un MZI en términos de su configuración. Por tanto, la técnica de fabricación y el principio de operación de un MI es bastante similar. La diferencia principal es la existencia de las reflexiones. Esto se debe a que los MI emplean la reflexión de los modos para generar la interferencia. Es primordial ajustar la diferencia de la longitud de la fibra entre el brazo de referencia y el brazo de detección en estos interferómetros dentro de la longitud de coherencia de la fuente de luz empleada [29]. En la figura 2.13 se muestra un MI fabricado con acopladores, esta figura es obtenida de [16].

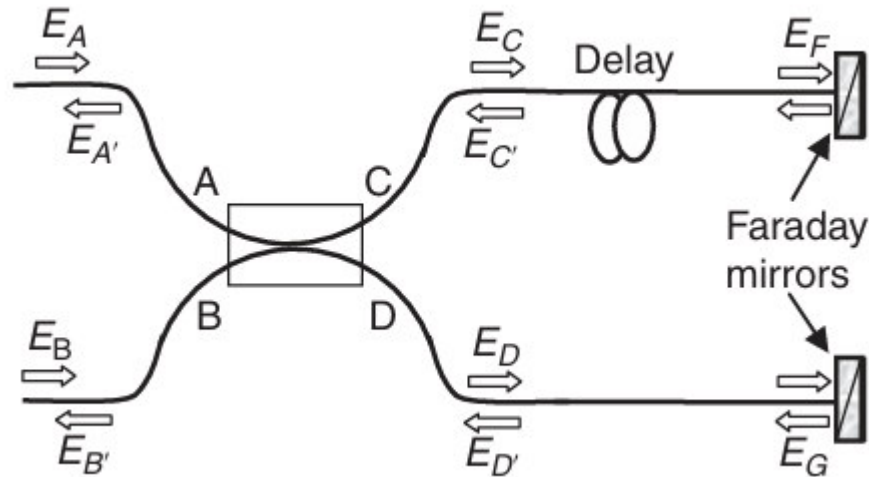


Fig 2.13.- Esquema clásico de un MI fabricado con acopladores [16].

Por parte de los MI de fibra óptica sin emplear acopladores o comúnmente llamada configuración en línea. Una parte del haz que entra al núcleo es acoplada al revestimiento, el cual se ve reflejado junto con el modo del núcleo por medio de un reflector común al final de la fibra, las reflexiones del modo del núcleo y del revestimiento causan la interferencia [29].

2.10.3.- Interferómetro Sagnac.

El SI es de gran interés en varias áreas donde se requieren sensores, esto se debe a su estructura simple, método de fabricación simple y robustez ambiental. Un SI consiste en un lazo de fibra óptica, a lo largo de este, dos haces son propagados en direcciones opuestas con distintos estados de polarización. La entrada de la luz es dividida por un acoplador de fibra, esto hace que los haces se propaguen en direcciones contrarias, por último, se vuelven a recombinar en el mismo acoplador, obteniendo así el patrón de interferencia [29]. A diferencia de otros interferómetros de fibra óptica, la diferencia de camino óptico está marcada por la velocidad de propagación dependiente de la polarización de los modos guiados a lo largo del lazo. Con el fin de maximizar la dependencia de a la polarización del SI, se opta por fabricarlos con fibras altamente birrefringentes o con fibras mantenedoras de polarización, además de emplear controladores de polarización al inicio de la fibra de detección. La señal de salida en el puerto de salida del acoplador de fibra se ve gobernada por la interferencia entre los haces polarizados a lo largo del eje lento y el eje rápido [29]. En la figura 2.14 se muestra el esquema de un SI de fibra óptica.

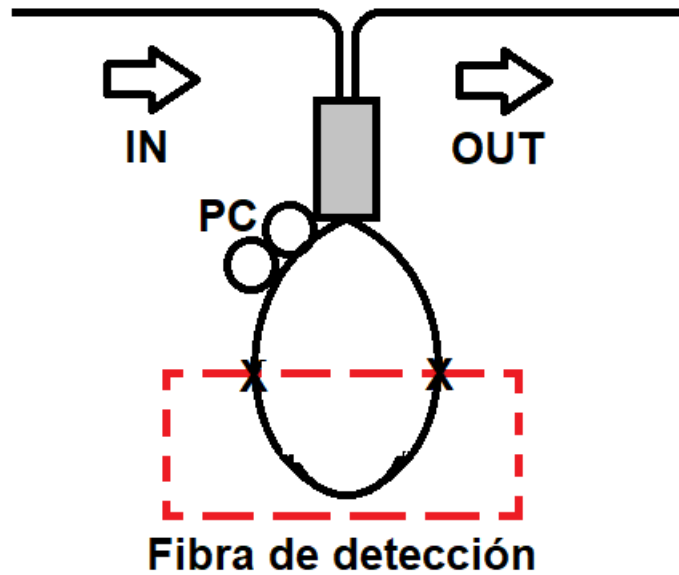


Fig 2.14.- Esquema de un SI de fibra óptica.

2.10.4.- Interferómetro Fabry-Perot.

El FPI es generalmente compuesto de dos superficies paralelas separadas a una cierta distancia [39]. La interferencia ocurre debido a las superposiciones múltiples de los haces reflejados y transmitidos en las dos superficies paralelas. En el nicho de las fibras ópticas, el FPI puede ser formado de manera simple por medio de reflectores dentro o fuera de la fibra. Los sensores basados en FPIs se clasifican en dos categorías: extrínsecos e intrínsecos [29].

El FPI extrínseco usa las reflexiones desde una cavidad externa formada fuera de la fibra de interés, por ejemplo, el FPI de fibra óptica puede estar formado con dos fibras ópticas que son separadas a una longitud L dentro de la longitud de coherencia, esto dentro de una estructura que soporte ambas fibras, este tipo de FPI tiene como desventajas una baja eficiencia de acoplamiento, se debe cuidar la alineación y problemas de empaquetado [29].

Los FPI intrínsecos tienen componentes reflejantes dentro de la misma fibra. Por ejemplo, es posible formar reflectores internamente en la fibra óptica colapsando los núcleos y parte del revestimiento, lo que genera una cavidad local en la fibra, no obstante, su desventaja radica en los métodos de fabricación, ya que llegan a ser complicados de replicar [29].

Cuando una perturbación es inducida en el FPI, la diferencia de fase se ve influenciada por la variación en la diferencia de la longitud del camino óptico del FPI. Al aplicar un esfuerzo sobre el FPI resulta en que va a existir una ración de fase. Mediante la

medición del desplazamiento del espectro del FPI, se puede obtener una medición cuantitativa [29].

2.10.5.- FSR.

El FSR por sus siglas en inglés, Free Spectral Range o español, rango espectral libre. Representa el espacio entre los picos de interferencia adyacentes en un patrón de interferencia espectral, este se ve influenciado por la diferencia del camino óptico. Una variación más pequeña de la diferencia del camino óptico da un FSR mayor, en este caso si bien da un rango dinámico amplio al sensor, a su vez da una resolución poco deseable a las señales pico [40]. Para el caso de obtener el FSR de un MZI se presenta la ecuación 2.24 [16].

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_2 L_2 - n_1 L_1} \quad (2.24)$$

Donde λ es la longitud de onda del pico de interferencia; n_1 y n_2 son los índices de refracción de cada brazo; por último, L_1 y L_2 son las longitudes de los brazos del MZI, para el caso de un MZI en línea se reemplazan los índices de refracción por los del núcleo y del revestimiento, considerando que los caminos ópticos son el propio núcleo y el revestimiento las longitudes se vuelven iguales, por lo que se obtiene la ecuación 2.25 [41].

$$FSR = \frac{\lambda^2}{(n_{co} - n_{cl})L} \quad (2.25)$$

Esto indica que a menores longitudes físicas de la fibra se tendrán un FSR mayor, mientras que si la longitud es mayor el FSR será más pequeño, por lo que son inversamente proporcionales.

2.11.- Efecto acústico-óptico.

El efecto acústico-óptico o también llamado efecto acústico-óptico, es una cualidad la cual su principio de operación se basa en el acoplamiento intermodal inducido por una onda acústica, esto provoca que cuando la onda acústica se propaga a lo largo de la fibra óptica, se produzca una perturbación periódica en el índice de refracción lo que lleva a un acoplamiento intermodal resonante entre el modo fundamental del núcleo y algunos modos del revestimiento [42]. Este efecto se emplea para difractar y mover la frecuencia de la luz por medio de la propagación de ondas acústicas [43].

2.11.1.- Moduladores acústico-ópticos.

Los moduladores acústico-ópticos emplean el efecto acústico-óptico para desplazar frecuencialmente un haz de luz [43], los dispositivos acústico-ópticos de fibra óptica basados

en ondas acústicas de flexión han recibido un gran interés gracias a sus aplicaciones como desplazadores de frecuencia [44], filtros acústo-ópticos sintonizables [45] y moduladores de luz [46], estos dispositivos tienen un gran potencial en el desarrollo de dispositivos acústo-ópticos basados en fibra óptica [42].

Estos dispositivos pueden utilizar sus cualidades únicas para la creación de láseres de fibra óptica pulsados por medio del amarre de modos provocado debido a la modulación provocada por las ondas acústicas [47, 48]. La naturaleza resonante del acoplamiento intermodal permite que solo la luz que satisface la condición de ajuste de fase se beneficie del intercambio de energía entre el modo fundamental del núcleo y algunos modos del revestimiento. A la salida del modulador solo la luz que es guiada en el núcleo se transmite, lo que resulta que el acoplamiento intermodal se vea reflejado en forma de un pico de atenuación en el espectro de emisión [42].

2.12.- Transformada rápida de Fourier.

La transformada rápida de Fourier (FFT) es una herramienta sumamente útil en el procesamiento de señales, puede caracterizar los componentes espectrales de una señal, o es empleada en conjunto con otras operaciones más complejas, como lo es el filtrado, convolución y la correlación [49]. Esta herramienta viene en forma de algoritmo, tomando en cuenta que se basa en la transformada de Fourier discreta para así poder ser empleada en sistemas digitales, no obstante, se está experimentando para obtener una FFT meramente óptica [49, 50]. Esta increíble herramienta permite observar la contribución modal en los interferómetros, siendo que de forma práctica la FFT se aplica a la ecuación 2.22, mostrando así los modos dominantes y los modos débiles del revestimiento en el interferómetro [41].

Referencias del capítulo.

- [1] K. Thyagarajan and A. Ghatak, *Fiber Optic Essentials*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2007
- [2] H. L. Mancini, *Láseres y optoelectrónica primera parte. El láser: Conceptos básicos*. [s.l.]: [s.n.], 2002.
- [3] E. Hecht, *Optics*, 4th ed. San Francisco, CA: Addison Wesley, 2002.
- [4] D. Bailey and E. Wright, *Practical Fiber Optics*. Elsevier, 2003. doi: 10.1016/B978-0-7506-5800-3.X5000-0.
- [5] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 6th ed. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/C2018-0-01168-8.
- [6] P. W. Milonni and J. H. Eberly, *Laser Physics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

-
- [7] J. R. Reitz, F. J. Milford, and R. W. Christy, *Fundamentos de la teoría electromagnética*, 4th ed. [s.l.]: Addison Wesley Iberoamericana, [s.a.].
- [8] K. E. Gilbert and H. E. Bass, “ACOUSTIC WAVES,” in *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, Elsevier, 2003, pp. 1–12. doi: 10.1016/B0-12-227090-8/00046-4.
- [9] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentos de acústica*, 3rd ed. [s.l.]: Limusa, 1988.
- [10] S. S. Rao, *Vibraciones Mecánicas*, 5ª ed., trad. R. Navarro Salas, rev. téc. D. Sepúlveda García, R. Rodríguez Figueroa, y G. del Valle Díaz Muñoz. Naucalpan de Juárez, México: Pearson, pp 13, 2012.
- [11] A. W. Snyder and J. D. Love, *Optical Waveguide Theory*. [s.l.]: Limusa, 1983.
- [12] E. A. Araiza Reyna, *Análisis de guías de onda ópticas y dispositivos de óptica integrada mediante simulaciones*. San Luis Potosí: [s.n.], 2007.
- [13] Michael. Bass and E. W. Van Stryland, *Fiber optics handbook: fiber, devices, and systems for optical communications*. McGraw-Hill, 2002.
- [14] John. Crisp, *Introduction to fiber optics*. Newnes, 2000.
- [15] N. I.Zanoon, “The Phenomenon of Total Internal Reflection and Acceleration of Light in Fiber Optics,” *Int J Comput Appl*, vol. 107, no. 2, pp. 19–24, Dec. 2014, doi: 10.5120/18723-9951.
- [16] Rongqing. Hui and M. S. O’Sullivan, *Fiber optic measurement techniques*. Elsevier/Academic Press, 2009.
- [17] R. Paschotta, “Refraction - an encyclopedia article,” in *RP Photonics Encyclopedia*, RP Photonics AG, 2013. doi: 10.61835/vke.
- [18] R. Paschotta, “Reflection - an encyclopedia article,” in *RP Photonics Encyclopedia*, RP Photonics AG, 2025. doi: 10.61835/k59.
- [19] R. Paschotta, “Diffraction - an encyclopedia article,” in *RP Photonics Encyclopedia*, RP Photonics AG, 2019. doi: 10.61835/ijl.
- [20] R. Paschotta, “Dispersion - an encyclopedia article,” in *RP Photonics Encyclopedia*, RP Photonics AG, 2007. doi: 10.61835/9vk.
- [21] R. Paschotta, “Scattering - an encyclopedia article,” in *RP Photonics Encyclopedia*, RP Photonics AG, 2019. doi: 10.61835/mkl.
- [22] R. Paschotta, “Coherence - an encyclopedia article,” in *RP Photonics Encyclopedia*, RP

Photonics AG, 2007. doi: 10.61835/7mj.

[23] R. Paschotta, "Wavelength Division Multiplexing - an encyclopedia article," in *RP Photonics Encyclopedia*, RP Photonics AG, 2008. doi: 10.61835/hue.

[24] W. Zhu, L. Qian, and A. S. Helmy, "Implementation of three functional devices using erbium-doped fibers: an advanced photonics lab," M. Nantel, Ed., Aug. 2015, p. 966511. doi: 10.1117/12.2207348.

[25] E. Desurvire and J.R. Simpson, "Amplification of Spontaneous Emission in Erbium-Doped Single-Mode Fibers", *J. Lightwave Tech.*, Vol.7, No.5, 835,1989.

[26] D. A. Ramos González, *Espectrofotómetro para monitoreo de gases contaminantes o Monitoreo de gases basado en fuentes de amplio espectro*. Salamanca: [s.n.], 2020.

[27] R. Paschotta, "Interference - an encyclopedia article," in *RP Photonics Encyclopedia*, RP Photonics AG, 2005. doi: 10.61835/wdl.

[28] C. Wang, S. Trivedi, S. Kutcher, P. Rodriguez, F. Jin, V. Swaminathan, S. Nagaraj, S. Quoraishee, and N. S. Prasad, "Non-Contact Human Cardiac Activity Monitoring Using a High Sensitivity Pulsed Laser Vibrometer," in *CLEO:2011 - Laser Applications to Photonic Applications*, OSA Technical Digest (CD) (Optica Publishing Group, 2011), paper CWB6.

[29] I. Padron, Ed., *Interferometry - Research and Applications in Science and Technology*. InTech, 2012. doi: 10.5772/2635.

[30] Sacharov, V. K. (2001). Linear Relativistic Fiber-Optic Interferometer. *Laser Physics*, Vol. 11, No. 9, pp. 1014–1018

[31] Cahill, R.T. & Stokes, F. (2008). Correlated Detection of sub-mHz Gravitational Waves by Two Optical-Fiber Interferometers. *PROGRESS IN PHYSICS*, Vol. 2, pp. 103-110

[32] Mishra, A. & Soni, A. (2011). Leakage Detection using Fibre Optics Distributed Temperature Sensing. *Proceedings of 6th Pipeline Technology Conference 2011*, Hannover, Germany

[33] Higuera, L.; Miguel, V. (2002). *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*. John Wiley & Sons, ISBN 0471820539, England

[34] Bahrapour, A. R., Tofighi, S., Bathae, M., & Farman, F. (2012). *Optical Fiber Interferometers and Their Applications*. [https://doi.org/https://doi.org/10.5772/34346](https://doi.org/10.5772/34346)

[35] Grattan, Kenneth & Meggitt, B.. (2000). *Optical Fiber Sensor Technology: Fundamentals*. 10.1007/978-1-4757-6081-1.

- [36] Lee, B. H., Kim, Y. H., Park, K. S., Eom, J. B., Kim, M. J., Rho, B. S., & Choi, H. Y. (2012). Interferometric fiber optic sensors. *Sensors*, 12(3), 2467–2486. <https://doi.org/10.3390/s120302467>
- [37] R. E. da Silva *et al.*, “Widely tunable dual acousto-optic interferometric device based on a hollow core fiber,” *Opt Laser Technol*, vol. 182, p. 112093, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.optlastec.2024.112093.
- [38] Kashyap, R., & Nayar, B. (1983). An all single-mode fiber Michelson interferometer sensor. *Journal Of Lightwave Technology*, 1(4), 619-624. <https://doi.org/10.1109/jlt.1983.1072153>
- [39] Putman, M. A., Berkoff, T. A., Kersey, A. D., Sirkis, J. S., Brennan, D. D., & Friebele, E. J. (1993b). In-line fiber étalon for strain measurement. *Optics Letters*, 18(22), 1973. <https://doi.org/10.1364/ol.18.001973>
- [40] Koo, K., LeBlanc, M., Tsai, T., & Vohra, S. (1998). Fiber-chirped grating Fabry-Perot sensor with multiple-wavelength-addressable free-spectral ranges. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(7), 1006-1008. <https://doi.org/10.1109/68.681299>
- [41] Y.-X. Xiao, J. Wang, Y.-F. Hou, L.-H. Zhang, and S.-S. Wang, “Mode analysis of in-line Mach-Zehnder interferometer with offset splicing,” *Optical Fiber Technology*, vol. 62, p. 102473, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.yofte.2021.102473.
- [42] M. Bello-Jiménez, C. Cuadrado-Laborde, A. Díez, J. L, and M. V, “Modulador acusto-óptico en amplitud de fibra óptica basado en ondas acústicas de flexión”, *Rev. Mex. Fís.*, vol. 60, no. 4 Jul-Aug, pp. 269–275, Jan. 2014.
- [43] G.N. Ortiz León and J.I. Jiménez Mier y Terán, *Caracterización de moduladores acustico-ópticos*, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, México. https://bigbang.nucleares.unam.mx/~jimenez/home/trampa/AOM_GiselaOrtiz.pdf
- [44] B. Y. Kim, H. E. Engan, H. J. Shaw, and J. N. Blake, “All-fiber acousto-optic frequency shifter,” *Opt Lett*, vol. 11, no. 6, p. 389, Jun. 1986, doi: 10.1364/OL.11.000389.
- [45] D. Östling and H. E. Engan, “Narrow-band acousto-optic tunable filtering in a two-mode fiber,” *Opt Lett*, vol. 20, no. 11, p. 1247, Jun. 1995, doi: 10.1364/OL.20.001247.
- [46] T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. O. Culverhouse, “The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 11, pp. 2519–2529, 1996, doi: 10.1109/50.548150.
- [47] C. Cuadrado-Laborde, A. Díez, M. Delgado-Pinar, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, “Mode locking of an all-fiber laser by acousto-optic superlattice modulation,” *Opt Lett*, vol. 34, no. 7, p. 1111, Apr. 2009, doi: 10.1364/OL.34.001111.

[48] M. Bello-Jiménez, C. Cuadrado-Laborde, A. Diez, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, "Experimental study of an actively mode-locked fiber ring laser based on in-fiber amplitude modulation," *Applied Physics B*, vol. 105, no. 2, pp. 269–276, Nov. 2011, doi: 10.1007/s00340-011-4548-6.

[49] H. Nejadriahi and V. J. Sorger, "On-chip Integrated All-Optical Fast Fourier Transform: Design and Analysis," in *Frontiers in Optics 2017, OSA Technical Digest (online)* (Optical Society of America, 2017), paper JW4A.46.

[50] M. Shirakawa and J. Ohtsubo, "Optical Digital Fast Fourier Transform System," *Opt Rev*, vol. 6, no. 5, pp. 424–432, Sep. 1999, doi: 10.1007/s10043-999-0424-6.

Capítulo 3.

Desarrollo del arreglo experimental, simulación, fabricación de los MZI, caracterización en curvatura y desarrollo de las pruebas.

En este capítulo se verán descritos y mostrados los procesos por los cuales se desarrolló esta tesis, iniciando desde la aplicación del arreglo experimental, en la cual se explica el uso de cada uno de los componentes empleados, junto a la caracterización de la fibra dopada con erbio (EDF) y la fabricación de la plataforma vibratoria, para así proseguir con la simulación de la matriz de transferencia un interferómetro Mach-Zehnder (MZI) posteriormente se explicarán los métodos de fabricación de todos los MZI realizados para esta tesis, así mismo se muestran las pérdidas por inserción y la caracterización en curvatura para los dispositivos anteriormente mencionados, por último se establece el desarrollo e implementación de las pruebas.

3.1.- Arreglo experimental.

Para la caracterización de los MZI se requiere una fuente óptica de amplio espectro, por ejemplo, un diodo super luminoso [1-3], una fuente de supercontinuo [1, 4, 5] o el arreglo más simple y relativamente barato, una fuente de ASE [6-9]. Para el desarrollo de este trabajo de tesis se empleó una fuente ASE por los siguientes motivos: Es un arreglo que requiere pocos componentes que a su vez no son tan caros, las condiciones ambientales difícilmente la afectan, no tiene comportamientos estocásticos que afecten la forma del espectro [6-9]. El arreglo es presentado en la figura 3.1.

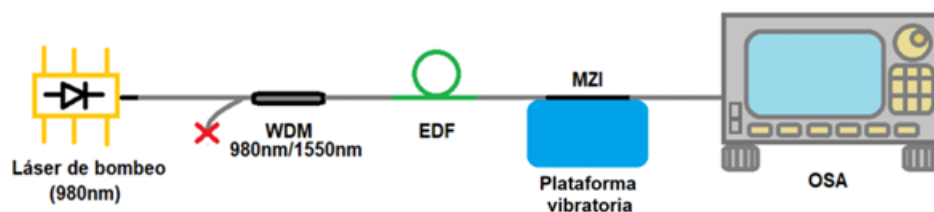


Fig 3.1.- Arreglo experimental para el desarrollo del trabajo.

