



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

Estudio y desarrollo de
interferómetros de fibra óptica
caracterizados en el dominio
temporal para aplicaciones en
sensores de vibración y acústicos

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestra en Ingeniería Eléctrica

PRESENTA:

Ing. Stephanie Guadalupe Hernández García

DIRECTORES:

Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala

Dr. Juan Carlos Hernández García

SALAMANCA, GTO

MAYO 2025

Agradecimientos

A mi madre por enseñarme a ser una mujer fuerte, a mis hermanos Hugo y Carlos, a mi cuñada Paulina por darme su apoyo en todo momento y brindarme grandes consejos. A mis sobrinos por hacer que los días de trabajo fueran más amenos y por enseñarme que la curiosidad de un niño puede darte grandes ideas en el ámbito de investigación. A Maximino por el apoyo y por los momentos que pasamos juntos. A mis tíos y primos por siempre darme ánimos. A mis amigos por acompañarme en las etapas de mi vida. A Suny por su compañía y cariño.

A los doctores y maestros que me impartieron sus conocimientos, enseñanzas y consejos. Al capítulo estudiantil “IEEE Photonics UG” por ayudarme a desarrollarme como persona.

A la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato por prestar sus instalaciones para la realización de este proyecto, así como por brindar sus recursos.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) ahora Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca nacional No. 1251089, al programa de investigadoras e investigadores México No. 6969, los proyectos CF 2023-109-G.



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

Resumen

El trabajo de tesis presenta el desarrollo de un sensor de fibra óptica basado en la configuración y principios de un interferómetro de Sagnac para la detección de vibraciones mecánicas. Utilizando pulsos de ruido dependientes de la polarización se logra desarrollar un dispositivo con múltiples regiones de operación, tanto en régimen continuo o pulsado, de este modo, se obtuvo un sistema sensor de fibra capaz de variar su sensibilidad mediante la modificación del estado de polarización de la luz de entrada.

Uno de los objetivos principales es demostrar que los pulsos de ruido son útiles en el área de sensores de fibra óptica, así mismo, se cuenta con un dispositivo capaz de ser caracterizado en el dominio del tiempo con la finalidad de reducir los costos de la elaboración del dispositivo. Dando como resultado un sistema sensible a vibraciones, desde motores hasta vibraciones acústicas, es decir, un sistema con posibles aplicaciones en la detección de fallas en motores y la implementación en el desarrollo de prototipos acusto-ópticos.

Abstract

In this thesis, we present the development of a fiber optic sensor based on the configuration and principles of a Sagnac interferometer for the detection of mechanical vibrations. Using polarization-dependent noise like pulses, a device with multiple operating regions is developed, both in continuous and pulsed operation. Thus, a fiber sensor system capable of varying its sensitivity by modifying the polarization state of the input light was obtained.

One of the main objectives is to demonstrate that noise like pulses are useful in the field of fiber optic sensors. Furthermore, the device is capable of being characterized in the time domain, thus reducing device development costs. The result is a system sensitive to vibrations ranging from motors to acoustic vibrations, that is, a system with potential applications in engine fault detection and implementation in the development of acousto-optic prototypes.

Índice

Resumen.....	2
Abstract	3
Lista de figuras	7
Lista de abreviaciones	16
<i>Capítulo 1</i>	21
Introducción	21
1.1 Antecedentes	21
1.1.1. Sensores de vibración	21
1.1.1. Aplicaciones de sensores acústicos	23
1.2 Justificación	23
1.3 Objetivo	24
1.4 Objetivos específicos	24
1.5 Descripción de la tesis	25
1.6 REFERENCIAS	26
<i>Capítulo 2</i>	28
Marco teórico.....	28
2.1 Fibras ópticas	28
2.2.1. Atenuación	32
2.2.2. Dispersión	32
2.2 Interferencia	33
2.4 Tipos de interferómetros	34
2.5 Interferómetro de Sagnac	36
2.6 NOLM 39	
2.7 Matrices de Jones	40
2.4 La transformada rápida de Fourier (FFT)	43