Este arreglo experimental consta de cinco componentes, excluyendo al Analizador de espectros ópticos (OSA). Iniciando del lado izquierdo de la figura 3.1 se tiene un láser de bombeo de 980nm, el cual es un diodo láser de la marca Qphotonics modelo: QFGLD-980-500, el cual emite una longitud de onda de aproximadamente 980nm, dicha longitud de onda es perfecta para la EDF debido a que puede absorberla y después los iones de Er^{3+} la amplifican [6-9]. El siguiente componente es un WDM (Wavelength Division Multiplexing) el cual permite que varias señales de diferente longitud de onda sean transmitidas y luego separadas [10], para este arreglo se emplea para un propósito similar, siendo este proteger el diodo láser de las reflexiones de 1550nm, por ello en la figura 3.1 se observa una X roja en el puerto de 1550nm.

El siguiente componente es el más importante para poder construir una fuente de amplio espectro, este es la EDF del modelo, la cual permite absorber la longitud de onda de 980nm para después amplificarla a 1550nm [9], no obstante, esto es un proceso relativamente riguroso, teniendo en cuenta la figura 3.2, se puede observar un sistema de tres niveles de energía para poder conseguir la fuente de amplio espectro [9].

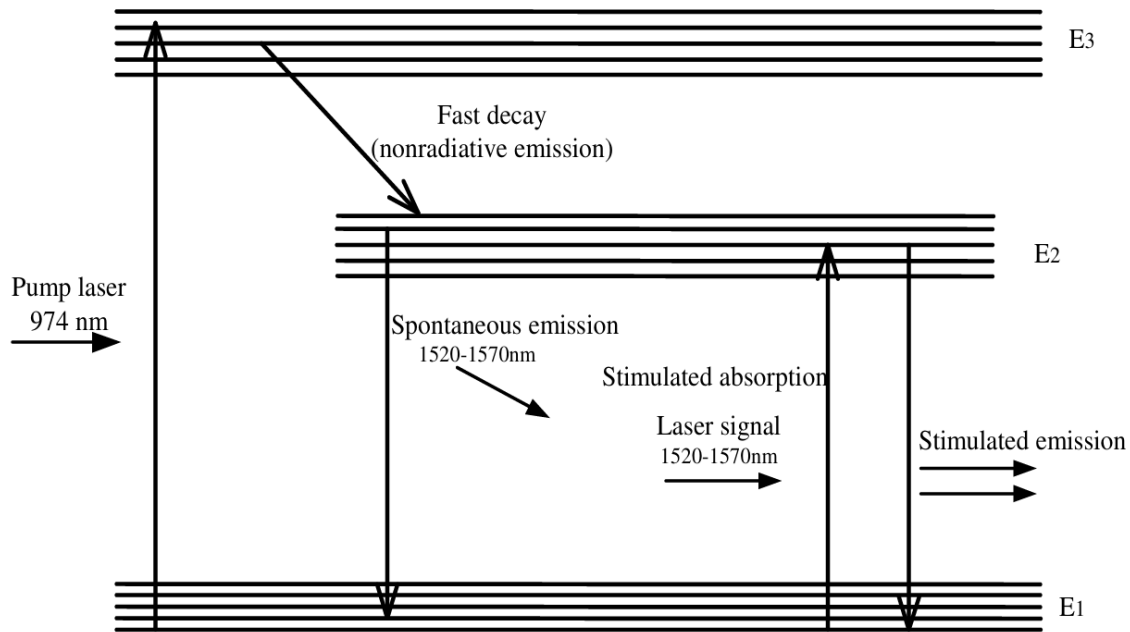


Fig 3.2.- Niveles de energía simplificados de los iones de Er^{3+} en la EDF [9]

Cuando una emisión láser de 980nm aproximadamente alimenta a la EDF, los iones de Er^{3+} se ven excitados del estado de energía E_1 a el estado de energía E_3 , los iones en ese nivel de energía decaen al nivel E_2 a una emisión no radiactiva, los iones de este último estado decaen al estado E_1 siendo que esto provoca la emisión espontanea [9], esta emisión espontanea se ve amplificada al propagarse dentro de la fibra, ahora pasando a llamarse emisión espontanea amplificada (ASE). Siendo el ASE utilizado como una fuente de amplio espectro debido a su longitud de onda de entre aproximadamente 1520nm a 1570nm [9]. El proceso de amplificación es mejor descrito en el capítulo del marco teórico.

Para este caso se debe reconocer que a medida que aumente la potencia de la fuente de bombeo que en este caso es un diodo láser, el ASE incrementa a su vez. Para ello se realizó la caracterización correspondiente de la EDF. Dicha caracterización se realizó aumentando la corriente suministrada al diodo láser por medio de su controlador, empezando desde los 0mA hasta los 300mA empleando incrementos de 10mA. La finalidad de esto es no forzar el diodo láser a suministrar más corriente de la necesaria, si bien el controlador está configurado para no entregar una sobrecorriente, se busca no hacerlo trabajar de más. La caracterización de la EDF es mostrada en la figura 3.3.

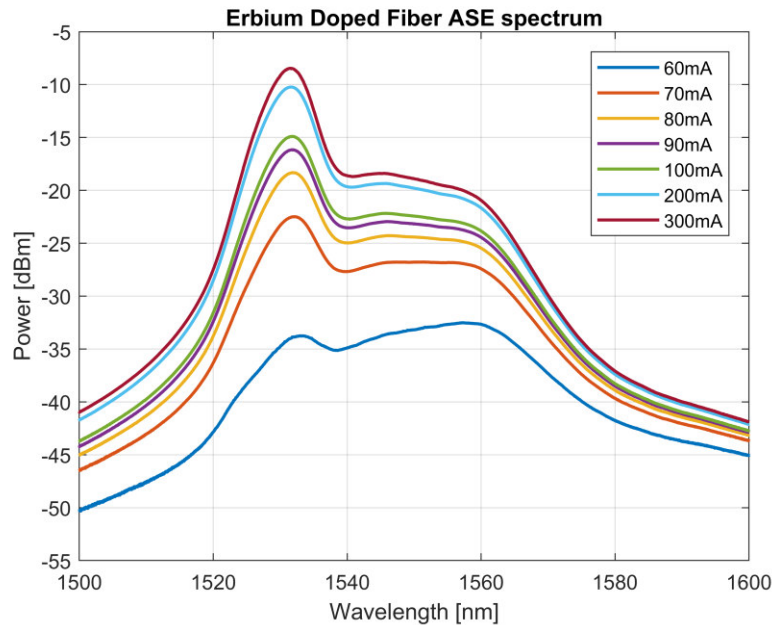


Fig 3.3.- Caracterización de la EDF.

Como puede apreciarse a menor corriente existe menor potencia en el espectro de la fuente ASE, por lo que se empieza a graduar, siendo que hay un gran saltó entre los 60mA a los 70mA, continuando con un incremento gradual hasta los 100mA, la razón de no colocar los espectros de 110mA en adelante hasta llegar 200mA fue para evitar mal interpretar la figura 3.3, posteriormente de 200mA a 300mA ya no existe un incremento tan considerable, sí bien se realizaron la caracterización un poco más arriba de los 300mA estas no se colocaron y no se consideraron debido a la poca contribución que entregaban, por lo que se puede decir que se estaba saturando la EDF [6, 9]. Por ello todas las pruebas de los MZI se emplea una corriente en el diodo laser de 300mA.

Prosiguiendo con los demás componentes, el siguiente es la plataforma vibratoria, esto se debe a que se requiere una caracterización de las vibraciones para poder así obtener una medición ya sea cualitativa o cuantitativa. Dicha plataforma está basada en una bocina de 8Ω a una potencia de 10W con cilindro previamente colocado encima del diafragma alrededor del guardapolvo, el otro extremo del cilindro va colocado un tramo de 30cm X 30cm de policarbonato, sobre el tramo de policarbonato se colocarán los MZIs, para lograr la caracterización de estos en vibración. La figura 3.4 muestra su versión finalizada.



Fig 3.4.- Plataforma vibratoria.

Esta plataforma al estar basada en una bocina, se emplea el uso de un amplificador para enviar señales de frecuencias bajas hasta altas, a su vez emplear distintos tipos de señal. El circuito empleado es mostrado en la figura 3.5.

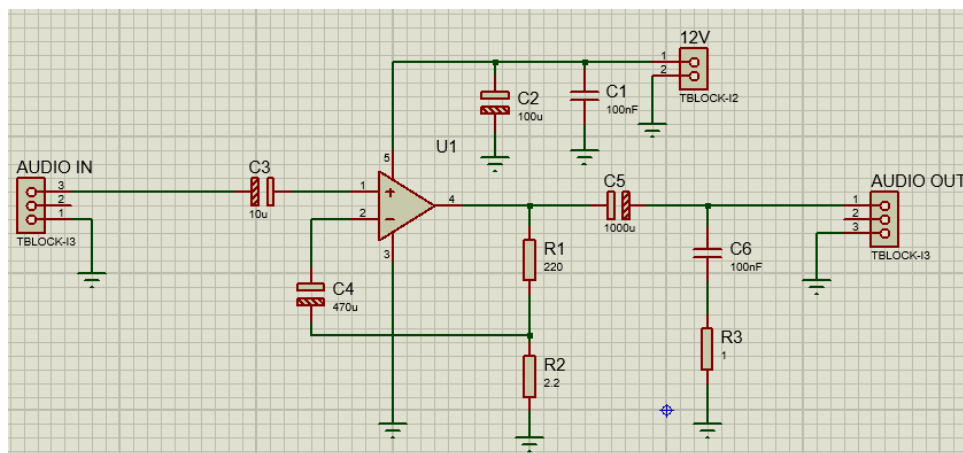


Fig 3.5.- Diagrama del amplificador para el uso de la plataforma vibratoria.

En cuanto a las señales de entrada, estas son suministradas por una aplicación conocida como “Frequency Generator”, dicha aplicación puede enviar señales senoidales, cuadradas, triangulares y diente de sierra, desde frecuencias de 1Hz hasta 22000Hz. La interfaz de la aplicación es mostrada en la figura 3.6.

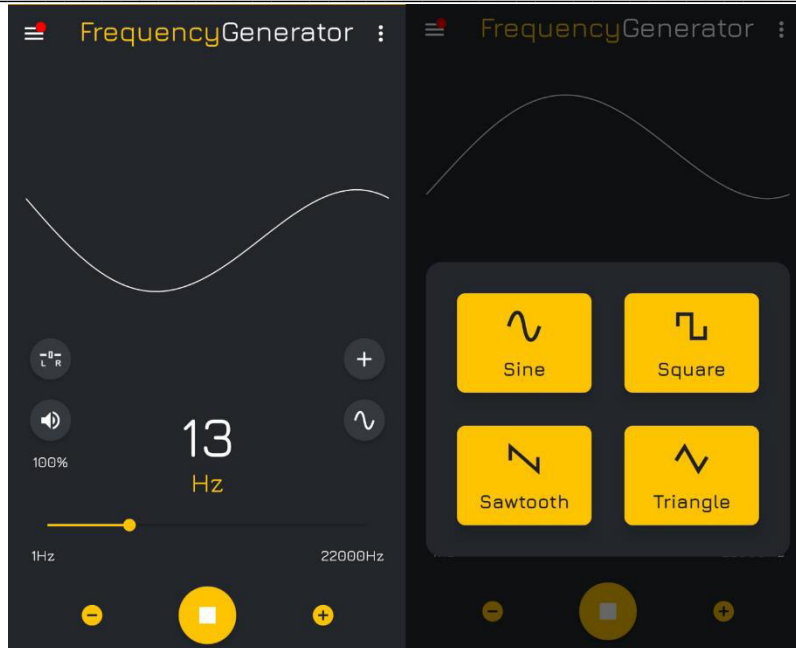


Fig 3.6.- Interfaz de la aplicación Frequency Generator.

3.2.- Simulación de la matriz de transferencia de un MZI.

En el capítulo anterior, se realizó la deducción de la matriz de un MZI, la cual describe cada parte por la que se compone un MZI, es decir, dos acopladores ópticos (uno que divide el modo fundamental y otro que lo reacopla provocando la interferencia) y dos caminos ópticos de diferente longitud con mismo índice de refracción o dos caminos ópticos de la misma longitud y diferente índice de refracción.

Cómo los MZI fabricados para este trabajo son del tipo multimodal, en la simulación se toma en cuenta que las longitudes de los caminos ópticos son iguales, empleando distintos índices de refracción de una fibra SMF-28 (núcleo: 1.45213, revestimiento: 1.44692) con una distancia igual para ambos caminos ópticos, con esto se implica que los caminos ópticos son el núcleo y el revestimiento de la SMF-28. No obstante, esta simulación no permite colocar un número finito de modos o definir una cantidad tal cuál, por defecto se implica que son únicamente dos modos los que viajan por los caminos ópticos.

La simulación fue realizada en Matlab R2017b, para esta versión aún era posible realizar interfaces gráficas a partir de las herramientas del programa, haciendo que sea más simple cambiar parámetros sin necesidad de correr el código cada vez que se cambia, por ello se optó por una interfaz gráfica para la simulación. Dicha interfaz se muestra en la figura 3.7.

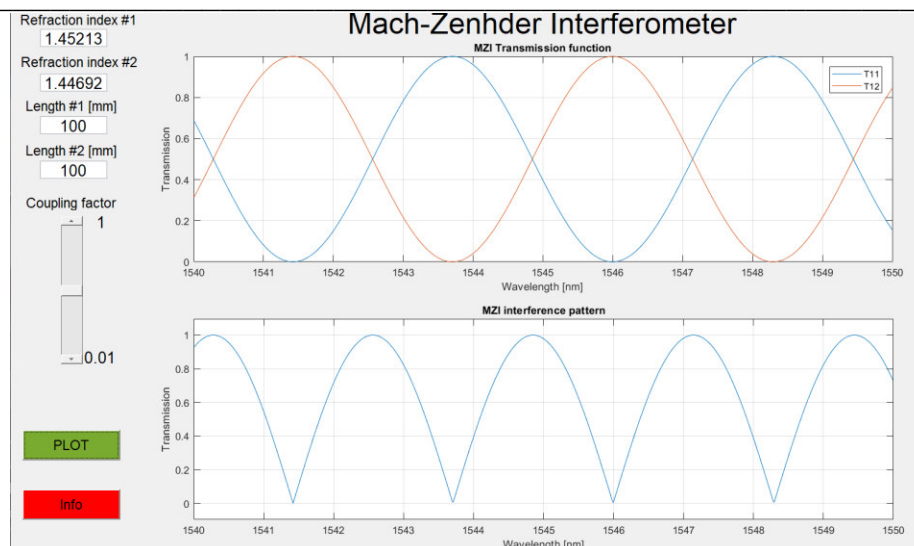


Fig 3.7.- Simulación del MZI.

El propósito de la simulación es observar cómo la longitud y el factor de acoplamiento afectan el patrón de interferencia, así también como la transmisión. Por lo que se procede a mostrar otra captura cambiando la longitud a 5cm en lugar de 10cm, esto es mostrado en la figura 3.8.

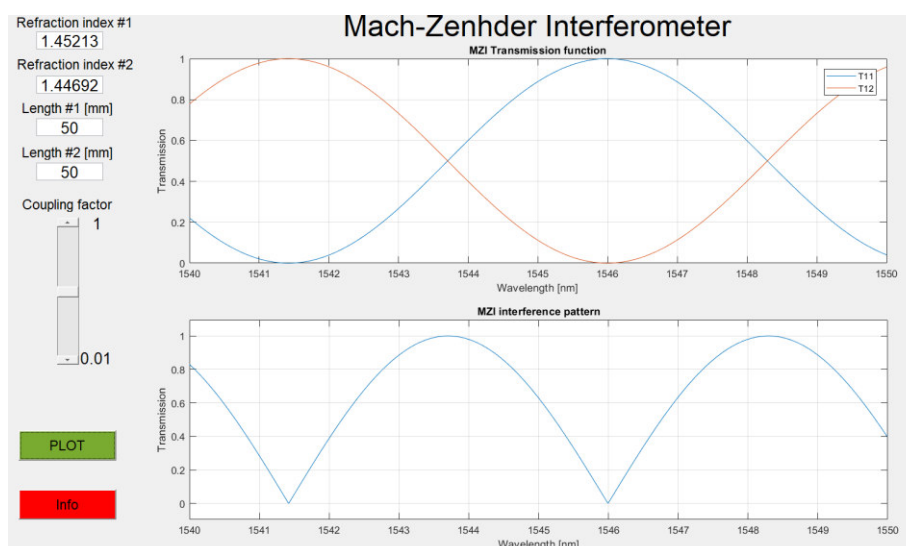


Fig 3.8.- Cambio del parámetro de longitud en la simulación.

Comparando la figura 3.7 con la 3.8, se puede apreciar que el patrón de interferencia y la transmisión es completamente diferente, para el caso de la longitud de la fibra de 10cm, se muestra una cantidad mayor de lóbulos en el patrón de interferencia, mientras que cuando la longitud es de 5cm la cantidad de lóbulos del patrón de interferencia se ve reducida. En el caso de la transmisión, se muestra que la frecuencia se ve reducida cuando se reduce la longitud del camino óptico, por lo que la frecuencia de la

transmisión es directamente proporcional a la longitud del MZI. Ambas observaciones van de la mano con el contraste de franja o rango espectral libre (FSR) [11, 12]. Su ecuación se encuentra en el capítulo anterior, titulado “Estado del arte”.

¿Pero cómo afecta el factor de acoplamiento tanto a la transmisión como al patrón de interferencia del MZI? Idealmente se toma este valor como 0.5 para ambos acopladores ópticos, no obstante, en la vida real esto es algo complicado de obtener, por lo menos en los MZI que requieren un proceso de fabricación con imperfecciones en los empalmes de la fibra, estos serán mostrados más adelante. El comportamiento del cambio del factor de acoplamiento se muestra en la figura 3.9.

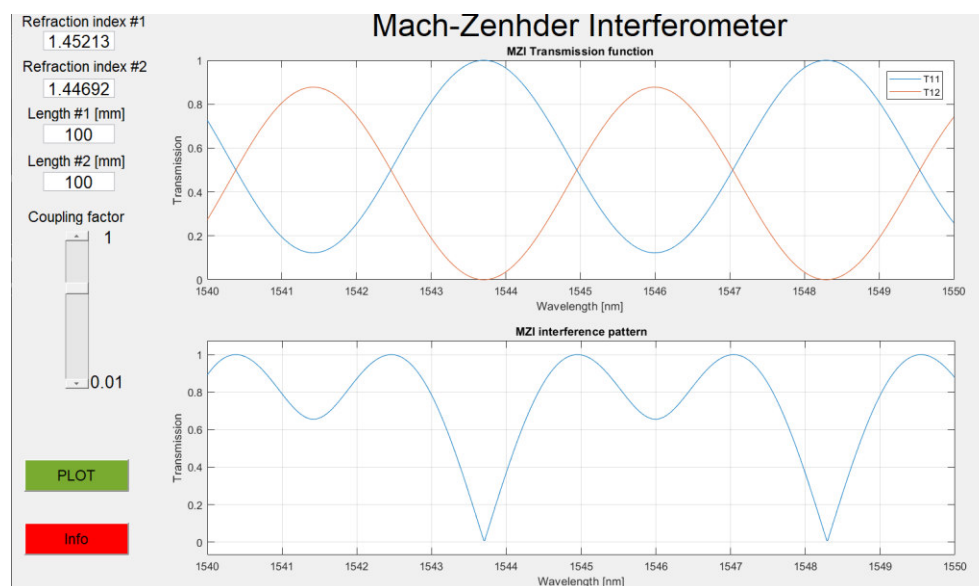


Fig 3.9.- Cambio del factor de acoplamiento en la simulación.

En la figura 3.9, puede apreciarse cómo algunas partes del espectro que anteriormente tenían valores de 0 en su transmisión ahora tienen un valor más alto, cercano a 0.6, al compararlo con la figura 3.7 se puede concluir que el factor de acoplamiento afecta a que tan profundo será el patrón de interferencia. Como nota se añade que esta simulación se ven afectados los dos factores de acoplamiento, esto con el fin de no exigir más procesamiento al equipo utilizado, por el hecho de que aun teniendo esta simplificación tarda un momento en concluir la simulación.

3.3.- Métodos de fabricación del MZI.

Para este trabajo se emplearon tres métodos de fabricación, estos serán descritos a lo largo de esta sección. Todos los métodos de fabricación son realizados a partir de imperfecciones en los empalmes o puntos donde se fusionan las fibras, en algunos los parámetros de fusión de la empalmadora FITEC S175. Cabe recalcar que todos los MZI fabricados fueron basados en segmentos de fibra SMF-28.

Comenzando con el método de fabricación Core-offset [11], se emplea un segmento de longitud L , recordando lo visto en la simulación de la sección anterior, a mayor distancia habrá una mayor cantidad de lóbulos o un FSR más pequeño, mientras que a menor distancia habrá menor cantidad de lóbulos y mayor FSR [11, 12].

Retomando el tema del método de fabricación, se toma el segmento de SMF-28 de longitud L que será el interferómetro, su núcleo se alineará de manera manual con la empalmadora FITELE S175 junto con el núcleo de otro segmento de SMF-28 que servirá de brazo para el MZI, una vez alineados se provoca un desfase u offset entre los núcleos de aproximadamente $30\mu\text{m}$ [11], una vez generado el desfase se procede a realizar la fusión de ambas fibras, realizando aproximadamente 20 descargas [11], una vez conseguido esto, se tiene el primer acoplador óptico, por lo que es importante repetir este proceso con el otro extremo del MZI para poder formar el segundo acoplador que va a reacoplar los modos y así obtener el patrón de interferencia. En la figura 3.10 se muestra un esquema del producto final, mientras que en la figura 3.11 se muestran imágenes de la empalmadora realizando el proceso.

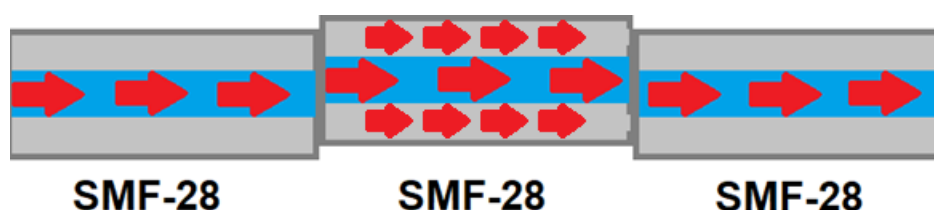


Fig 3.10.- Esquema del MZI fabricado por el método de Core-offset.



Fig 3.11.- Proceso de fabricación de los MZI con el método Core-offset.

La figura 3.10 muestra como el modo fundamental entra por uno de los brazos del MZI, se desacopla dentro del tramo del MZI, haciendo que viajen modos en el

revestimiento y en el núcleo, al final de este los modos del núcleo y el revestimiento se reacoplan formando el patrón de interferencia. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros empleados en la empalmadora FITEL S175 para la fabricación de los MZI con este método.

Parámetro	Valor
Potencia	91
Prefusión	240ms
Tiempo de duración del arco	750ms

Tabla 3.1 Parámetros del método core-offset [11].

El siguiente método es conocido como peanut taper, peanut structure o simplemente peanut. Para simplicidad se le llamara peanut a este método, nuevamente se toma un segmento de fibra SMF-28 de longitud L para formar el interferómetro, además de los segmentos que formarán los brazos del MZI, los núcleos de ambos segmentos se alinean y se colocan cerca de la zona de descarga, sin embargo estos no se fusionaran aún, se aplica la descarga de prefusión para después aplicar una descarga con una potencia alta [13-15] y un tiempo de duración de arco bastante corto, los parámetros exactos son mostrados en la tabla 3.2. Al realizar lo anterior se tiene que las fibras se han deformado, creando una especie de burbujas, una vez obtenidas las burbujas se juntan lo más posible para poder formar la estructura peanut [13-15] realizando una descarga con los mismos valores, obteniendo la estructura característica de “cacahuete”, este proceso se realiza para el otro extremo, siendo las estructuras los acopladores ópticos. El esquema del MZI es mostrado en la figura 3.12 y el proceso de fabricación en la figura 3.13.

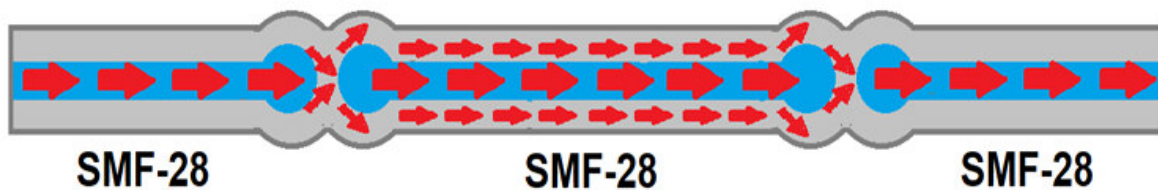


Fig 3.12.- Esquema del MZI fabricado por el método peanut.

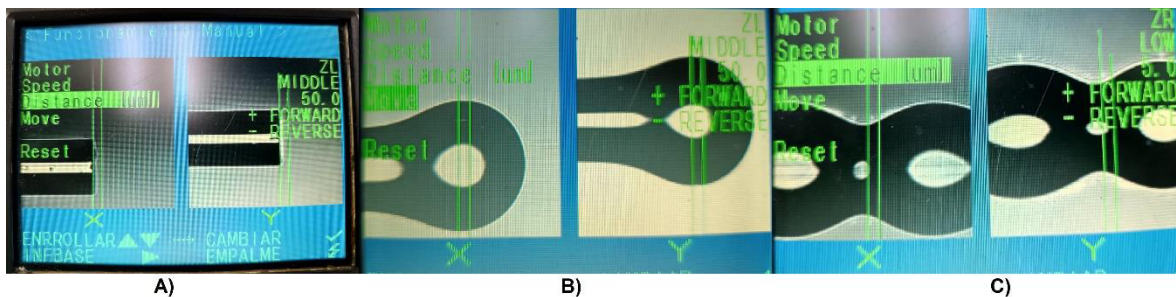


Fig 3.13.- Proceso de fabricación de los MZI con el método peanut.

En la figura 3.12 se puede apreciar cómo el modo fundamental se desacopla en el revestimiento y en el núcleo de la primera estructura peanut, por lo que hay modos en el revestimiento además del núcleo, en la segunda estructura peanut los modos se reacoplan para formar el patrón de interferencia. De la figura 3.13 podemos destacar el proceso de fabricación, si bien se describe que el proceso se puede lograr de forma simultánea, por problemas del equipo que se maneja, se obtienen mejores resultados cuando se crean las burbujas de manera individual, por ello se observan en la figura 3.13A y 3.13B la formación de la burbuja en una sola fibra, mientras que en la figura 3.13C se muestra la estructura peanut completa, cabe recalcar que los siguientes parámetros mostrados se tomaron a prueba y error, siendo estos últimos los que dieron mejores resultados

Parámetro	Valor
Potencia	230
Prefusión	240ms
Tiempo de duración del arco	50ms

Tabla 3.2 Parámetros del método peanut.

3.4.- Pérdidas por inserción.

Cómo ya se explicó en el estado del arte, las pérdidas por inserción son la energía que se perdió de una señal al conectarse un dispositivo en la línea de transmisión. Esto es importante para conocer cuanta potencia se está perdiendo en la salida debido a los MZIs, por ello se emplea la ecuación de pérdidas en dB mostrada en el capítulo anterior. Cómo los espectros ya están en una base logarítmica debido a que las unidades de potencia son dBm, simplemente se resta el espectro que muestra el arreglo al tener el MZI conectado con el espectro únicamente de la fuente ASE. Por ello en las siguientes figuras se muestran algunas de las pérdidas por inserción los MZI fabricados.

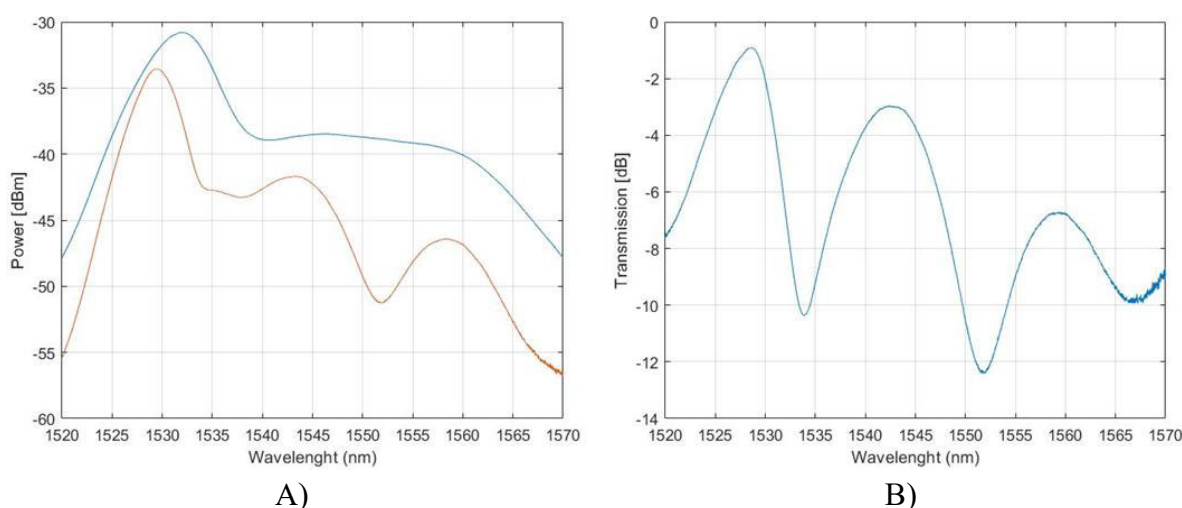


Fig 3.14.- Pérdidas del MZI #1.

La figura 3.14A muestra que la comparativa del espectro de la fuente ASE y el MZI #1, este último no parece tener un buen patrón de interferencia, este fue fabricado por el método core-offset usando un segmento de SMF-28 de 3.7cm, lo que explica porque el FSR es tan grande. Mientras que en la figura 3.15 yacen sus pérdidas por inserción, teniendo un mínimo de aproximadamente -12dB entre 1550nm a 1555nm.

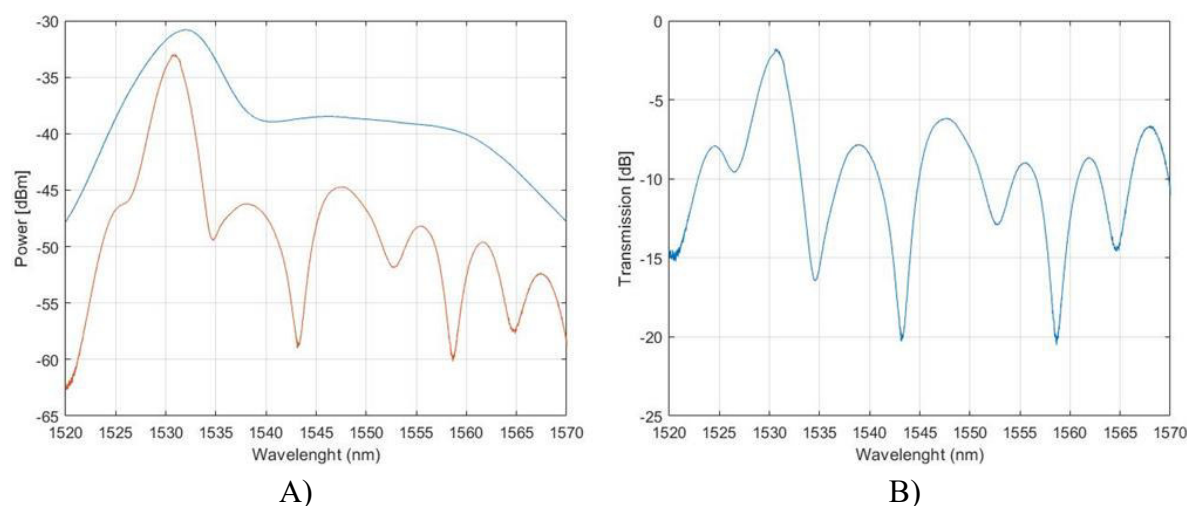


Fig 3.15.- Pérdidas del MZI #2.

A diferencia del anterior se muestra un patrón de interferencia con mayor claridad, este fue fabricado empleando un segmento de fibra SMF-28 de 9cm de longitud. Este cuenta con dos mínimos de -20dB mientras entre 1540nm a 1545nm y entre 1555nm a 1560nm (figura 3.15B). Este fue uno de los mejores MZI fabricados por core-offset

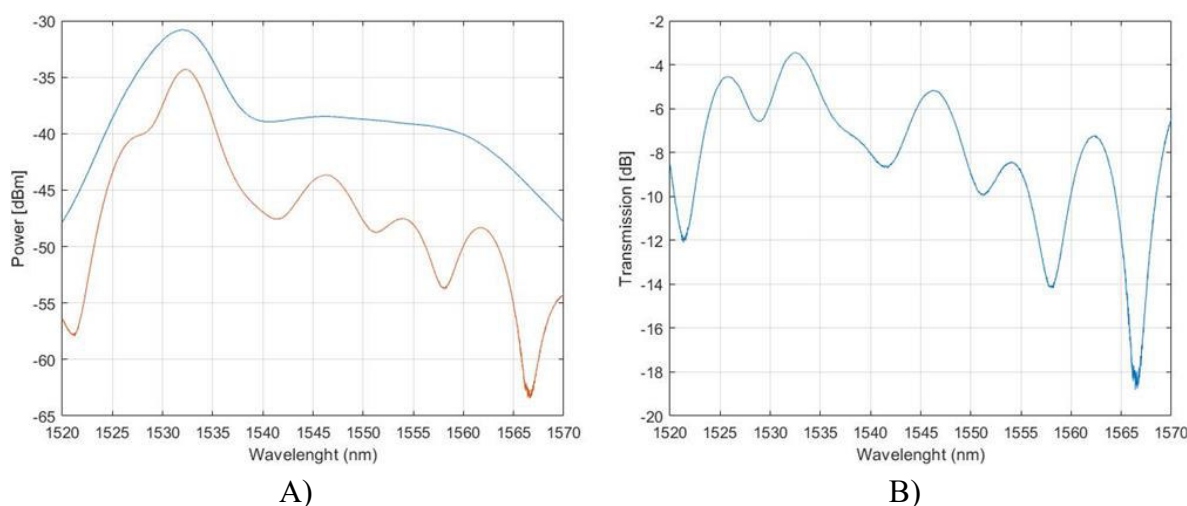


Fig 3.16.- Pérdidas del MZI #11.

En la figura 3.18 se muestra tanto el patrón de interferencia cómo las pérdidas por inserción del MZI #11 fabricado por el método peanut empleando un segmento de fibra

SMF-28 de 6cm de longitud. A simple vista en la figura 3.18A el espectro del MZI no es tan profundo en las secciones donde la fuente ASE es más plana (1540nm-1560nm), esto puede deberse al factor de acoplamiento, mientras que en la figura 3.16B se muestran las pérdidas por inserción, si bien el dispositivo no tiene tantas pérdidas el patrón de interferencia carece de la profundidad necesaria.

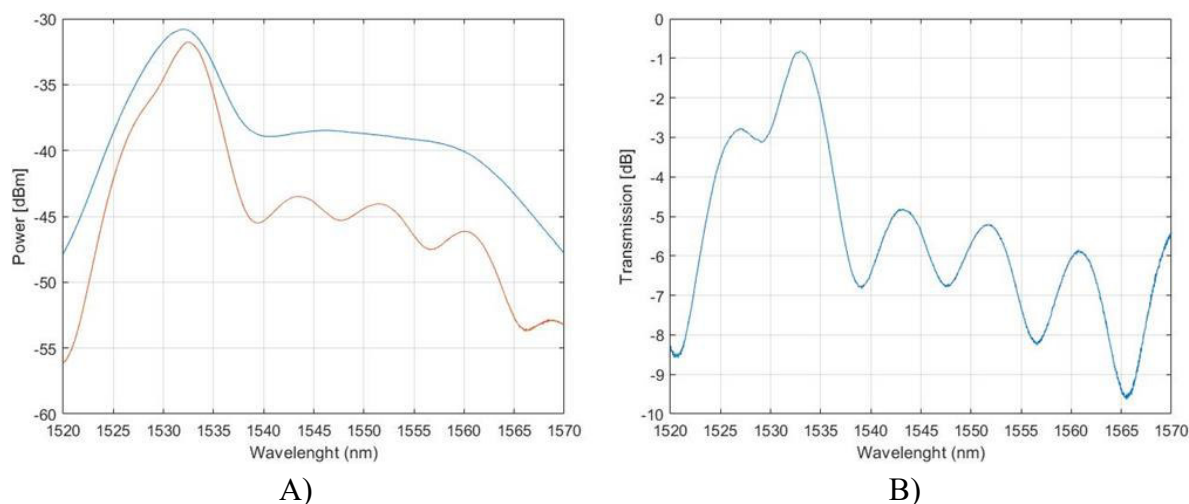


Fig 3.17.- Pérdidas del MZI #16.

En la figura 3.17 se muestra el patrón de interferencia y las pérdidas por inserción del MZI #16, este MZI fue fabricado por medio del método peanut empleando un segmento de fibra SMF-28 de 5.1cm de longitud, en la figura 3.17A se aprecia que el patrón de interferencia no es tan profundo, mientras que en la figura 3.18B se observa que sus pérdidas son menores en comparación al anterior, no obstante, carece de profundidad el patrón.

Con ello se observa que los MZI fabricados por el método core-offset cuentan con mejor profundidad que los que fueron fabricados por el método peanut.

3.5.- Caracterización en curvatura de los MZI.

La caracterización de los MZIs en curvatura es importante debido a que es necesario conocer cómo está reaccionando su patrón de interferencia en base a los cambios físicos, es decir, si está cambiando su fase o su amplitud, además es importante conocer que zonas del MZI tienen un comportamiento lineal [16].

El propósito de esta caracterización es tomar uno de los lóbulos o crestas del patrón de interferencia, observar como este se ve afectado por un parámetro físico y por último ver que tan lineal puede ser. Por ello se emplea la curvatura, un parámetro simple de replicar teniendo los materiales adecuados, para ello se emplea un segmento de aluminio con dos sujetadores a los costados, en su parte central se encuentra un vernier micrómetro, el cual

hará presión en el centro de la lámina, provocando la curvatura, esta lamina a su vez cuenta con un riel dónde se colocará el MZI, tratando de que el centro del dispositivo quede exactamente dónde el vernier ejerce la deformación. Este dispositivo es mostrado en la figura 3.18.



Fig 3.18.- Dispositivo para generar curvatura.

El vernier realizó un recorrido de 1mm hasta 10mm, por lo que esto se traduce a una curvatura de 0.0391m^{-1} hasta 0.391m^{-1} la ecuación que calculó este parámetro se encuentra en el estado del arte. Esto teniendo en cuenta que el segmento de la lámina de aluminio es de 32cm aproximadamente. Los espectros del MZI #2 son mostrado en la figura 3.19 al aplicar la curvatura sobre este último.

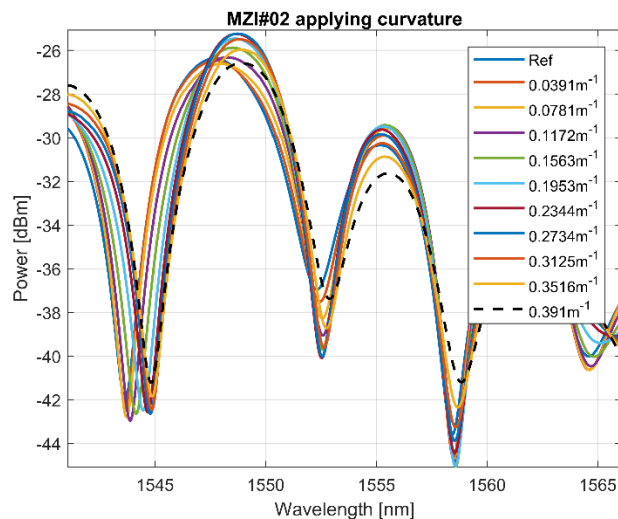


Fig 3.19.- Espectros del MZI #2 aplicando curvatura.

Como se observa, hay varias zonas que se pueden tomar, por ejemplo, la atenuación que está cerca de 1545nm, la cresta que se encuentra entre 1545nm a 1550nm y muchas

otras secciones, a simple vista la atenuación cercana a 1545nm parece tener un comportamiento lineal en la fase, por lo que se procede a realizar un acercamiento, este acercamiento es mostrado en la figura 3.20.

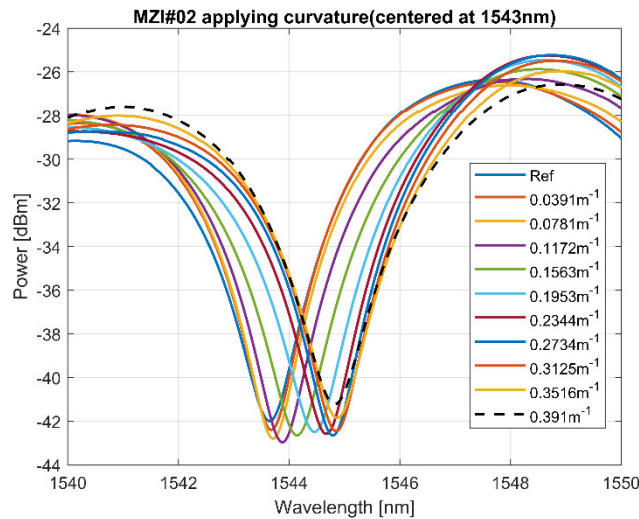


Fig 3.20.- Espectros del MZI #2 aplicando curvatura centrados en 1543nm.

La figura 3.20 muestra que en la fase hay cambios, no obstante, estos no parecen tener una linealidad a simple vista, por lo que se procede a realizar una regresión lineal y a su vez una aproximación de curvas de orden superior, esto es mostrado en la figura 3.21.

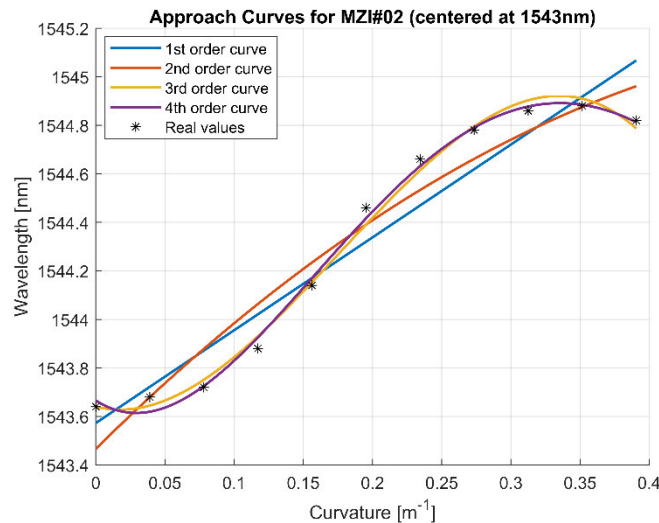


Fig 3.21.- Aproximación de curvas de la atenuación centrada en 1543nm del MZI #2.

Como puede observarse en la figura 3.21, el comportamiento lineal es nulo, no obstante, los puntos se ajustan relativamente bien a las curvas de 3er y 4to orden, sobre

todo a esta última dónde coinciden 6 puntos. Con ello demostramos que la atenuación centrada en 1543nm no tiene un comportamiento lineal, este proceso se realizó para los demás MZIs mencionados.

3.6.- Desarrollo de las pruebas.

Al tener fabricados varios MZI con distintas técnicas, se procede a realizar las pruebas en vibración, para ello se hace uso de la plataforma vibratoria mostrada en la sección 3.1 junto al arreglo experimental. Primeramente, se ajusta un voltaje de 12V para el funcionamiento del amplificador.

Las pruebas son en base a los 4 tipos de señales mostradas en la aplicación, esto es con la finalidad de apreciar que tipos de señales son más susceptibles a alterar el comportamiento del MZI, además de emplear rangos de frecuencia bajos desde 1Hz hasta 10Hz y de 10Hz a 100Hz con incrementos de 10Hz debido a que se desconoce la frecuencia de vibración de la herramienta o bien su frecuencia natural. Teorizando que debido a los desgastes que puede provocar la herramienta de maquinado a las piezas, esta vibra a bajas frecuencias.