2.7 Pulsos de ruido.....	45
2.10 REFERENCIAS.....	48
<i>Capítulo 3</i>	51
Diseño de un interferómetro de anillo basado en un interferómetro Sagnac.....	51
3.1 Elementos ópticos empleados	51
3.1.1. Acoplador de fibra óptica	51
3.1.2. Fibra mantenedora de polarización	53
3.1.3. Control de polarización	54
3.1.4. Láser de figura ocho	56
3.1.5. Aislador de fibra óptica	57
3.2 Equipo de medición y detección	58
3.2.1. Analizador de frecuencia portátil	58
3.2.2. Osciloscopio.....	59
3.2.3. Analizador de espectros óptico (OSA).....	60
3.2.4. Fotodetectores	61
3.2.5. Máquina estrechadora de fibra óptica.....	62
3.2.6. MPU6050	63
3.3 Diseño de interferómetro en anillo	64
3.3.1. Primer prototipo con fibra estrechada (Taper).....	64
3.3.2. Segundo arreglo experimental con acoplador de fibra	66
3.3.2.1.Sensor con acoplador empleando dos motores DC.....	68
3.3.2.2.Sensor con acoplador empleando acelerómetro de Arduino ..	69
3.3.2.3.Sensor con acoplador empleando un Arduino.....	70
3.3.2.4.Sensor con acoplador empleando un motor de DC	71
3.4 REFERENCIAS.....	72
<i>Capítulo 4</i>	75
Resultados y discusiones	75
4.1. Resultados numéricos	75

4.2. Resultados experimentales	81
4.1.1. Régimen continuo	81
4.1.2. Régimen pulsado	90
4.1.2.1. Análisis de resultados	109
4.3. REFERENCIAS	119
<i>Capítulo 5</i>	121
Conclusiones y trabajos a futuro	121
5.1. Trabajos a futuro	121
5.2. Aplicaciones	122
5.3. Artículos y participaciones en congresos	123
5.4. REFERENCIAS	126
Anexos	127
Anexo 1. Simulación de un interferómetro Sagnac (Análisis y modelado)	127
Anexo 2. Simulación de un interferómetro para detección acuto-óptica con potencia aplicada	128
Anexo 3. Programa en Arduino para controlar la velocidad del motor y recopilar la información de lectura	131
Anexo 4. Programa en Arduino para controlar la velocidad del motor por medio de un acelerómetro	132
Anexo 5. Programa en Matlab para graficar datos del osciloscopio	133
Anexo 6. Programa en Matlab para graficar datos del OSA	136

Lista de figuras

2.1	Fibra óptica con a) Fibra multimodo, b) Fibra monomodo	29
2.2	Parámetros de la Ley de Snell	29
2.3	Esquema de interferómetro Mach-Zehnder empleando óptica de bulto	35
2.4	Esquema de interferómetro Michelson empleando óptica de bulto	35
2.5	Esquema de interferómetro Sagnac empleando óptica de bulto	36
2.6	Esquema de un interferómetro de Sagnac formado totalmente de fibra óptica	37
2.7	Pulso de un láser	45
2.8	Simulación de un pulso de ruido (NLPs)	46
2.9	Simulación de un pulso de ruido (NLPs) con envolvente	46
3.1	Funcionamiento de un acoplador de fibra	52
3.2	Acoplador de fibra 2x2 a 1550 nm, TW1550R5F2 marca Thorlabs®	52
3.3	Fibra PM 15-U25A de manera interna	53
3.4	Placa controladora de polarización (PC) FPC560, $\lambda/4$, $\lambda/2$, $\lambda/4$, marca Thorlabs®	54
3.5	Placa controladora de polarización con	55

	parámetros de número de vueltas en cada placa, diámetro de revestimiento y diámetro de la placa		
3.6	Control de polarización lineal CPC250, marca Thorlabs®	.....	56
3.7	Esquema del láser de figura ocho, empleado como fuente de bombeo para el dispositivo realizado	.....	57
3.8	Aislador IOSS5111111, marca Oplink®	.....	57
3.9	Analizador de espectros, marca tinySA®	.....	58
3.10	Osciloscopio InfiniiVision MSOX6004A, marca KEYSIGHT®	.....	59
3.11	OSA MS9740A, marca Anritsu®	.....	60
3.12	Fotodetector DET08CFC, marca Thorlabs®	.....	61
3.13	Fotodetector DET01CFC, marca Thorlabs®	.....	61
3.14	Máquina estrechadora MFFOE	.....	63
3.15	Acelerómetro MPU6050 marca InvenSense	.....	63
3.16	a) Primer prototipo de interferómetro en anillo con fibra SMF-28 estrechada, b) Fibra en anillo ubicada en máquina estrechadora para ser fusionada y estirada	.....	65
3.17	Primer arreglo experimental con	.....	65