Dicho lo anterior la primera sección de pruebas para los MZIs con mejor patrón de interferencia se hace dentro de un rango de frecuencias de 1Hz a 10Hz empleando las señales, senoidal, cuadrada, triangular y diente de sierra para inducir vibraciones sobre los MZIs.

Una vez el MZI está dentro del arreglo experimental visto en la figura 3.1 se procede a fijarlo en la plataforma vibratoria, una vez fijado se procede a colocar la corriente del diodo láser a 300mA como se explicó en la sección 3.1, posteriormente se hace el primer escaneo con el OSA (Anritsu 9740A) el cual servirá como referencia ya que no se le está aplicando vibración al MZI, una vez tomado, se procede a realizar el segundo escaneo ya induciendo vibración comenzando con 1Hz usando la señal senoidal, se procede a realizar este mismo procedimiento hasta completar los 10Hz. Toda la prueba se repite con los demás tipos de señales.

Para las pruebas en un rango de frecuencias de 10Hz a 100Hz con incrementos de 10Hz se realiza el mismo procedimiento que en la prueba anterior, abarcando todos los tipos de señales. El montaje de la prueba es visto en la figura 3.22.

Una vez obtenidos todos los datos de las pruebas anteriores se opta por emplear la transformada rápida de Fourier (FFT), debido a que es una herramienta frecuentemente utilizada para el procesamiento de señales y encontrar datos interesantes, para este caso de señales ópticas la FFT debe mostrar valores de frecuencias espaciales.



Fig 3.22.- Montaje de las pruebas en vibración.

Una vez realizadas las pruebas en el OSA, se procede a realizar pruebas en tiempo, empleando un fotodetector D400FC y un osciloscopio capaz de tomar señales en el rango de GHz (Keysight MSOX6004). Ahora estas pruebas son implementadas sobre la herramienta de maquinado, la cual es una barra de interiores A16R-SVQCR 11-ER, esta se coloca en una prensa como soporte, el MZI es colocado sobre la herramienta, ahora para inducir vibraciones se emplea el uso de fuerza bruta, es decir, la herramienta será golpeada con un martillo a un ritmo constante de su costado para poder así inducir vibraciones sobre la herramienta y el MZI, esto con el fin de encontrar frecuencias claves para implementar el MZI como un sensor óptico de vibración. El arreglo experimental tiene modificaciones ligeras, este es visto en la figura 3.23.

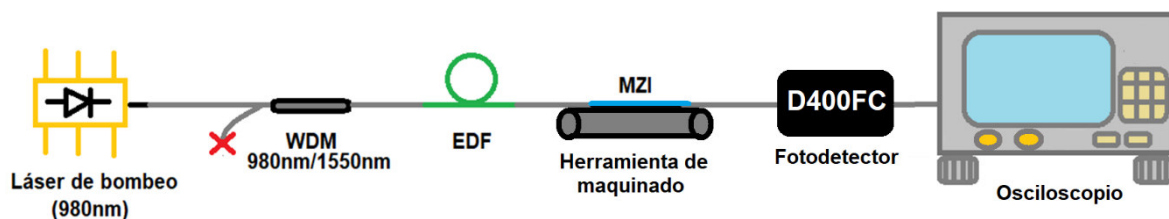


Fig 3.23.- Arreglo experimental modificado para las pruebas en tiempo.

El montaje del MZI es mostrado en la figura 3.24. En esta se puede observar cómo el MZI queda totalmente colocado sobre la herramienta siendo soportada por la prensa para evitar cualquier tipo de desajuste o evitar que la herramienta salga expulsada por los golpes del martillo.

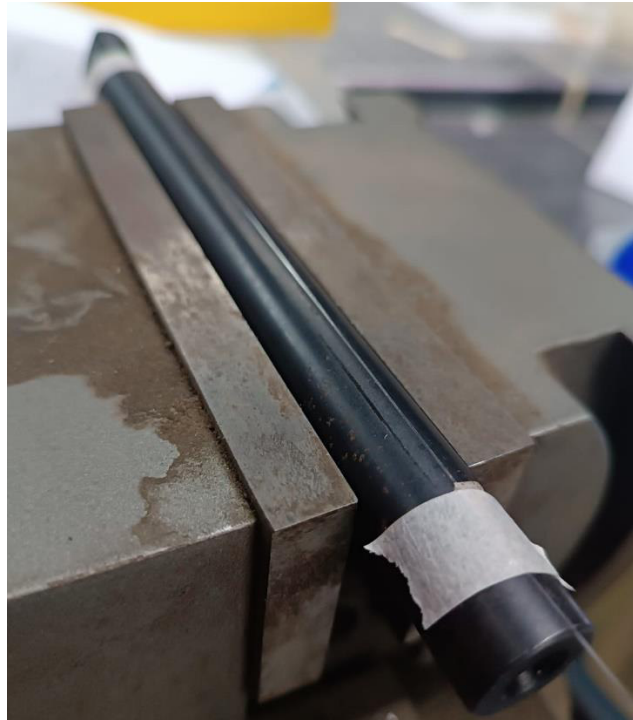


Fig 3.24.- Montaje del MZI sobre la herramienta de maquinado.

Una vez obtenidas las señales en tiempo del MZI, se procede a implementar nuevamente la FFT para encontrar frecuencias claves por parte de los golpes del martillo. En base a esos datos determinar una tabla de equivalencias o un valor cuantitativo de la frecuencia.

Referencias del capítulo.

- [1] A. Aalto, G. Genty, T. Laurila, and J. Toivonen, “Incoherent broadband cavity enhanced absorption spectroscopy using supercontinuum and superluminescent diode sources,” *Opt Express*, vol. 23, no. 19, p. 25225, Sep. 2015, doi: 10.1364/OE.23.025225.
- [2] W. Denzer et al., “Trace species detection in the near infrared using Fourier transform broadband cavity enhanced absorption spectroscopy: initial studies on potential breath analytes,” *Analyst*, vol. 136, no. 4, pp. 801–806, 2011, doi: 10.1039/C0AN00462F.
- [3] K. Divya, K. Sulochana, and N. J. Vasa, “Superluminescent Diode-Based Multiple-Gas Sensor for NH₃ and H₂O Vapor Monitoring,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 18, no. 5, pp. 1540–1546, Sep. 2012, doi: 10.1109/JSTQE.2011.2179021.

- [4] J. A. Martin-Vela et al., “All Single-Mode-Fiber Supercontinuum Source Setup for Monitoring of Multiple Gases Applications,” *Sensors*, vol. 20, no. 11, p. 3239, Jun. 2020, doi: 10.3390/s20113239.
- [5] D. M. Brown, K. Shi, Z. Liu, and C. R. Philbrick, “Long-path supercontinuum absorption spectroscopy for measurement of atmospheric constituents,” *Opt Express*, vol. 16, no. 12, p. 8457, Jun. 2008, doi: 10.1364/OE.16.008457.
- [6] E. Desurvire and J.R. Simpson, “Amplification of Spontaneous Emission in Erbium-Doped Single-Mode Fibers”, *J. Lightwave Tech.*, Vol.7, No.5, 835,1989.
- [7] M.I. Md Ali, S.A. Ibrahim, M.H. Abu Bakar, A.S.M. Noor, S.B. Ahmad Anas, A.K. Zamzuri, M.A. Mahdi, Tapered-EDF-based Mach-Zehnder interferometer for dual-wavelength fiber laser, *IEEE Photon. J.* 6 (5) (2014) 1–10, <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2361642>.
- [8] M.I. Md Ali, A.S.M. Noor, S.B. Ahmad Anas, M.H. Abu Bakar, M.A. Mahdi, Stable dual-wavelength fiber laser utilizing tapered-EDF as comb filter in hybrid Raman EDF gains, in: *Proc. of IEEE 5th Int. Conf. on Photon. (ICP)*, 2014, pp. 87–89. <https://doi.org/10.1109/ICP.2014.7002319>.
- [9] W. Zhu, L. Qian, and A. S. Helmy, “Implementation of three functional devices using erbium-doped fibers: an advanced photonics lab,” M. Nantel, Ed., Aug. 2015, p. 966511. doi: 10.1117/12.2207348.
- [10] G. Maier, A. Pattavina, S. De Patre, and M. Martinelli, “Optical Network Survivability: Protection Techniques in the WDM Layer,” *Photonic Network Communications*, vol. 4, no. 3–4, pp. 251–269, Jul. 2002, doi: 10.1023/A:1016047527226.
- [11] E. Huerta-Mascotte *et al.*, “A Core-Offset Mach Zehnder Interferometer Based on A Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber and Its Torsion Sensing Application,” *Sensors*, vol. 16, no. 6, p. 856, Jun. 2016, doi: 10.3390/s16060856.
- [12] Chen, W.G.; Lou, S.Q.; Feng, S.C.; Wang, L.W.; Li, H.L.; Guo, T.Y.; Jian, S.S. Switchable multi-wavelength fiber ring laser based on compact in-fiber Mach-Zehnder interferometer with photonic crystal fiber. *Laser Phys.* 2009, 19, 2115–2119.
- [13] S. Xiao, B. Wu, C. Sun, Z. Wang, and Y. Jiang, “Strain and Temperature Discrimination Based on a Mach-Zehnder Interferometer With Cascaded Single Mode Fibers,” *Photonic Sensors*, vol. 13, no. 1, p. 230122, Mar. 2023, doi: 10.1007/s13320-022-0664-7.
- [14] S. Xiao, B. Wu, Z. Wang, and Y. Jiang, “A peanut taper based Mach-Zehnder interferometric sensor for strain and temperature discrimination,” *Optical Fiber Technology*, 2022, 70: 102871.

[15] D. Wu, T. Zhu, K. S. Chiang, and M. Deng, “All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures,” *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(5): 805–810.

[16] J. Gutiérrez Gutiérrez *et al.*, “A curvature sensing setup based on an asymmetric concatenated tapered Mach-Zehnder interferometer,” *Opt Laser Technol*, vol. 132, p. 106490, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106490.

Capítulo 4.

Pruebas y resultados.

En este capítulo serán mostrados los resultados experimentales obtenidos en las pruebas, primordialmente estos resultados son en base al interferómetro Mach-Zehnder (MZI) número dos, al cual se le realizaron pruebas en vibración empleando el sistema electrónico anteriormente descrito en la metodología. De manera que se van a presentar graficas de los espectros que se formaron gracias al MZI al aplicar vibraciones sobre este, aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT) para el procesamiento de las señales espectrales y temporales.

Más aún, no se debe de dejar a un lado que este tema de interés es aplicado al maquinado, por lo que también se verán resultados de cuando se inducen vibraciones sobre una herramienta empleada para la fabricación de piezas, implicando el uso del MZI, esta prueba se encuentra mejor descrita en la metodología, esta última se implementó también el uso de un fotodetector D400FC para obtener la respuesta en tiempo.

4.1.- Pruebas sobre el MZI #02 en el rango de 1Hz a 10Hz.

Anteriormente en la metodología se mostró el esquema experimental empleado, dicho esto a cada MZI se les fue aplicado dos rangos de frecuencias empleando distintos tipos de ondas, estos rangos fueron de 1Hz a 10Hz y de 10Hz a 100Hz con incrementos de 10Hz. Los tipos de onda empleados fueron: senoidal, triangular, cuadrada y diente de sierra, evidentemente se podrá observar que las señales con cambios más abruptos como la señal cuadrada y la de diente de sierra tienen un comportamiento más agresivo en el interferómetro que las que tienen cambios más suaves como la señal senoidal y triangular, esto se debe a que la plataforma vibratoria está basada en una bocina.

Para comenzar se utilizó el interferómetro número 2, este anteriormente fue fabricado por la técnica Core-offset (dicha técnica se encuentra detallada en la sección de la metodología), esto empleando una sección de fibra SMF-28 de 9cm de longitud. Al aplicarse vibraciones en el rango de 1 a 10Hz usando una señal senoidal son mostrados en la figura 4.1.

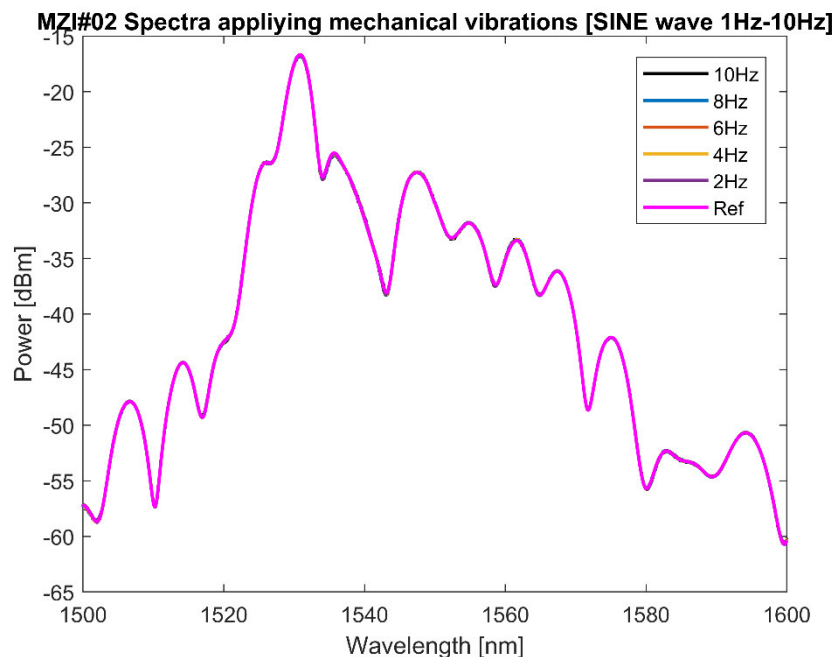


Fig 4.1.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal senoidal de 1 a 10Hz.

Por simplicidad para el lector se optó por solamente mostrar las frecuencias pares, esto se debe únicamente por estética de la gráfica, siendo que si se muestra el rango completo podría haber confusiones. Si bien a simple vista no se observan grandes cambios, realizando un acercamiento a los espectros en la zona de 1540nm a 1570nm se logran percibir pequeñas variaciones en amplitud (figura 4.2).

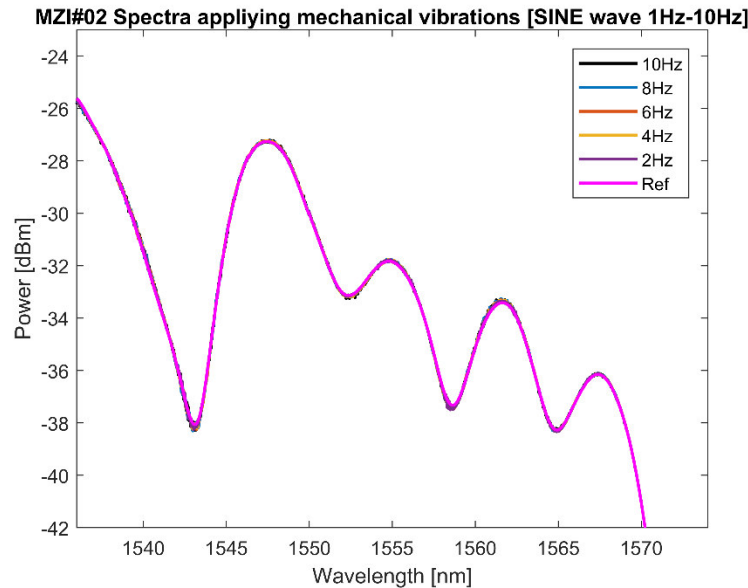


Fig 4.2.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal senoidal de 1 a 10Hz.

En la figura 4.2 se observa cómo el espectro del interferómetro de referencia (rosa) tuvo ligeramente cambios en la amplitud conforme se iba aumentando la frecuencia de las vibraciones mecánicas, no obstante, se puede observar en ciertas regiones del espectro un tipo de modulación, por ejemplo, en las zonas de 1540nm a 1545nm y 1555nm a 1565nm es más notorio en el rango de frecuencias propuesto.

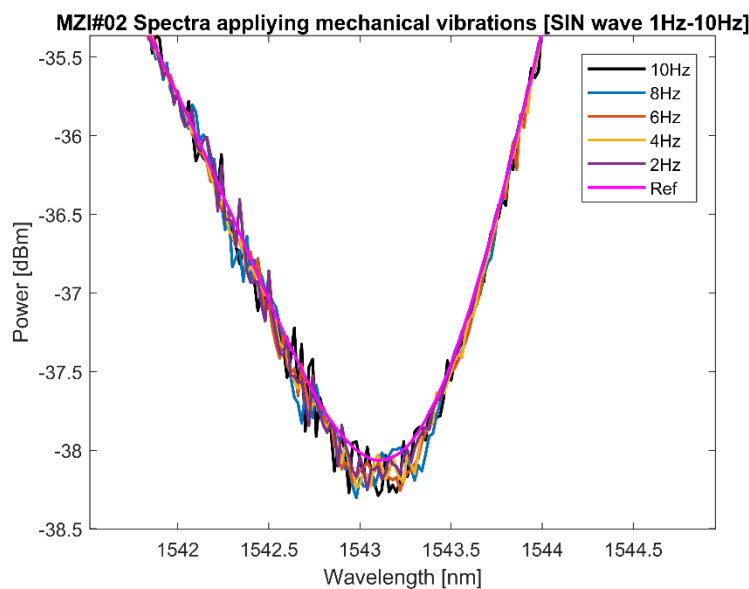


Fig 4.3.- Acercamiento a la zona de 1542nm a 1544nm del MZI #02.

Nuevamente realizando un acercamiento en los espectros, detalladamente se

observa la modulación anteriormente mencionada y no solo la modulación se observa en las zonas anteriormente descritas, sino que está sobre todo el patrón de interferencia, esto es apreciado en la figura 4.3. Este puede no ser el mejor ejemplo, no obstante, en los siguientes casos donde se emplea un tipo de señal de entrada distinta en la plataforma vibratoria.

Anteriormente en base a un trabajo relacionado con moduladores acusto-ópticos (AOM acousto-optic modulator) [1], este dispositivo se basa en un tramo de fibra adelgazada (taper) colocado en una estructura cónica, los resultados de este trabajo arrojaron que dicho tramo puede llegar a comportarse como una rejilla de Bragg cuando se le aplican vibraciones y como estas últimas se presentan en el espectro. Sí bien el dispositivo presentado en este trabajo difiere del de la referencia, se puede observar una cierta similitud en su comportamiento, en [1] se explica que en el espectro obtenido del AOM tiene pequeñas modulaciones. Esto es debido a que la fibra óptica cuando está vibrando puede hacer que parte del modo fundamental del núcleo pueda interferir con los modos del revestimiento y viceversa [1-4].

Una vez que ya se obtuvieron los espectros de la señal senoidal, se aplica la FFT a cada uno de ellos, esto es con el fin de observar cómo interactúan los modos que están en interacción dentro del interferómetro, para este caso en base al trabajo descrito en [5], explican que la región de las frecuencias espaciales bajas se conoce como la zona de los modos dominantes del revestimiento, estos serían los que provocan la interferencia en un MZI, mientras que región frecuencias espaciales altas se le atribuyen los modos débiles del revestimiento, que sí bien también contribuyen a la interferencia, su contribución puede tomarse como despreciable. Dicho esto, la figura 4.4 representa la FFT de los espectros induciendo una señal senoidal en la plataforma vibratoria.

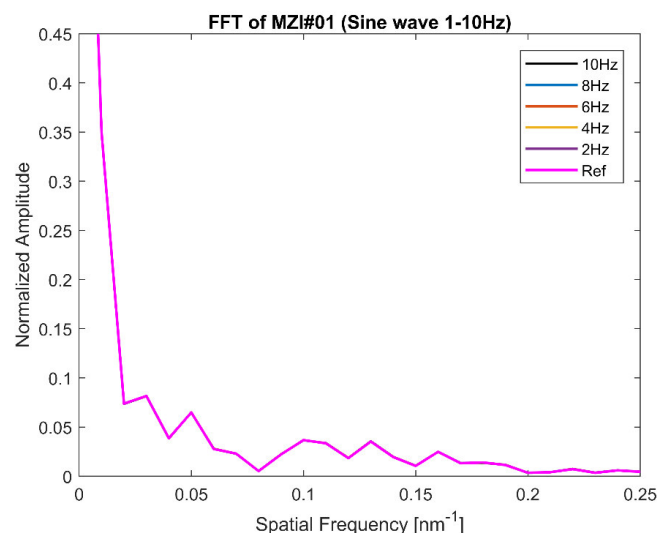


Fig 4.4.- Zona de los modos dominantes del revestimiento del MZI #02 cuando se le inducen vibraciones por medio de una señal senoidal en el rango de 1 a 10Hz.

A simple vista en la figura 4.4 no se observan cambios en cada una de las curvas obtenidas por la FFT, no obstante, si se realizan acercamientos a los modos que interactúan en las frecuencias espaciales de 0.03nm^{-1} , 0.05nm^{-1} , 0.13nm^{-1} , 0.15nm^{-1} . El cambio en amplitud es evidente, esto es mostrado en las figuras 4.5a, 4.5b, 4.6a, 4.6b.

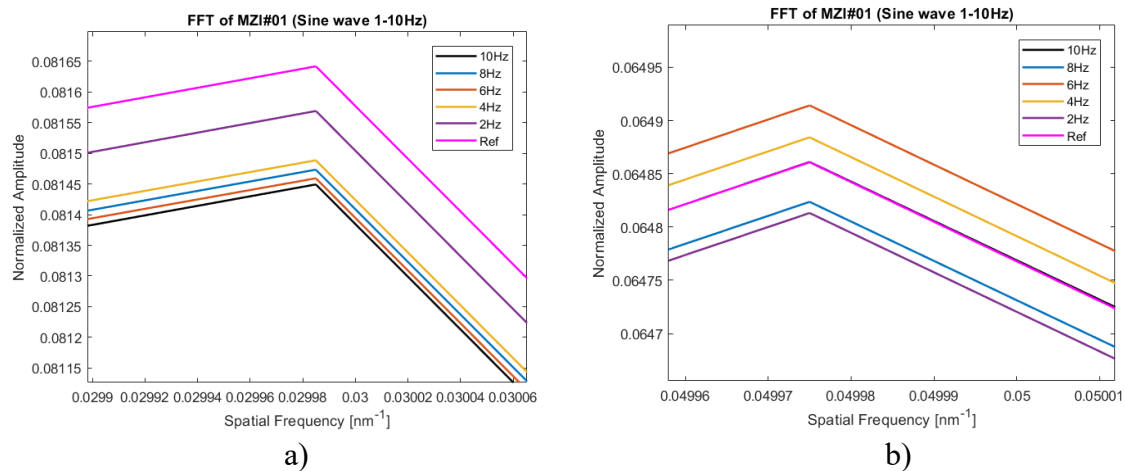


Fig 4.5.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal.

Evidentemente se observa como la amplitud de los modos dominantes del revestimiento cambia respecto a la referencia (curva rosa), esto mismo ocurre en la figura 4.6, como se observa más igualmente los modos cambian en amplitud respecto a la referencia, es curioso debido a que el cambio presente es distinto para cada frecuencia espacial.

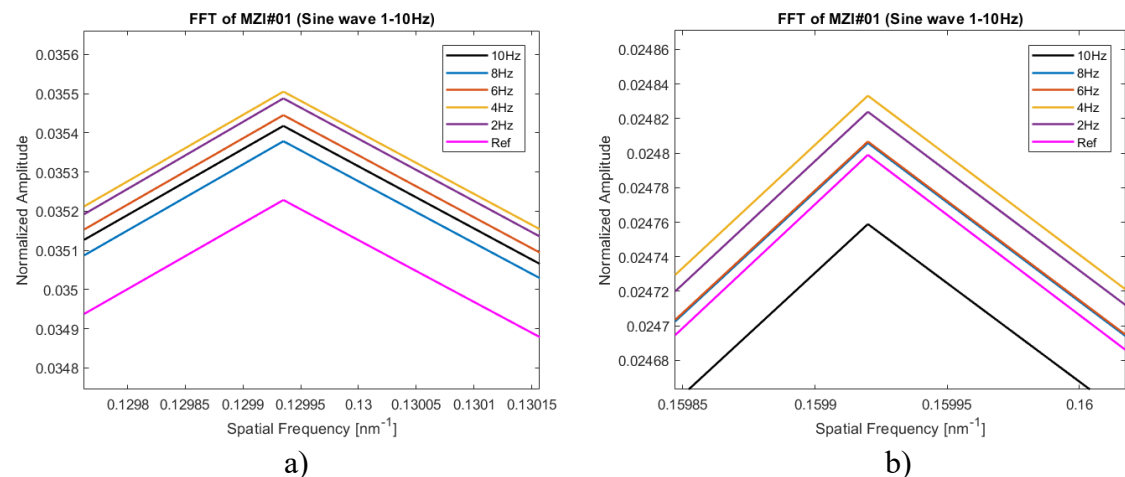


Fig 4.6.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.15nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal.

Ahora está por ocurrir algo aún más curioso, para ello la figura 4.7 muestra cómo interactúan los modos débiles del revestimiento.

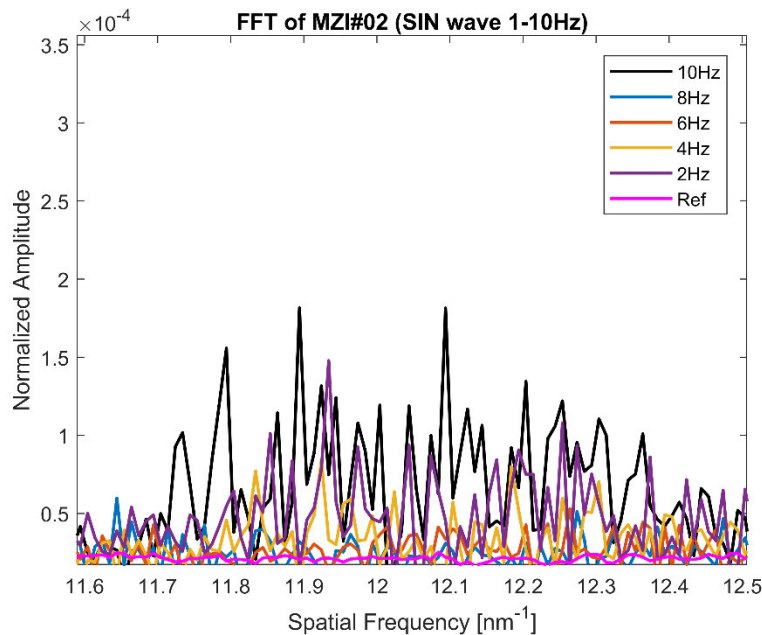


Fig 4.7.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal.

Cómo se muestra hay distribuciones de frecuencias espaciales, estas se pueden atribuir a la modulación anteriormente observada en cada uno de los espectros de los patrones de interferencia, ahora bien, se tiene una hipótesis la cual radica en que al inducir vibraciones sobre el MZI los modos débiles del revestimiento se comienzan a excitar, haciendo que aparezca la modulación a lo largo de todo el espectro.

Anteriormente se dio mención a otra hipótesis, la cual es que directamente las vibraciones logren un efecto acusto-óptico, haciendo que las vibraciones se monten a lo largo del espectro [1][4], con creces se puede considerar que el sensor tiene otro uso además de medir cualitativamente las vibraciones.

Pasando al siguiente caso, ahora se emplea una señal totalmente distinta a la senoidal, en este caso es una señal del tipo cuadrada, en la figura 4.8 se muestran los espectros aplicando un barrido de frecuencias de 1Hz a 10Hz.

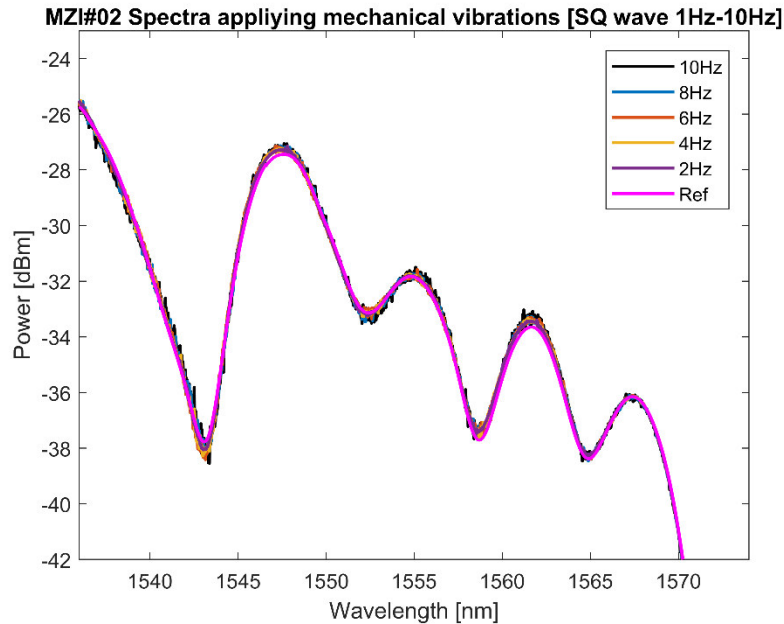


Fig 4.8.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal cuadrada de 1 a 10Hz.

En comparación con el caso anterior, la modulación en cada uno de los espectros es sumamente notoria, con excepción de la referencia, siendo que las zonas dónde la modulación tiene mayor amplitud es en el pico de atenuación ubicado entre 1540nm a 1545nm y la región de 1550nm a 1565nm.

Aún que la pregunta es ¿por qué la modulación es más amplia en el espectro aplicando la señal cuadrada que en el de la señal seno? Bueno eso es simple de responder, dado que la plataforma vibratoria está basada en una bocina de 8Ω , las bocinas tienden a tener vibraciones más fuertes porque la señal cuadrada tiene cambios abruptos de amplitud a diferencia de una senoidal [6][7], a su vez los recortes de onda o clipping pueden dañar el diafragma de la bocina por falla térmica [8].

Con lo anterior explicado, ahora es importante observar los modos en interacción, tanto los dominantes como los débiles. Debido a que la FFT sin realizar los acercamientos para el caso de la señal senoidal, cuadrada y los posterior en el rango de 1Hz a 10Hz es bastante similar a la figura 4.4, para evita colocar la “misma” imagen se optó por no colocar, únicamente los acercamientos a los modos ya mencionados.

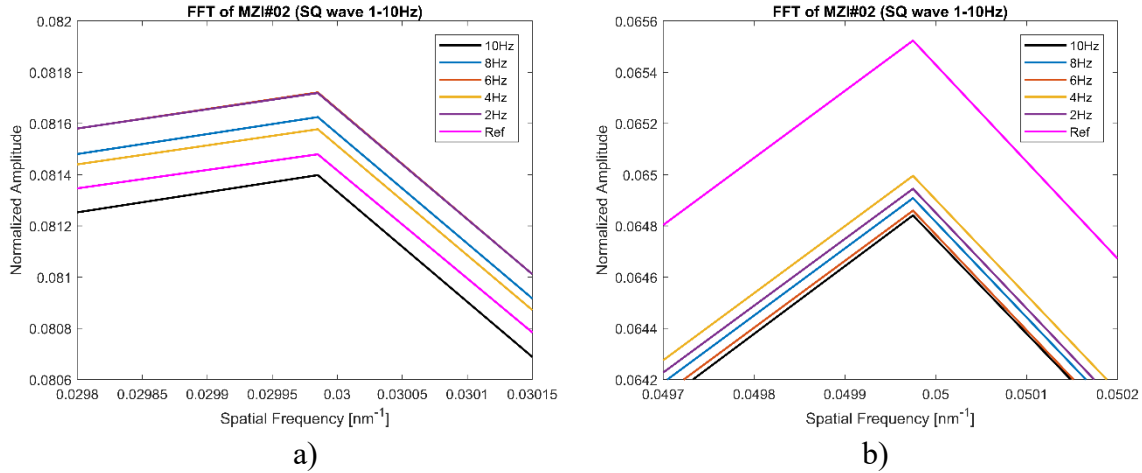


Fig 4.9.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada.

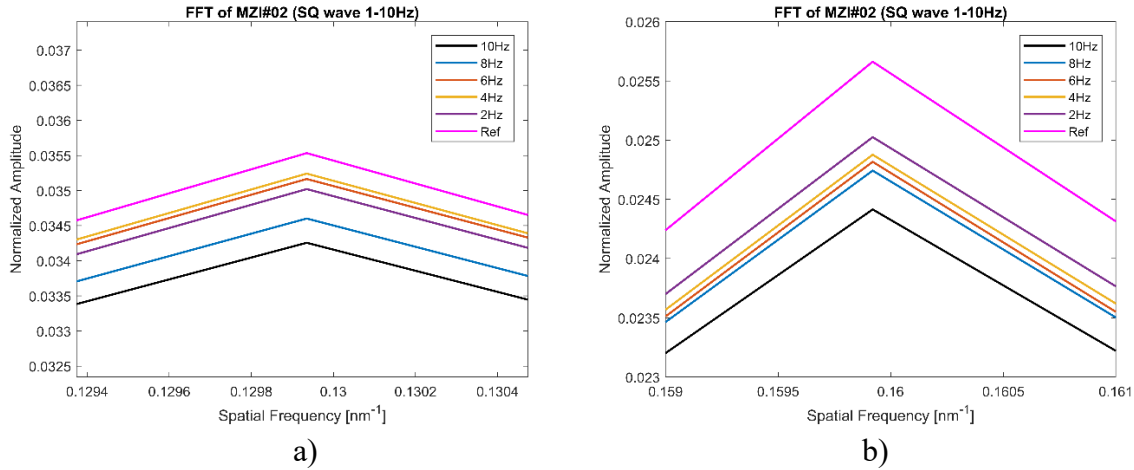


Fig 4.10.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.16nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada.

A simple vista se observa que hay cambios en la amplitud para los casos de las figuras 4.9 y 4.10, con ello se demuestra que para este caso la amplitud del espectro cambia, nuevamente esto no es suficiente, se debe observar los modos débiles del revestimiento, esto se muestra en la figura 4.11.

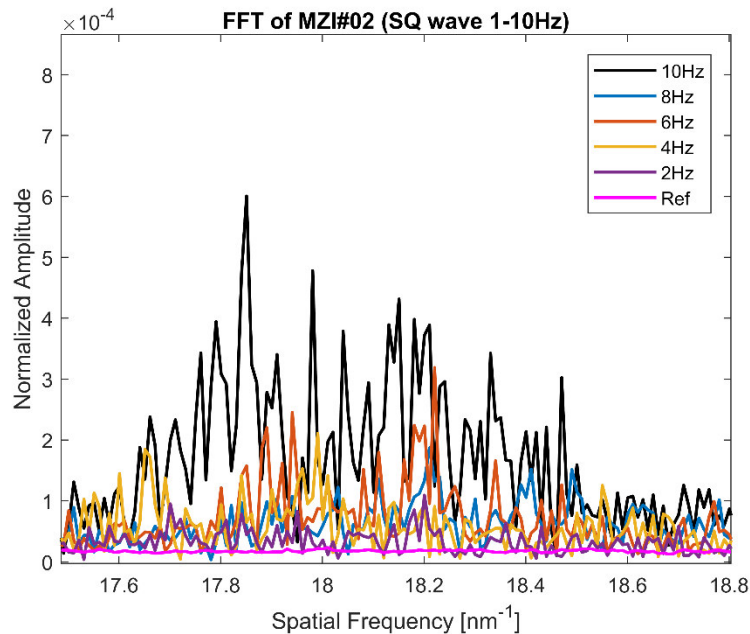


Fig 4.11.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada.

Como puede apreciarse en la figura, hay ciertas frecuencias espaciales que son más amplias que otras, lo que quiere decir que varios de los modos débiles a lo largo de las frecuencias espaciales se comportan de forma diferente dependiendo la frecuencia de vibración.

Se debe de destacar que dependiendo del tipo de señal las distribuciones de frecuencia cambian para los rangos, esto puede apreciarse comparando el caso de la señal senoidal con el caso de la señal cuadrada. Siendo que el rango de frecuencia espacial para la aplicación de la señal senoidal se tiene de 11.6 a 12.5 nm^{-1} y en este caso se tiene de 17.5 a 18.8 nm^{-1} aproximadamente, por lo que el tipo de señal también es algo a considerar, al menos en el caso de las frecuencias bajas.

El siguiente caso emplea una señal triangular en la plataforma vibratoria, los espectros de este caso son mostrados a continuación en la figura 4.12.

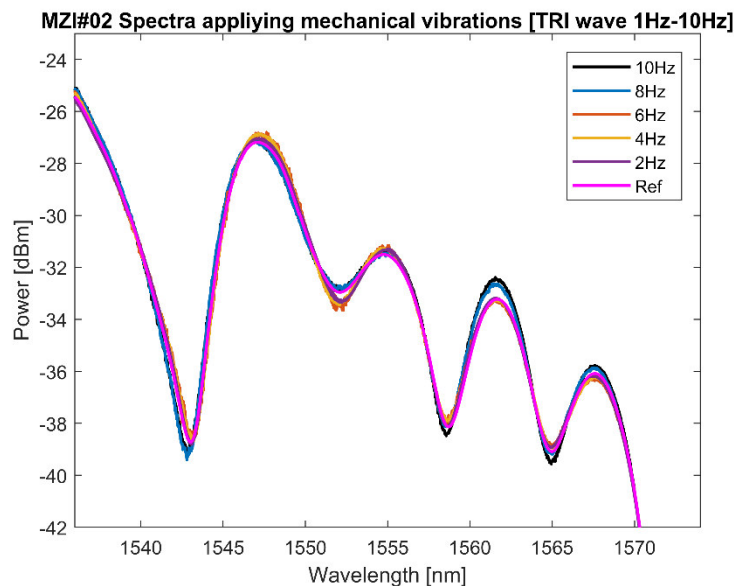


Fig 4.12.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal triangular de 1 a 10Hz.

Para este caso a diferencia de los dos anteriores, aquí sí es más notorio un cambio de amplitud y un ligero cambio en la fase de los espectros respecto al de referencia, dichos cambios de amplitud pueden verse en los rangos de longitud de onda de aproximadamente 1540nm a 1545nm, 1550nm a 1555nm y 1555nm a 1565nm.

Añadiendo que también estos resultados presentan modulaciones a lo largo de todo el espectro nuevamente al igual que los dos casos anteriores, por lo que es importante también observar los modos débiles del revestimiento, así como los dominantes del mismo. En las figuras 4.13 y 4.14 se presentan los modos dominantes para este caso en particular.

Con creces se puede esperar que en los modos dominantes existan cambios de amplitud, reafirmando que lo que se ve en los espectros es correcto, así también como los ligeros cambios que existen la fase de cada uno de los espectros respecto a la referencia.

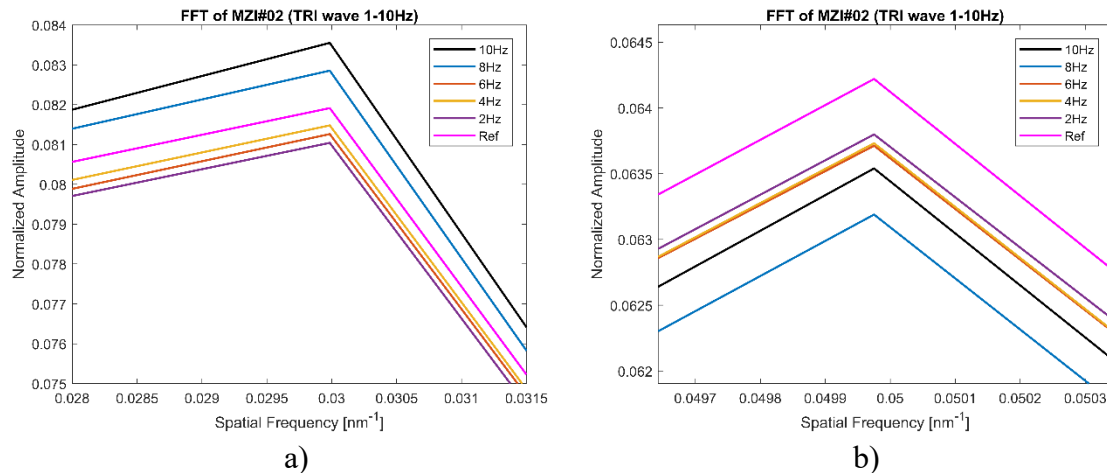


Fig 4.13.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03 nm^{-1} y 0.05 nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal triangular.

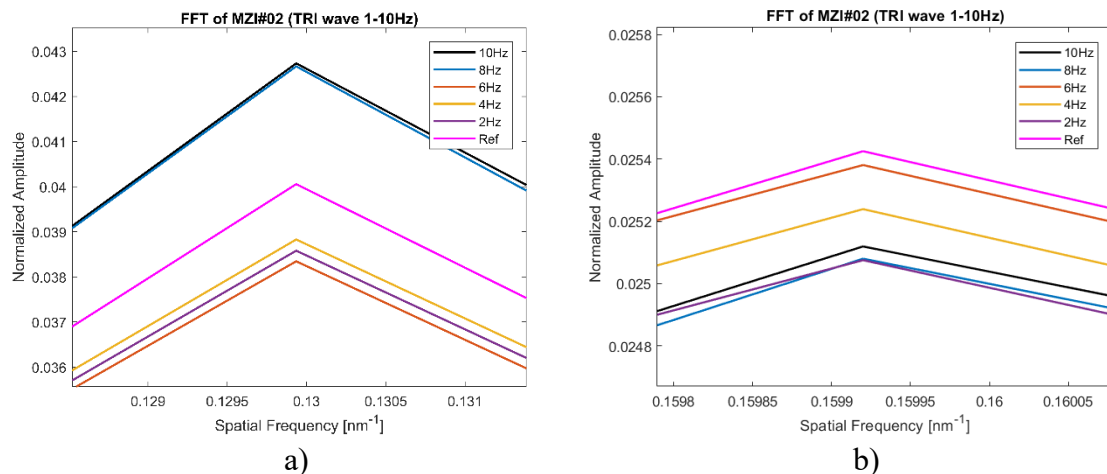


Fig 4.14.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13 nm^{-1} y 0.15 nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal triangular.

Empezando con las figuras 4.13a y 4.13b, se tienen cambios sumamente notorios para la amplitud, con la excepción de que en la figura 4.13b las frecuencias de 4Hz y 6Hz son relativamente similares, realmente no es así, para esas dos frecuencias la amplitud en el modo de 0.05 nm^{-1} si tiene un cambio de amplitud, ligero pero existente. Esto mismo ocurre en la figura 4.14a para las frecuencias de 8Hz y 10Hz. Las figuras 4.14a y 4.14b muestran cambios en la amplitud nuevamente, sin embargo, donde se observan mejor los ligeros cambios de la fase es en las figuras 4.13a, 4.13b y la figura 4.14b.

Pasando turno a los modos débiles del revestimiento, para este caso se tomo un rango de 17.7 a 18.7 nm^{-1} , esto debido a que eran los más notorios a lo largo de toda la FFT. Los resultados son mostrados en la figura 4.15.

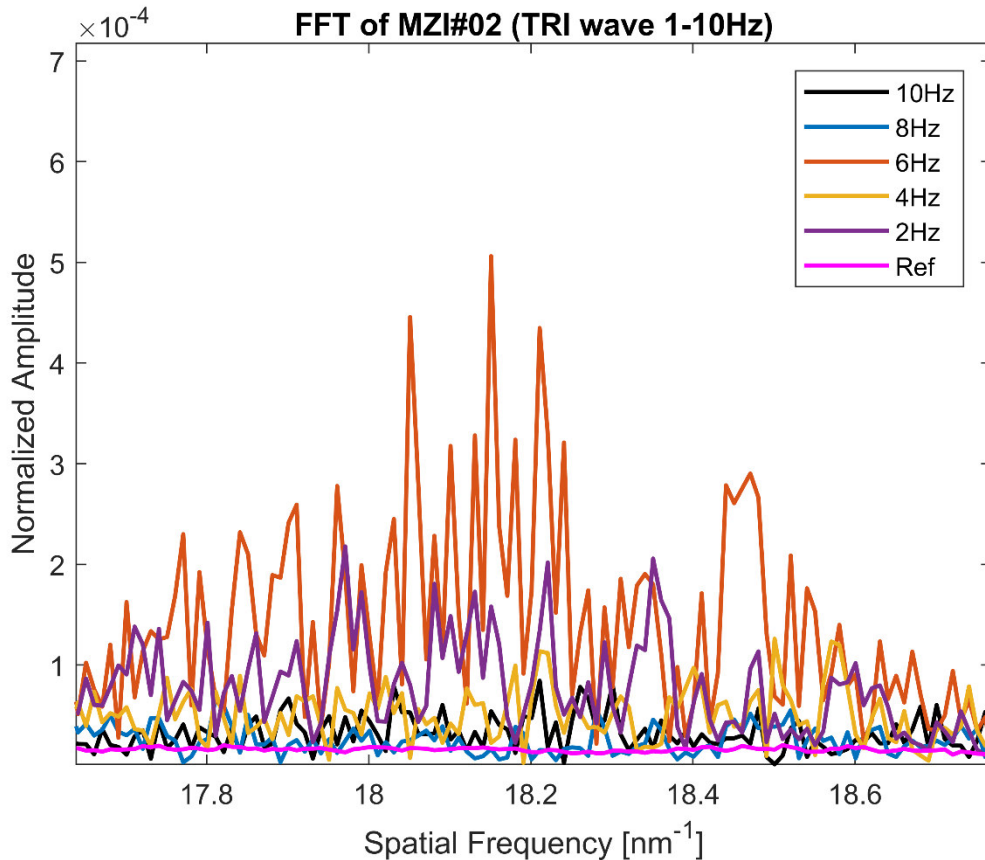


Fig 4.15.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal triangular.