	máquina MFFOE	
3.18	Arreglo experimental con acoplador 50/50.	67
3.19	a) Diseño de la base para motores y dispositivo, b) Base de montura en impresión 3D, para el acoplador y control de polarización lineal de fibra óptica, c) Interferómetro montado en las placas	68
3.20	Arreglo experimental con dos motores	68
3.21	Arreglo experimental empleando un aislador a la entrada del interferómetro en anillo, donde solo se incorporó un aislador sin modificar la estructura interna del dispositivo siendo así el mismo que la Figura 3.16.	69
3.22	Arreglo experimental con acoplador 50/50 y un solo motor, variando sus revoluciones por medio de un potenciómetro.	70
3.23	Representación del movimiento vibratorio de la placa de MDF a) motor apagado, b) motor encendido, c) vista real del arreglo	71
4.1	Dispositivo en anillo Sagnac para el desarrollo de la simulación.	76
4.2	Simulación de patrón de interferencia resultante del comportamiento de un interferómetro Sagnac.	77

4.3	Simulación de patrón de interferencia resultante del comportamiento de un interferómetro Sagnac con 10 torsiones.	.....	78
4.4	a) Simulación de patrón de interferencia resultante al aplicar potencia de entrada de 10 mW, longitud L1 de 205 cm y L2 de 201 cm, índice de refracción de 1.46 y ángulo de polarización de $\pi/2$ con 10 torsiones simuladas, b) Transformada de Fourier de la señal simulada.	.....	79
4.5	a) Simulación de patrón de interferencia resultante al aplicar potencia de entrada de 10 mW, longitud L1 de 3.01 cm y L2 de 3.02 cm, índice de refracción de 1.46 y ángulo de polarización de $\pi/2$ con 10 torsiones simuladas, b) Transformada de Fourier de la señal simulada	.....	80
4.6	Respuesta del dispositivo en longitud de onda variando el voltaje del motor de 3.8 a 6 Volts, visto en el dispositivo OSA.	.....	82
4.7	Sección de análisis en uno de los valles de la señal de rango de 1549- 1551 nm	.....	83
4.8	Sección de análisis en uno de los valles de la señal de rango de 1549- 1551 nm, decrementando el voltaje de 6-3.8 Volts.	.....	83
4.9	Comportamiento de variaciones en longitudes de onda a) Respuesta al aumentar el voltaje de manera	.....	84

	ascendente con respecto a la figura 4.7, b) Respuesta al disminuir el voltaje con respecto a la Figura 4.8.		
4.10	a) Gráfica de respuesta de variación en un régimen continuo, b) Acercamiento de la señal del inciso a).	.....	86
4.11	Gráfica de respuesta empleando los ángulos de la Tabla 4.3.	.....	87
4.12	Gráfica de la transformada rápida de Fourier (FFT) de la Figura 4.11.	.....	88
4.13	Gráfica de respuesta de variación en el ángulo de placas con los ángulos de la Tabla 4.4.	.....	89
4.14	Gráfica de la transformada rápida de Fourier (FFT) de la Figura 4.13.	.....	90
4.15	a) Respuesta del dispositivo variando el voltaje cada 0.5 Volts, b) Aumento en una sección respecto a la gráfica a, c) Gráfica de respuesta del dispositivo variando el voltaje cada 1 Volt, d) Aumento respecto a la gráfica 4.15 c.	.....	92
4.16	a) Respuesta del dispositivo variando el voltaje cada 1 Volt aumentándolo gradualmente sin bajar el voltaje en cada corrida, b) Respuesta del dispositivo con aumento en una sección respecto a la gráfica a.	.....	93
4.17	a) Variación del ancho del pulso de la	.....	94

gráfica c de la Figura 4.15, b) Variación del ancho del pulso de la gráfica a de la Figura 4.16.

4.18	a) Respuesta del pulso al encender y apagar el voltaje, b) Aumento en la sección con mayor desplazamiento de la Figura 4.18 a.	.....	95
4.19	a) FFT del pulso al encender y apagar el motor, b) Aumento en una de las secciones de la Figura 4.19 a.	.....	95
4.20	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del interferómetro, b) Respuesta en ancho temporal de la gráfica de la Figura 4.20 a.	.....	96
4.21	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del interferómetro, b) Respuesta de ancho temporal de la gráfica de la Figura 4.21 a.	.....	97
4.22	a) Prueba de respuesta al pulso de la señal de la salida del F8L en prueba 1, b) Prueba del pulso de la señal de la salida del F8L en prueba 2.	.....	98
4.23	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del interferómetro en prueba 3, b) Respuesta del ancho temporal de la Figura 4.23 a, prueba 3.	.....	98
4.24	Respuesta al pulso de la señal de la salida del del láser de figura ocho (F8L) en	.....	99

prueba 3.