Nuevamente en esta figura es notorio que los modos débiles del revestimiento reaccionan de manera distinta a las frecuencias, aunque también reaccionan diferente por el tipo de onda, ahora si se compara con el caso de la señal cuadrada, esto ya que están en un rango similar. Se tiene que los modos débiles de mayor amplitud son los de la frecuencia de 10Hz mientras que para este caso se tiene que los de mayor amplitud son los de 6Hz. Demostrando una vez más que el tipo de onda es algo a considerar.

Consecuentemente se pensaría que el tipo de onda no influye, no obstante, los modos débiles del revestimiento dicen lo contrario, aunque estos no contribuyan de una forma tan considerable como los modos dominantes del revestimiento, estos muestran la modulación vista a lo largo de los espectros del MZI.

Siguiente y último caso para las frecuencias bajas, se trata de emplear una señal del tipo diente de sierra para inducir vibraciones al MZI, los espectros son mostrados a continuación en la figura 4.16.

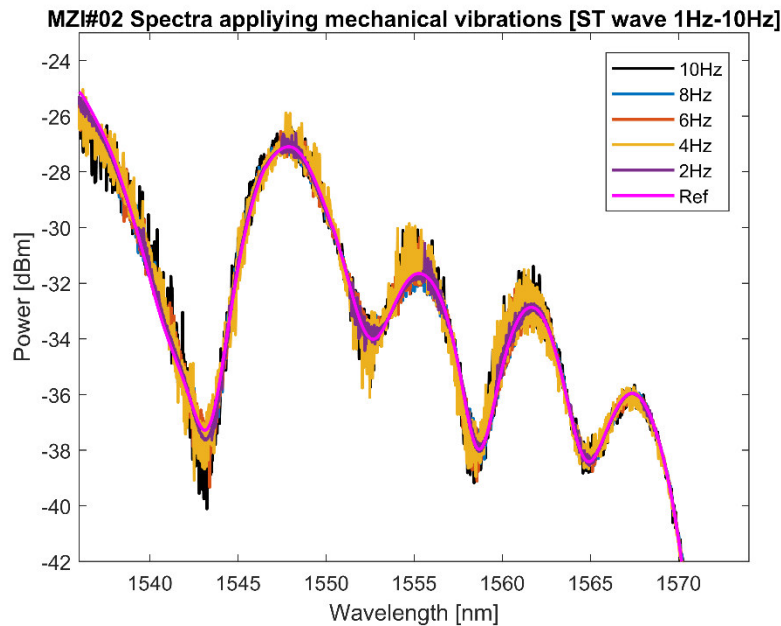


Fig 4.16.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal diente de sierra de 1 a 10Hz.

Este caso en particular la modulación es bastante notoria en comparación a los tres casos anteriores, incluso más que con la señal cuadrada en este rango de frecuencias, siendo que la amplitud de la modulación de 4Hz y 10Hz son las más notorias en los rangos de longitud de onda de 1540nm a 1545nm y 1550nm a 1565nm.

En contraste con los casos ya descritos, se tiene que sí bien son las mismas regiones de longitud de onda en la mayoría que se ven afectadas por este fenómeno, las vibraciones son mayores en amplitud como puede notarse en las modulaciones ya vistas en la figura 4.16.

Como es costumbre se debe de aplicar la FFT para observar los modos dominantes y los modos débiles del revestimiento. Ya que son de gran importancia para el fenómeno de las vibraciones, ahora sobre todo los modos débiles. Los modos dominantes se muestran en las figuras 4.17 y 4.18.

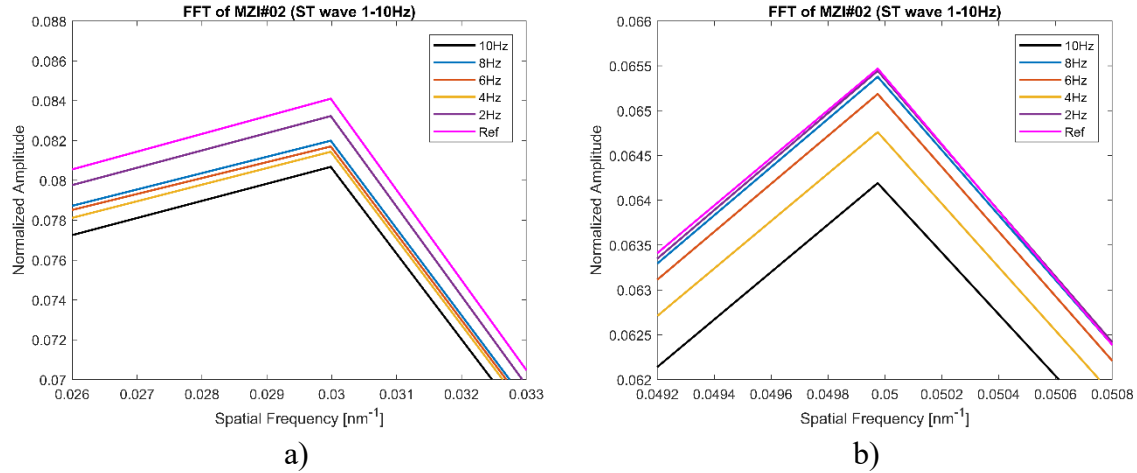


Fig 4.17.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03 nm^{-1} y 0.05 nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra.

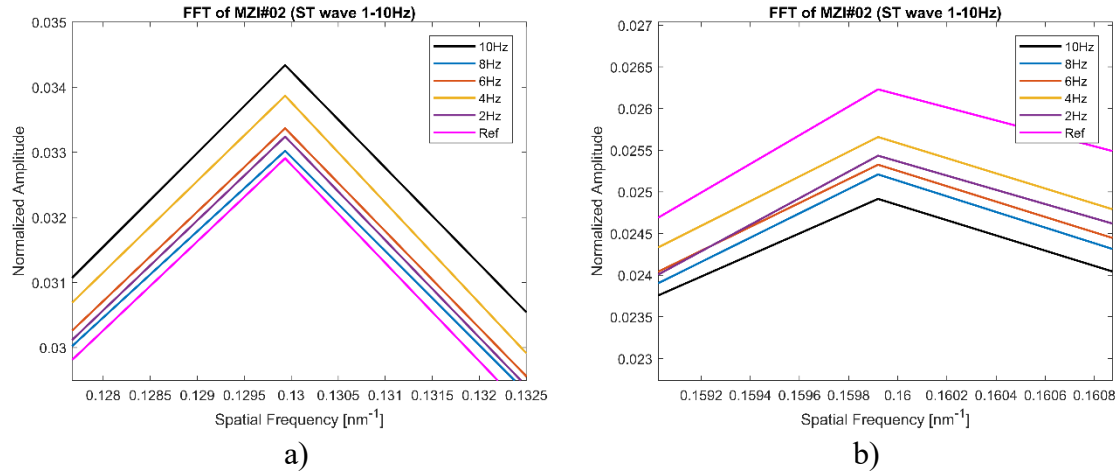


Fig 4.18.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13 nm^{-1} y 0.15 nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra.

Para los modos dominantes se aprecian diversos cambios de amplitud para las figuras 4.17 y 4.18, para el caso de la figura 4.17b se tiene que la referencia y la frecuencia de 2Hz son bastante similares, pero se tiene un ligero cambio de amplitud. Para el caso de la figura 4.18b se tiene un cambio ligero en la fase del modo dominante en 0.15 nm^{-1} .

A continuación, se presentan los modos débiles del revestimiento, tomando el rango de frecuencias espacial de 11.6 nm^{-1} a 13 nm^{-1} . Esto es mostrado en la figura 4.19.

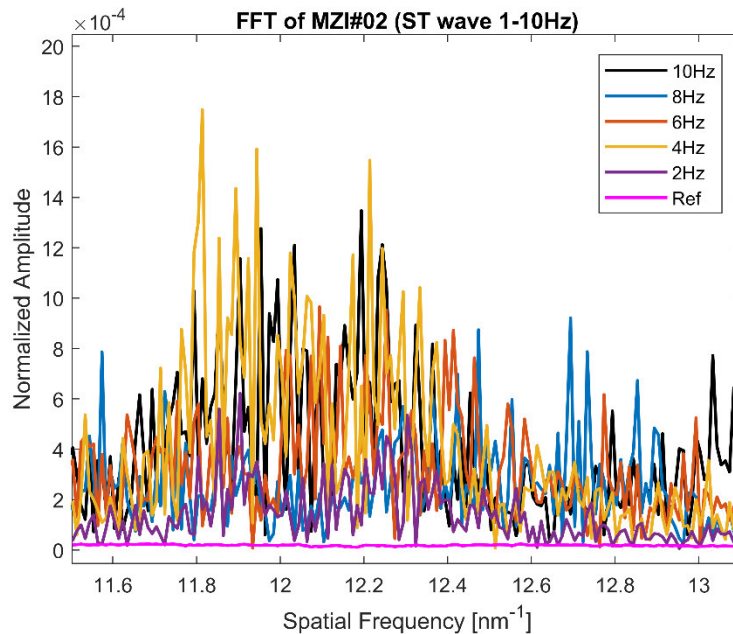


Fig 4.19.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra.

Como se puede apreciar en la figura 4.19, existe una gran cantidad de modos débiles con amplitudes superiores a sus predecesores, por ejemplo, la frecuencia aplicada a la plataforma de 4Hz es sumamente amplia en este rango de frecuencias espaciales, junto con la frecuencia de 6Hz, 8Hz y 10Hz, siendo la más pequeña la de 2Hz.

Esto confirma que la modulación exagerada vista previamente en la figura 4.16, es producto de los modos débiles ya que la vibración parece excitarlos, a su vez se demuestra que el MZI puede captar frecuencias bajas de los distintos tipos de señales ejercidos por la plataforma vibratoria, lo cual ya es una ganancia enorme para este trabajo.

4.2.- Pruebas sobre el MZI #02 en el rango de 10Hz a 100Hz con incrementos de 10Hz.

Pasando a la segunda parte de este capítulo, se toma en cuenta un rango de frecuencias relativamente altas, ya que se obtuvieron resultados satisfactorios con el rango de frecuencias bajas, la pregunta ahora es ¿cómo afectan rangos de frecuencias más altas al MZI? Esta pregunta es respondida en esta sección ya que se harán las mismas pruebas que la sección anterior, con la diferencia que ahora se emplean frecuencias mayores. Cabe recalcar que las gráficas de las figuras vistas en esta sección para que sean comprendidas de la mejor manera solamente se mostrarán las frecuencias de 20Hz, 50Hz y de 100Hz, además de la referencia. Esto se debe a que son las frecuencias que se logran apreciar mejor en comparación a las demás.

Como primer caso se tiene la aplicación de una señal senoidal sobre la plataforma vibratoria, como ya es sabido, se induce esta señal en un rango de 10Hz a 100Hz con incrementos de 10Hz, los espectros del MZI son mostrados en la figura 4.20.

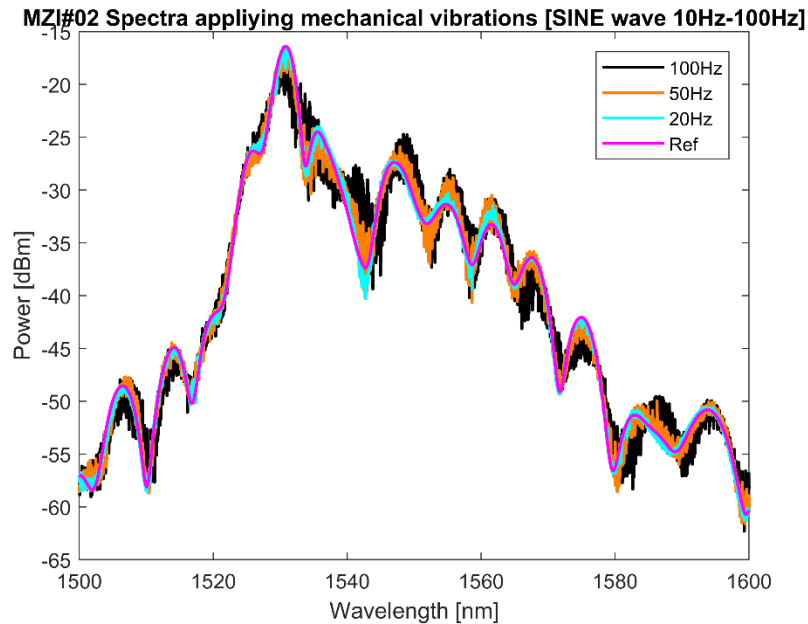


Fig 4.20.- Espectros de interferencia del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal senoidal de 10 a 100Hz.

En primera instancia puede apreciarse que la modulación es bastante amplia en comparación con los casos vistos en la sección anterior, sobre todo si se compara con la figura 4.1, recordando que no se observaba a primera vista la modulación causada por las vibraciones, a menos que se le hiciera un acercamiento a los espectros, en cambio ahora la señal senoidal a frecuencias altas (en comparación con el rango de la sección previa) muestra a simple vista la modulación, ahora bien en la figura 4.21 se muestra un acercamiento a la zona de 1540nm a 1570nm de los espectros anteriormente vistos en la figura 4.20.

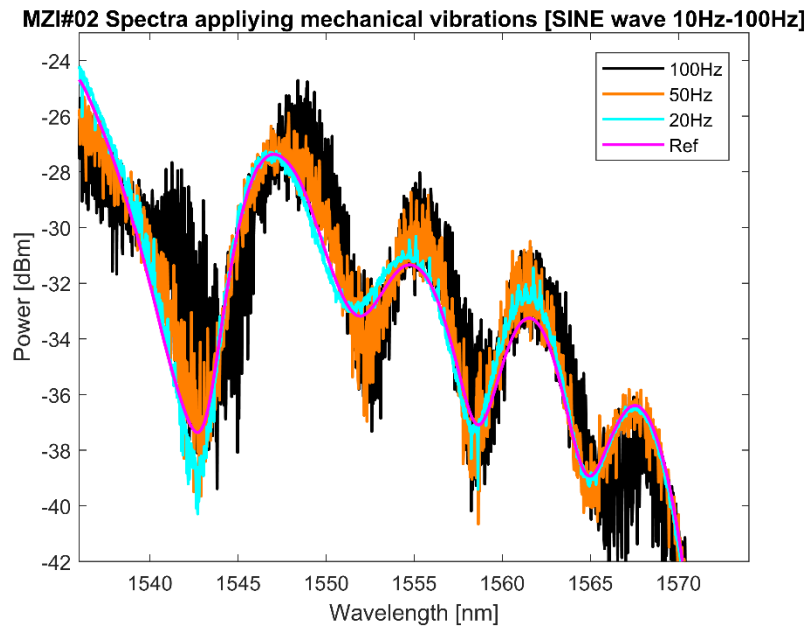


Fig 4.21.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal senoidal de 10 a 100Hz.

En la figura 4.21 además de apreciar la modulación con mayor amplitud, se puede apreciar que los espectros de las frecuencias de 20Hz, 50Hz y 100Hz tienen cambios en la amplitud y ligeros cambios en la fase, por lo menos el de 100Hz muestra un cambio considerable si se observa la zona de 1540nm a 1545nm.

Como ya es costumbre desde la sección previa, se aplica la FFT para observar los modos dominantes del revestimiento y los modos débiles del revestimiento, siendo útiles los primeros para corroborar que en efecto la amplitud está cambiando.

Principalmente se muestran en la figura 4.22 la FFT dentro del rango de 0nm^{-1} a 0.25nm^{-1} de frecuencias espaciales, esto para observar cómo es realmente la FFT en ese rango, recordando que en los casos de las secciones previas no se observaban cambios a simple vista, a menos de que se le hiciera un acercamiento a cada uno de los modos.

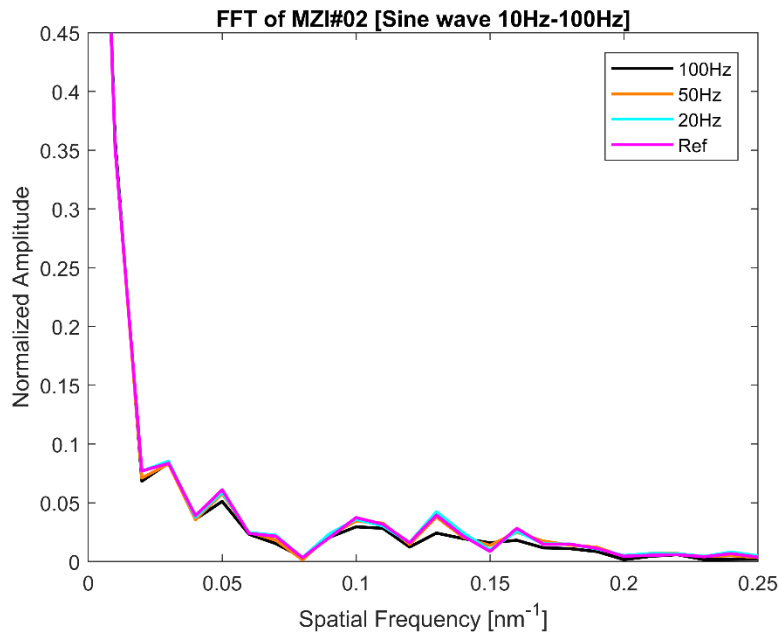


Fig 4.22.- Zona de los modos dominantes del revestimiento del MZI #02 cuando se le inducen vibraciones por medio de una señal senoidal en el rango de 10 a 100Hz.

Nótese que a simple vista si hay cambios en amplitud para los modos dominantes, con excepción de la frecuencia inducida de 50Hz, por lo que se procede a realizar un acercamiento a cada uno de los modos al igual que en la sección anterior. Los acercamientos a los modos dominantes se muestran en las figuras 4.23 y 4.24.

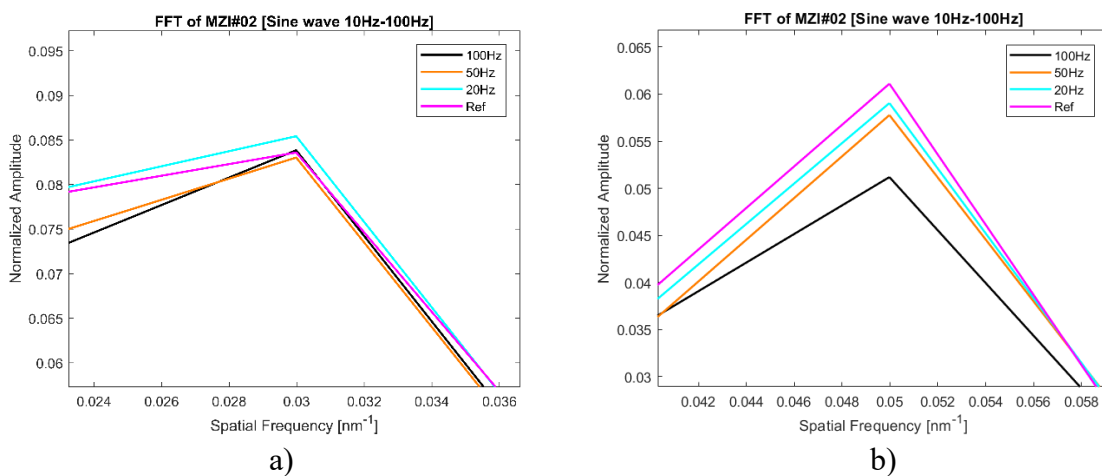


Fig 4.23.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal (10Hz-100Hz).

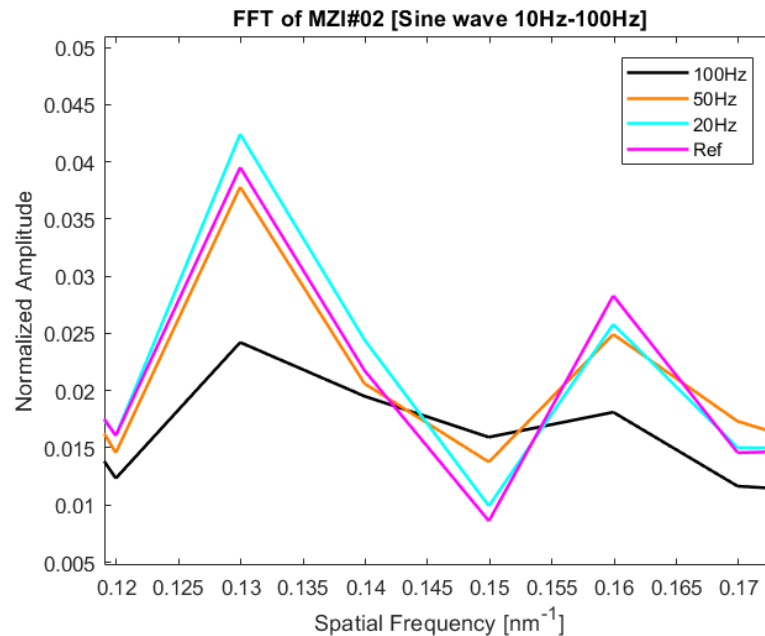


Fig 4.24.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.16nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal (10Hz a 100Hz).

Como puede apreciarse en las figuras 4.23 y 4.24, los modos dominantes tienen cambios en la amplitud, algunos más significativos que otros, cómo el caso de la figura 4.23b, el modo de 0.05nm^{-1} parece tener un comportamiento lineal en cuanto a las amplitudes al igual que el modo de 0.16nm^{-1} con la diferencia que este último tiene cambios ligeros en la fase.

Ahora es cuando llega la intriga más grande, si la modulación es con creces superior en esta sección que en la pasada ¿existe la posibilidad de que los modos débiles tengan un comportamiento aún más considerable? Eso está por verse en la figura 4.25, dado que es costumbre igualmente se tomará en cuenta la zona de los modos débiles, con el fin de observar su contribución en los espectros, a su vez conocer que tan amplios son, con lo visto en la figura 4.21 se espera que tengan amplitudes considerablemente superiores que en la sección pasada.

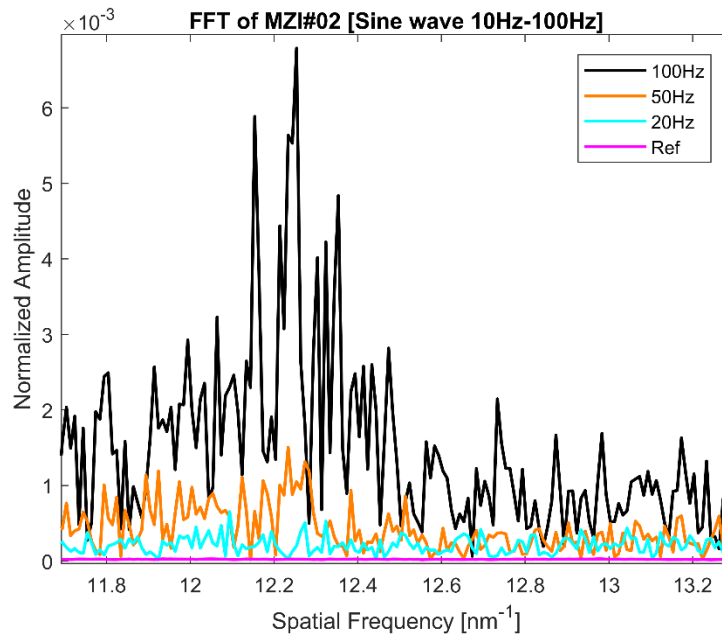


Fig 4.25.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal senoidal (10Hz a 100Hz).

Como puede apreciarse en la figura 4.25, la amplitud mayor se la lleva la frecuencia de 100Hz, esta es de aproximadamente 8×10^{-3} , que si se le compara con la de la figura 4.7 de la sección pasada, la frecuencia de mayor amplitud fue de 10Hz con un valor aproximado de 2×10^{-4} , aunque no haya sido exactamente en el mismo rango, se hace notar que realmente los modos débiles tienen una mayor contribución en amplitud que en la sección pasada.

Con creces se puede llegar a esperar exactamente lo mismo en las siguientes señales, a continuación, al igual que en la sección previa se va a seguir el mismo orden, por ello la siguiente señal es la cuadrada. Los espectros del MZI aplicando una señal cuadrada para inducir vibraciones son mostrados en la figura 4.26.

Antes de proseguir a mostrar la figura, se hace la aclaración de que, de ahora en adelante para los siguientes 3 casos, las zonas de 1540nm a 1570nm.

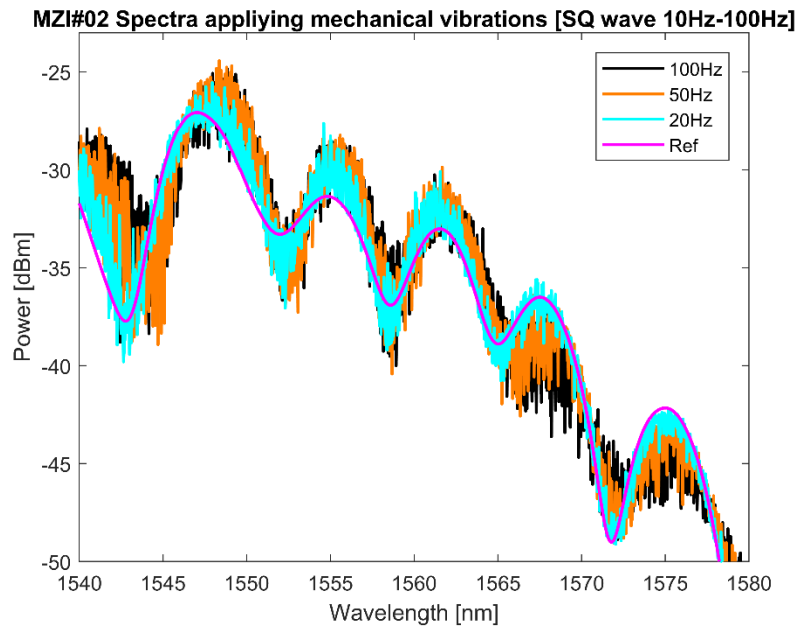


Fig 4.26.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal cuadrada de 10 a 100Hz.

Es increíble cómo el comportamiento de la señal cuadrada logra aún más inducir la modulación sobre los espectros del MZI, es importante observar que se muestran cambios en los espectros, por ejemplo, en la cresta de 1545nm a 1550nm se logra apreciar un cambio de fase, además de cambios en la amplitud, igual que en la atenuación de 1540nm a 1545nm.

Nuevamente esta modulación tan abrupta es causada por la señal cuadrada y sus cambios tan abruptos, aunque hay algo más, eso se debe a los armónicos de la señal [6, 7].

Lo siguiente para este caso es analizar la contribución de los modos dominantes del revestimiento y los modos débiles del mismo, al igual que en la sección pasada únicamente se mostrarán los modos dominantes, solamente para darle énfasis a los modos cómo tal. Los modos dominantes del revestimiento para este caso son mostrados en las figuras 4.27 y 4.28.

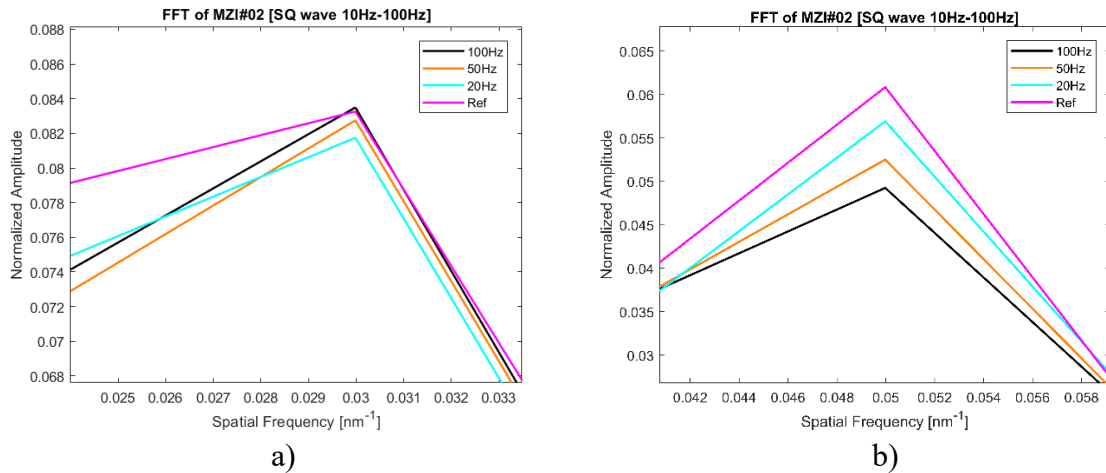


Fig 4.27.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03 nm^{-1} y 0.05 nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada (10Hz-100Hz).

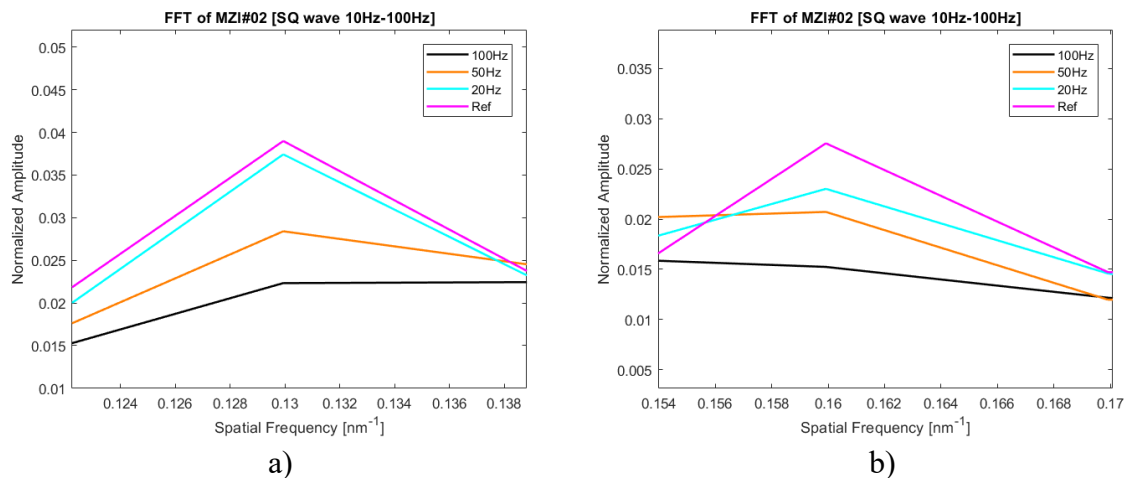


Fig 4.28.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13 nm^{-1} y 0.16 nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada (10Hz-100Hz).

Nuevamente se observa que el modo de 0.05 nm^{-1} visto en la figura 4.27b tiene un comportamiento lineal en la amplitud, al menos para esas tres frecuencias, sumado a esto en la figura 4.28b existe un ligero cambio de fase y puede apreciarse como el modo de 0.16 nm^{-1} tiende a despreciarse en la frecuencia de 100Hz. En la figura 4.28a se observa igualmente un comportamiento lineal en la amplitud de los modos, mientras que en la figura 4.27a solamente se observan cambios en la amplitud y un comportamiento no lineal.

Siendo el siguiente turno de los modos débiles, se espera que igualmente al caso de la señal senoidal de esta sección, se obtenga un comportamiento similar donde los modos débiles son aún más excitados, en la figura 4.29 se muestra la zona de los modos débiles del revestimiento del MZI.

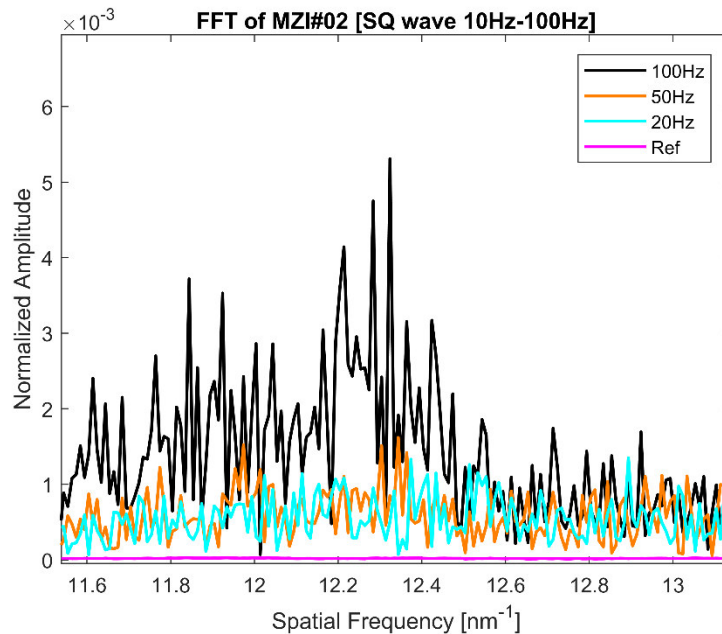


Fig 4.29.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal cuadrada (10Hz a 100Hz).

Como es de esperarse se tienen mayores amplitudes a frecuencias inducidas que son más altas, observando que su amplitud máxima al menos para el rango de frecuencias espaciales de 11.6nm^{-1} a 13.1nm^{-1} aproximadamente, dicha amplitud máxima es de aproximadamente 5.5×10^{-3} , recordando que es posible tener en otros modos débiles o rangos de frecuencias espaciales pueden existir amplitudes aún mayores o menores a este valor.

Comparando la figura 4.25 con la 4.29, hay una mayor amplitud en los modos débiles empleando una señal senoidal, no obstante, hay que recordar que existe la posibilidad de que sí se cambia el rango de frecuencias espaciales, habrá modos débiles con una amplitud superior para ambos casos.

Pasando al siguiente caso, ahora se tiene una señal del tipo triangular, se espera que tenga un comportamiento similar al caso anterior, para ello, los espectros del MZI son mostrados en la figura 4.30

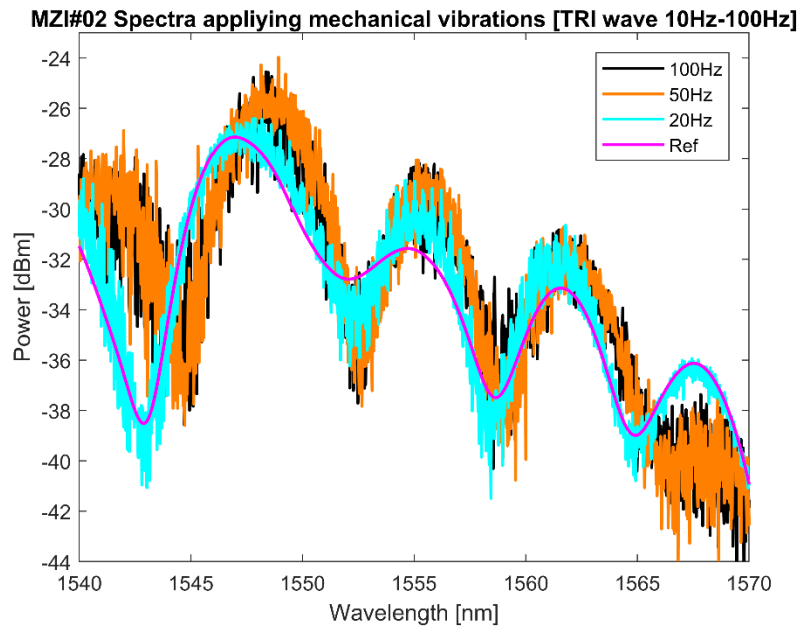


Fig 4.30.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal triangular de 10 a 100Hz.

Al apreciar la figura 4.30 se logra apreciar que la atenuación ubicada entre 1540nm a 1545nm tiene cambios de fase notorios, sumado a los cambios en amplitud, a su vez la cresta centrada entre 1550nm a 1555nm tiene una mayor amplitud cuando se le aplican vibraciones, tampoco hay que olvidar que a lo largo de todo el espectro la modulación está presente y es sumamente notoria.

De cierta manera no se puede comparar con los casos anteriores, no obstante, es posible comparar con los casos de la sección anterior, especialmente donde se emplea la misma señal, ya que ciertamente la modulación es aún más amplia que cuando se le aplicó una frecuencia de 1Hz a 10Hz que con este nuevo rango.

Lo siguiente es analizar cómo están contribuyendo los modos dominantes, para ello se muestran en las figuras 4.31 y 4.32.

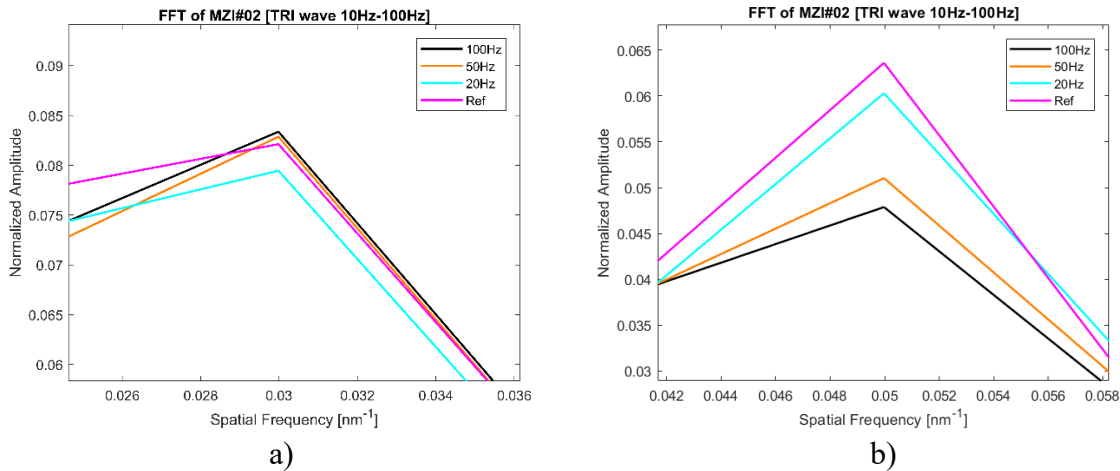


Fig 4.31.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03 nm^{-1} y 0.05 nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal triangular (10Hz-100Hz).

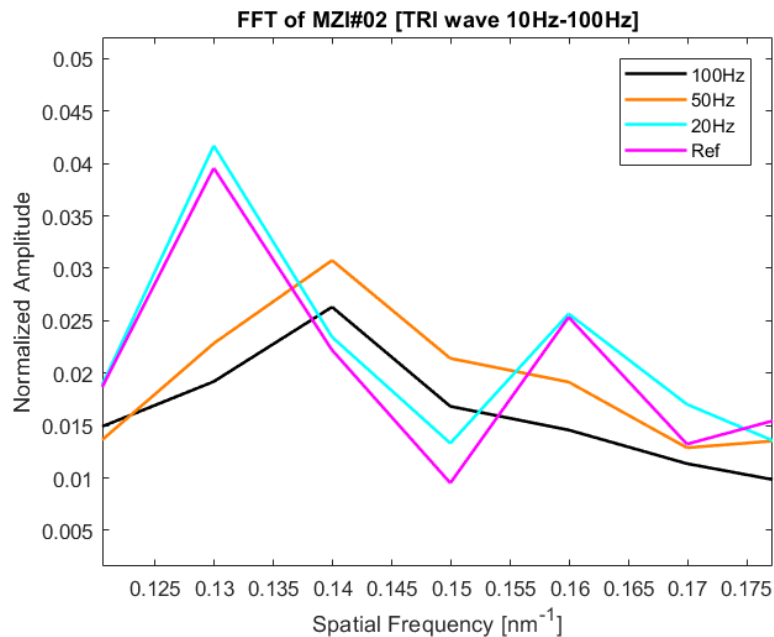


Fig 4.32.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13 nm^{-1} y 0.16 nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal triangular (10Hz-100Hz).

Como puede apreciarse en la figura 4.31b el modo en 0.05 nm^{-1} sigue teniendo un comportamiento lineal al menos para esas tres frecuencias mostradas, siendo que esto no ocurre en la figura 4.31a, ya que, si bien muestra cambios en la amplitud, no hay un comportamiento lineal. Donde más destaca la figura 4.32 es en el desfase sumamente notorio del modo ubicado en 0.13 nm^{-1} , pasando ahora a 0.14 nm^{-1} para las frecuencias de 50Hz y 100Hz, añadiendo que también el modo de 0.16 nm^{-1} tiende a desaparecer para la frecuencia de 100Hz, se observa como este comienza a atenuarse bastante, en esta ocasión no tiene un comportamiento lineal como en los dos casos anteriores de esta sección.

Tomando en cuenta esto es necesario observar la contribución de los modos débiles del revestimiento, siendo que estos son presentados en la figura 4.33.

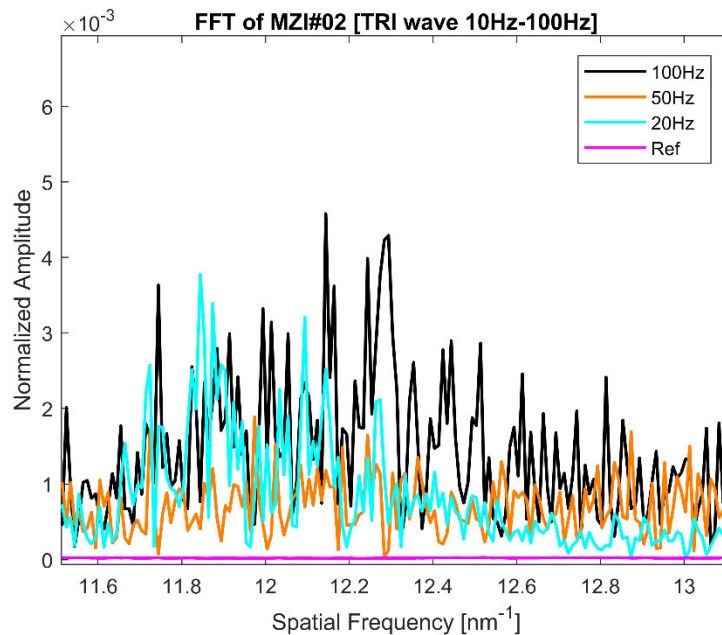


Fig 4.33.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal triangular (10Hz a 100Hz).

Con base a los resultados mostrados en la figura 4.33 se puede apreciar que la frecuencia de 20Hz para el rango de frecuencias espaciales de 11.6nm^{-1} a 13.1nm^{-1} tiene una amplitud considerable, esto no se observó como en los casos anteriores de esta sección, siendo que para la señal senoidal y la señal cuadrada específicamente la frecuencia de 20Hz tuvo una contribución poco considerable en comparación a la de la señal triangular. En cuanto a la frecuencia de 100Hz tuvo una amplitud máxima para ese rango de frecuencias espaciales de aproximadamente 5×10^{-3} , indicando que la frecuencia de 100Hz tiende a excitar más los modos débiles, no obstante, se hace hincapié que el tipo de señal importa, esto ya se ha visto, tanto en esta sección como en la anterior.

Para el último caso de esta sección se tiene la aplicación de una señal diente de sierra para inducir vibraciones sobre el MZI. Siendo que los espectros son mostrados en la figura 4.34 a continuación.