4.25	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del del láser de figura ocho (F8L), b) Datos obtenidos (línea azul) y curva de aproximación (línea roja) de la variación del ancho del pulso dependiendo de la frecuencia de vibración.	.....	100
4.26	a) Respuesta FFT del pulso de la figura 4.25 a con rango de 0-350 MHz en el osciloscopio, b) Respuesta FFT del pulso de la Figura 4.25 a con rango de 0-1.6 GHz en el osciloscopio.	.....	101
4.27	Respuesta al pulso de la señal de la salida del del láser de figura ocho (F8L) con placas en los ángulos de la Tabla 4.8.	.....	101
4.28	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo en anillo, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.28 a.	.....	102
4.29	a) Arreglo experimental con bocina, b) Configuración del sistema para aplicarle diferentes frecuencias.	.....	103
4.30	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo todo fibra con placas en los ángulos de la Tabla 4.9, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.30 a.	.....	104
4.31	a) Respuesta al pulso de la señal de la	.....	105

	salida del dispositivo, variando el voltaje con intervalos de 0.5 Volts, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.31 a.		
4.32	Gráfica de linealización con curva de aproximación aplicando un polinomio de primer orden.	.....	105
4.33	a) Respuesta al pulso variando las frecuencias de entrada, b) Curva de aproximación de la respuesta del pulso de la Figura 4.33 a.	.....	106
4.34	a) Respuesta al pulso variando el voltaje del motor, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.34 a.	.....	107
4.35	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo, variando el voltaje con intervalos de 0.5 Volts, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.35 a).	.....	108
4.36	Gráfica de linealización respecto a la Figura 4.35 b).	.....	108
4.37	a) Respuesta al pulso variando las frecuencias de entrada, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.37 a.	.....	109
4.38	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo con placas posicionadas en los ángulos de la Tabla 4.12 con corridas ascendentes, b) Linealización de la respuesta del pulso de la Figura 4.38 a.	.....	110

4.39	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo con placas posicionadas en los ángulos de la Tabla 4.12 con corridas descendentes, b) Linealización con curva de aproximación.	..... 111
4.40	a) Respuesta al pulso de salida incrementando el voltaje de 0 a 5 Volts b) Linealización con curva de aproximación.	..... 113
4.41	Respuesta lineal al pulso de la señal de la salida del dispositivo decrementando el voltaje de 5 a 0 Volts.	..... 114
4.42	a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del incrementando el voltaje de 0 a 8 volts b) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo decrementando el voltaje de 8 a 0 Volts.	..... 115
4.43	a) Respuesta de la salida del dispositivo con voltaje de 2 a 8 Volts b) Respuesta decrementando el voltaje de 8 a 2 Volts.	..... 116

Lista de abreviaciones

A	.....	Alcance (Scope)
AN	.....	Apertura numérica (Numerical Aperture)
AO	.....	Acusto óptica (Acousto Optical)
b	.....	Índice normalizado (Normalized Index)
B_{cir}	.....	Birrefringencia circular (Circular birefringence)
bmp	.....	Archivo mapa de bits (Bits Maps Protocole)
dB	.....	Decibeles (Decibels)
DC	.....	Corriente directa (Direct current)
d	.....	Distancia (Distance)
DFT	.....	Transformada de Fourier discreta (Discret Fourier Transform)
DGD	.....	Retardo diferencial de grupo (Differential Group Delay) [ps/km]
EDF	.....	Fibra dopada de erbio (Erbium doped fiber)
eIC	.....	Implante Coclear eléctrico (Electric Cochlear Implant)
E_i	.....	Campo de entrada (Input Field)
EOM	.....	Modulador de fase electroóptico (Electro-optical phase modulator)
Ex	.....	Exactitud (Accuracy)
FBG	.....	Rejillas de Bragg de fibra (Fiber Bragg Gratings)