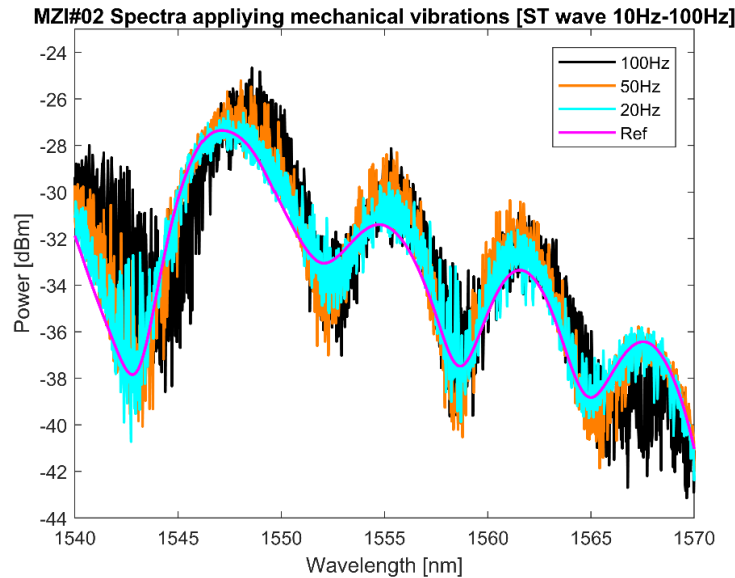


Fig 4.34.- Acercamiento en la zona de 1540nm a 1570nm del MZI #02 induciendo vibraciones mecánicas por medio de una señal diente de sierra de 10 a 100Hz.

En la figura 4.34 se muestra a simple vista la modulación causada por las vibraciones, sumado a esto se tienen cambios en la amplitud de los espectros así también como su fase. Donde el cambio de fase es más notorio en la cresta ubicada entre 1545nm y 1550nm, a su vez hay otro cambio de fase en la atenuación centrada entre 1540nm y 1545nm.

Ahora siendo una costumbre, nuevamente se aplica la FFT a estos espectros con el fin de observar los modos dominantes y los modos débiles del revestimiento, empezando con los modos dominantes, estos son presentados en las figuras 4.35 y 4.36.

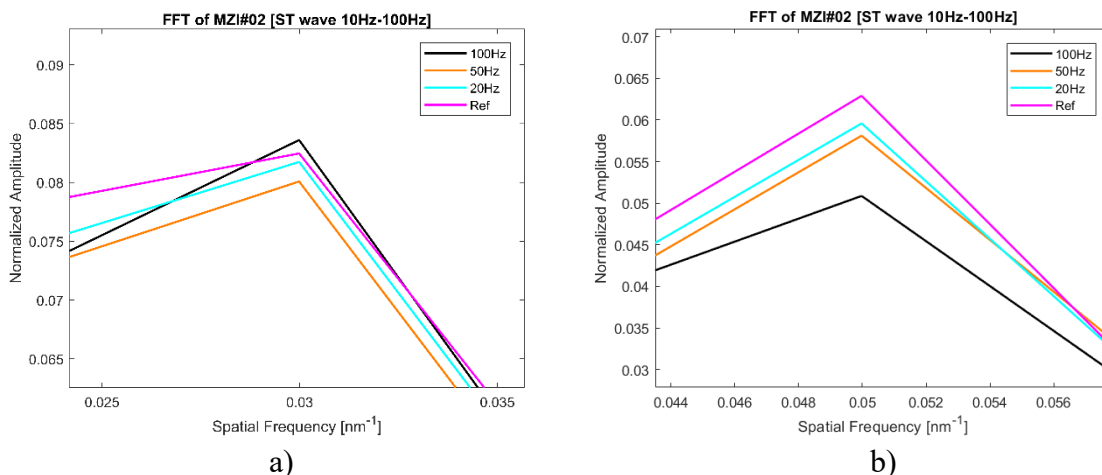


Fig 4.35.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.03nm^{-1} y 0.05nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra (10Hz-100Hz).

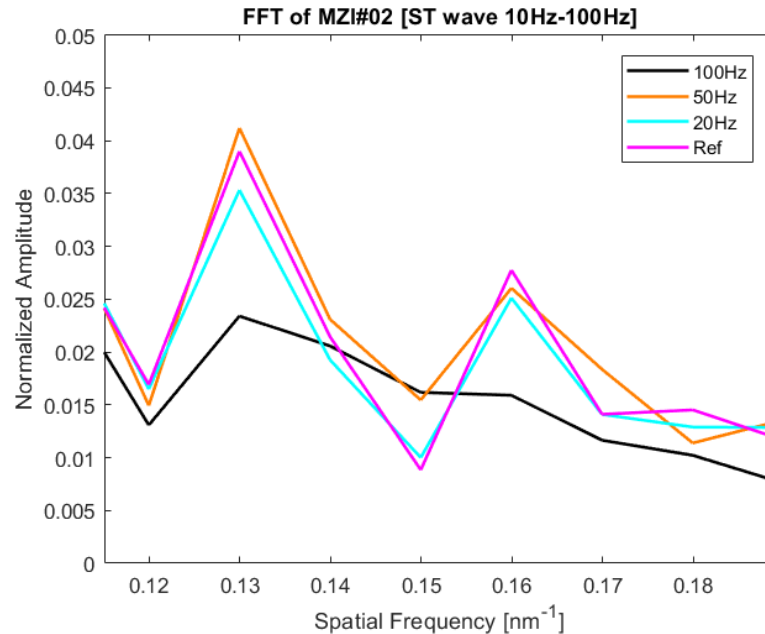


Fig 4.36.- Modos dominantes del revestimiento ubicados en 0.13nm^{-1} y 0.16nm^{-1} al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra(10Hz-100Hz).

Comenzando por la figura 4.35a se tiene que en efecto hay cambios en la amplitud, teniendo un comportamiento relativamente lineal para las tres frecuencias mostradas en la figura, en cuanto a la figura 4.35b se observan cambios en la amplitud y a su vez un comportamiento lineal al igual que los casos anteriores de esta sección, al menos para las frecuencias mostradas. Por último, se tiene la figura 4.36, en esta se aprecian cambios de amplitud y ligeros cambios en la fase, por lo menos para la frecuencia de 100Hz. En cuanto a los modos débiles del revestimiento, se pueden apreciar en la figura 4.37.

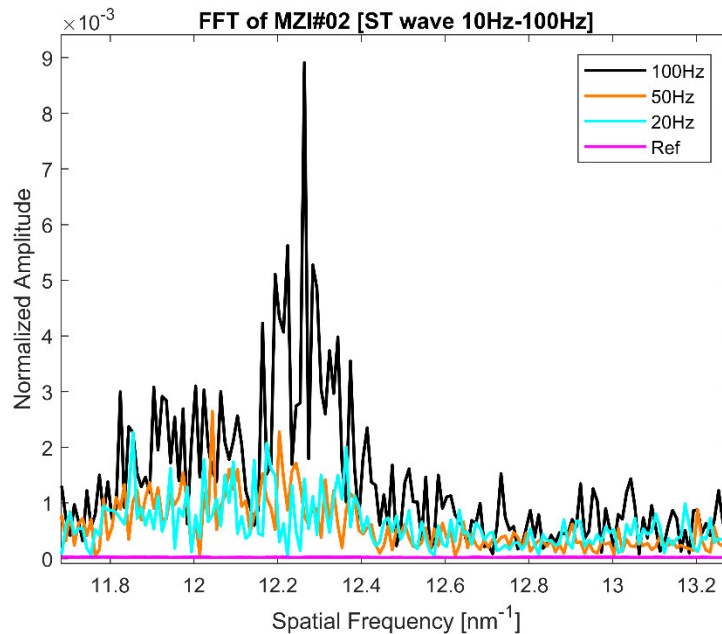


Fig 4.37.- Modos débiles del revestimiento al inducir vibraciones por medio de una señal diente de sierra (10Hz a 100Hz).

Para este último caso, los modos débiles mostrados en la figura 4.37 tienden a tener una respuesta aún mayor en amplitud que los casos previos, siendo este último el de mayor amplitud para la frecuencia de 100Hz, teniendo una amplitud máxima de aproximadamente 9×10^{-3} , en comparación con los demás casos se aprecia que empleando una señal del tipo diente de sierra se puede excitar de mejor manera los modos débiles del revestimiento.

4.3.- Pruebas en tiempo sobre la herramienta de maquinado.

Empleando un fotodetector DET400FC se puede obtener la respuesta temporal del MZI, con esto se puede tratar de obtener una medición ya cuantificada de vibración en base a la señal eléctrica entregada por el DET400FC, para ello esta prueba está descrita en el capítulo anterior de metodología. A continuación, en la figura 4.38 se muestra la respuesta temporal del MZI.

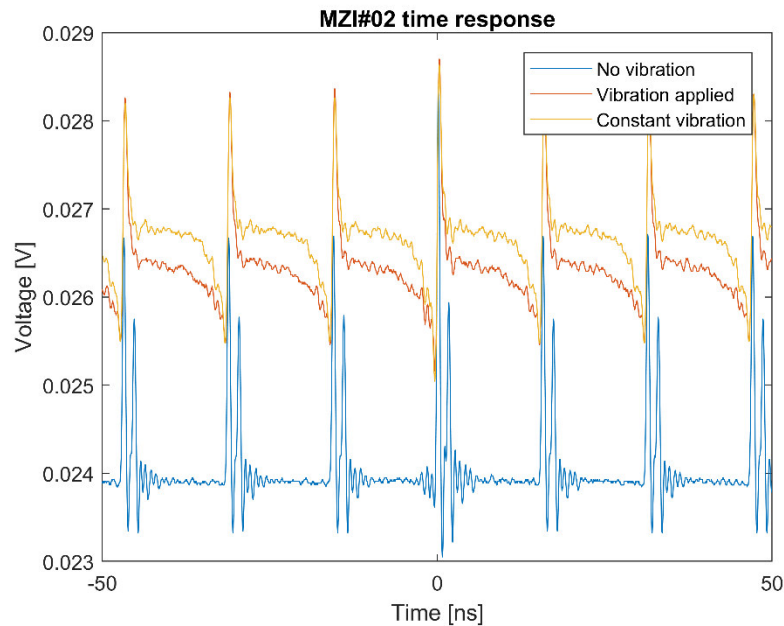


Fig 4.38.- Respuesta en tiempo del MZI #02 sin vibración y cuando se le aplica vibración.

En esta figura se puede apreciar el trazo azul que indica la respuesta temporal del MZI sin aplicar vibraciones sobre la herramienta/MZI, lo que principalmente se puede observar es un comportamiento periódico, al igual que el resto de los trazos, en cuanto al trazo rojo se obtiene al aplicar vibraciones sobre la herramienta, a simple vista se observa que la forma de la señal cambia considerablemente, además de aumentar la amplitud, para el trazo amarillo se obtiene al aplicar vibraciones más rápido por ello en la figura dice “constant vibrations”.

Estos resultados por sí solos no representan mucho, por ello se requiere la vieja confiable FFT, esto para ver si es posible observar las vibraciones mecánicas sobre la herramienta. Para ello se muestra en la figura 4.39 la FFT de los tres trazos vistos en la figura 4.38, esto con el fin de realizar una comparación entre ellos.

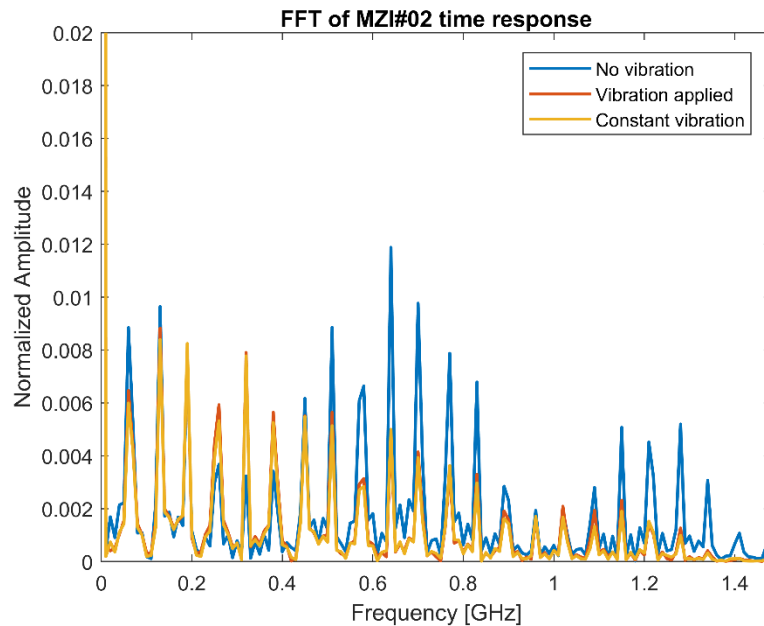


Fig 4.39.- FFT de las respuestas en tiempo del MZI #02.

primer vistazo no se puede definir cómo tal que se encuentre la frecuencia mecánica dentro de ese rango de frecuencias mostrado en la figura 4.39, esto ya que la frecuencia mecánica se encuentra en un rango bajo de entre 10Hz a 100Hz, algo a destacar es la respuesta del MZI sin vibraciones y cómo algunas componentes de frecuencia dentro de este se vean afectadas reduciendo o aumentando la amplitud, por lo que lo ideal para este caso sería tomar de referencia una de las componentes de frecuencia para realizar una tabla de equivalencias, por ejemplo tomar el pico de 0.1GHz y tener el trazo azul de referencia (0Hz de frecuencia mecánica), después observar el comportamiento de este aplicando diferentes frecuencias mecánicas.

4.4.- Discusión.

Cómo se observó a lo largo del capítulo, se lograron resultados satisfactorios del lado espectral o del lado de la longitud de onda, esto ya que se demuestra que en efecto el MZI logra captar las vibraciones haciendo que sean medibles de manera cualitativa, empleando una caracterización en base a los modos débiles del revestimiento, ya que estos últimos son los que se ven afectados por la vibración inducida en el MZI, en base a diversos trabajos se encontró nula información o resultados dónde empleen un análisis por la parte espectral, esto suponiendo el hecho de que los OSA son lentos y la vibración hace que cambié drásticamente el OPL del MZI, por lo que muchos trabajos optan por una respuesta temporal.

Añadiendo también que el MZI no solo logra captar frecuencias altas, sino también frecuencias bajas, lo cual demuestra que es un dispositivo viable para varios rangos de

frecuencia, ahora comparando un poco, muchos trabajos optan por utilizar arreglos experimentales relativamente complejos [9-17, 20, 21], añadiendo que emplean componentes costosos como circuladores, láseres sintonizables, tipos de fibra costosos, etc. en cambio el arreglo experimental de esta tesis para la detección de vibraciones es con creces más económico y simple, se encontraron trabajos donde emplean rejillas de periodo largo [18], rejillas de Bragg [19] y dispositivos con diseños complejos [13, 15, 21], algunos de estos trabajos se asemejan ya que emplean también bocinas para inducir vibraciones [20].

Por el lado temporal, si bien la respuesta no fue satisfactoria es necesario emplear diversas estrategias, una de ellas ya fue descrita al final de la sección 4.3, otra de ellas es emplear un rango de tiempo mayor ya que el hecho de tener 100ns sea un problema y por ello no se aprecian las frecuencias de las vibraciones mecánicas.

Otro aspecto a recalcar es que este sensor puede tener la aplicación de un AOM, esto se vio al principio del capítulo, lo que abre las puertas para el estudio del efecto acústico-óptico en dispositivos de transmisión como lo es un MZI. Además, ya existen casos de MZI empleados como AOM [22-25].

4.5.- Trabajo a futuro.

En forma de lista se presentan algunos procedimientos para mejorar el trabajo propuesto.

- Amplificar la señal del fotodetector DET400FC.
- Aumentar la frecuencia de muestreo del osciloscopio.
- Recubrir el MZI con polímeros para aumentar su resistencia mecánica.
- Diseñar un sistema de adquisición.

Referencias del capítulo.

- [1] M. Bello-Jiménez, C. Cuadrado-Laborde, A. Díez, J. L., and M. V., “Modulador acusto-óptico en amplitud de fibra óptica basado en ondas acústicas de flexión”, *Rev. Mex. Fis.*, vol. 60, no. 4 Jul-Aug, pp. 269–275, Jan. 2014.
- [2] B. Y. Kim, H. E. Engan, H. J. Shaw, and J. N. Blake, “All-fiber acousto-optic frequency shifter,” *Opt Lett*, vol. 11, no. 6, p. 389, Jun. 1986, doi: 10.1364/OL.11.000389.
- [3] D. Östling and H. E. Engan, “Acousto-optic Tunable Filters in Two-Mode Fibers,” *Optical Fiber Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 177–183, Apr. 1997, doi: 10.1006/ofte.1997.0211.
- [4] T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. O. Culverhouse, “The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 11, pp. 2519–2529, 1996, doi: 10.1109/50.548150.

- [5] Y.-X. Xiao, J. Wang, Y.-F. Hou, L.-H. Zhang, and S.-S. Wang, "Mode analysis of in-line Mach-Zehnder interferometer with offset splicing," *Optical Fiber Technology*, vol. 62, p. 102473, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.yofte.2021.102473.
- [6] G. J. Sebesta and R. W. Carlisle, "Perception of Square-Wave and Sinusoidal-Wave Response from Direct-Radiator Subminiature Loudspeaker," *J Acoust Soc Am*, vol. 47, no. 1A_Supplement, pp. 80–80, Jan. 1970, doi: 10.1121/1.1974733.
- [7] R. Liechti *et al.*, "Total Harmonic Distortion of a Piezoelectric MEMS Loudspeaker in an IEC 60318-4 Coupler Estimation Using Static Measurements and a Nonlinear State Space Model," *Micromachines (Basel)*, vol. 12, no. 12, p. 1437, Nov. 2021, doi: 10.3390/mi12121437.
- [8] T. S. Hsu and K. A. Poornima, "Loudspeaker failure modes and error correction techniques," *Applied Acoustics*, vol. 62, no. 6, pp. 717–734, Jun. 2001, doi: 10.1016/S0003-682X(00)00064-5.
- [9] O. T. Kamenev, Y. N. Kulchin, Y. S. Petrov, R. V. Khiznyak, and R. V. Romashko, "Fiber-optic seismometer on the basis of Mach-Zehnder interferometer," *Sens Actuators A Phys*, vol. 244, pp. 133–137, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.sna.2016.04.006.
- [10] R. Wonko, J. E. Moś, K. A. Stasiewicz, and L. R. Jaroszewicz, "Improved vibration sensor based on a biconical tapered singlemode fiber, using in-fiber Mach-Zehnder interferometer," F. Baldini, J. Homola, and R. A. Lieberman, Eds., May 2017, p. 1023123. doi: 10.1117/12.2265858.
- [11] Y. Liu, F. Wang, Y. Peng, K. Yu, and Y. Liu, "Optical Fiber Vibration Sensor With Wide Detection Range Based on STDS Structure Designed by Mach-Zehnder Interferometer," *IEEE Sens J*, vol. 23, no. 22, pp. 27351–27360, Nov. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3321040.
- [12] N.-K. Chen, Y.-H. Hsieh, and Y.-K. Lee, "Tapered fiber Mach-Zehnder interferometers for vibration and elasticity sensing applications," *Opt Express*, vol. 21, no. 9, p. 11209, May 2013, doi: 10.1364/OE.21.011209.
- [13] Y. Xu *et al.*, "Vibration sensing using a tapered bend-insensitive fiber based Mach-Zehnder interferometer," *Opt Express*, vol. 21, no. 3, p. 3031, Feb. 2013, doi: 10.1364/OE.21.003031.
- [14] C. Ma *et al.*, "Long-Range Distributed Fiber Vibration Sensor Using an Asymmetric Dual Mach-Zehnder Interferometers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 9, pp. 2235–2239, May 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2532877.
- [15] Z. Zhao, L. Shen, Y. Dang, C. Lu, and M. Tang, "Enabling long range distributed vibration sensing using multicore fiber interferometers," *Opt Lett*, vol. 46, no. 15, p. 3685, Aug. 2021, doi: 10.1364/OL.425843.

-
- [16] A. Nakamura, T. Manabe, K. Morikane, and Y. Koshikiya, "Inter-Modal Interferometry Using Two-Mode Region of Single-Mode Fibers for Vibration Sensing," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 42, no. 18, pp. 6431–6436, Sep. 2024, doi: 10.1109/JLT.2024.3387392.
- [17] A. Nakamura, T. Manabe, and Y. Koshikiya, "Vibration Sensing Based on Inter-Modal Interference Using Two-Mode Region of Conventional Single-Mode Fibers," in *27th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2022, p. Th4.28. doi: 10.1364/OFS.2022.Th4.28.
- [18] S. Tanaka, H. Somatomo, A. Wada, and N. Takahashi, "Fiber-Optic Mechanical Vibration Sensor Using Long-Period Fiber Grating," *Jpn J Appl Phys*, vol. 48, no. 7, p. 07GE05, Jul. 2009, doi: 10.1143/JJAP.48.07GE05.
- [19] J. Chang *et al.*, "Fiber-optic vibration sensor system," *Laser Phys*, vol. 18, no. 7, pp. 911–913, Jul. 2008, doi: 10.1134/S1054660X08070165.
- [20] A. T. Kurzych and L. R. Jaroszewicz, "Vibration sensing with the optical fibre Mach-Zehnder interferometer," *Opto-Electronics Review*, Jan. 2023, doi: 10.24425/opelre.2023.148992.
- [21] Y. Zhao, F. Xia, M. Chen, and R. Lv, "Optical fiber low-frequency vibration sensor based on Butterfly-Shape Mach-Zehnder Interferometer," *Sens Actuators A Phys*, vol. 273, pp. 107–112, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.01.051.
- [22] R. E. da Silva *et al.*, "Widely tunable dual acousto-optic interferometric device based on a hollow core fiber," *Opt Laser Technol*, vol. 182, p. 112093, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.optlastec.2024.112093.
- [23] B. Y. Kim, H. E. Engan, H. J. Shaw, and J. N. Blake, "All-fiber acousto-optic frequency shifter," *Opt Lett*, vol. 11, no. 6, p. 389, Jun. 1986, doi: 10.1364/OL.11.000389.
- [24] D. O. Culverhouse, T. A. Birks, S. G. Farwell, J. Ward, and P. S. J. Russell, "40-MHz all-fiber acoustooptic frequency shifter," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 12, pp. 1636–1637, Dec. 1996, doi: 10.1109/68.544702.
- [25] T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. O. Culverhouse, "The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 11, pp. 2519–2529, 1996, doi: 10.1109/50.548150.