FFT	.....	Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
FOA	.....	Acelerómetro de fibra óptica (Fiber Optic Accelerometer)
fs	.....	Femtosegundos (Femtoseconds)
F&L	.....	Láseres de figura en ocho (Figure-eight lasers)
GHz	.....	Giga Hertz
H	.....	Histéresis (Hysteresis)
HWR	.....	Placa retardadora media onda (Half wave retarder)
Hz	.....	Hertz
IC	.....	Implantes cocleares (Cochlear implants)
Inex	.....	Inexactitud (Inaccuracy)
ISO	.....	Aislador óptico (Optical isolator)
km	.....	Kilómetros (Kilometers)
K_0	.....	Vector de onda en el vacío (Wave vector in vacuum)
Láser	.....	Amplificación de luz por emisión de radiación estimulada (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
Mbps	.....	Megabits por segundo (Megabits per second)
MDF	.....	Tablero de fibra de densidad media (Medium Density Fibreboard)

MFFOE	.....	Máquina para fabricación de fibra óptica estrechada mediante fusión y estiramiento (Machine for manufacturing narrowed optical fiber by melting and stretching)
MHz	.....	Mega Hertz
<i>m</i>	.....	Modulación (Modulation)
MΩ	.....	Mega ohms
NALM	.....	Lazo amplificador no lineal (Non-Linear amplifier loop mirror)
NLPs	.....	Pulsos similares al ruido (Noise-like pulses)
NOLM	.....	Espejo de lazo óptico no-lineal (Non-linear optical loop mirror)
n_n	.....	Índice de refracción (Refractive index)
NPR	.....	Rotación no-lineal de polarización (Non-linear polarization rotation)
ns/ nseg	.....	Nano segundos (Nanoseconds)
OSA	.....	Analizador de espectros óptico (Optical Spectrum Analyzer)
OWCI	.....	Implante coclear inalámbrico óptico (Optical wireless cochlear implant)
PC	.....	Controles de polarización (Polarization Controls)
PLA	.....	Ácido poliláctico (Polylactic acid)
PM	.....	Fibras mantenedoras de polarización

		(Polarization maintaining fibers)
PMD	.....	Modo de polarización (Polarization mode)
P	.....	Precisión (Precision)
P_i	.....	Potencia de entrada (Input Power)
P_o	.....	Potencia de salida (Output Power)
PSD	.....	Densidad espectral de potencia (Power Spectral Density)
QWR	.....	Placa cuarto de onda (Quarter Wave Retarder)
RC	.....	Resistencia y capacitor (Resistor and capacitor)
RPM	.....	Revoluciones por minuto (Revolutions Per Minute)
R	.....	Reflectancia (Reflectance)
SA	.....	Absorbedor saturable (Saturable absorber)
SCP	.....	Copia de seguridad (Secure Copy)
sen	.....	Seno
SGNs	.....	Neuronas ganglionares espirales (Spiral Ganglion Neurons)
SI	.....	Interferómetro Sagnac (Sagnac Interferometer)
SMF	.....	Fibra monomodo (Single-Mode Fiber)
SNR	.....	Señal a ruido (Signal to noise)
S	.....	Sensibilidad (Sensitivity)
T	.....	Transmitancia (Transmittance)

TE	.....	Transversal eléctrico (Transverse Electrical)
TEM	.....	Transversal electromagnético (Transverse Electromagnetic)
TM	.....	Transversal magnético (Transverse Magnetic)
u.a	.....	Unidades arbitrarias (Arbitrary units)
V	.....	Frecuencia normalizada (Normalized frequency)
WDM	.....	Multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing)
x_i	.....	Valor tomado (Value taken)
\bar{x}	.....	Promedio de valores (Average values)
α	.....	Coefficiente de atenuación (Attenuation coefficient)
β	.....	Constante de propagación (Propagation constant)
λ	.....	Lambda (longitud de la onda de luz) (wavelength of light)
μm}	.....	Micro metros (Micrometers)
μW}	.....	Micro Watts

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se muestran diversos trabajos referentes al área de sensores de vibración y acústicos elaborados de fibras ópticas, los cuales nos sirvieron de base para desarrollar nuestro dispositivo de detección de señales. Así mismo se da a conocer el objetivo y justificación del desarrollo del trabajo de tesis.

1.1 Antecedentes

La luz láser que viaja al interior de una fibra óptica sufre reflexiones, así como cambios en polarización, amplitud y fase. Cuando se le aplica una perturbación en algún punto de un dispositivo fabricado mediante esta guía de onda, es posible monitorear las vibraciones, detectando su magnitud y posición [1]. Es por ello por lo que, a lo largo de los años, se han empleado las fibras ópticas para crear dispositivos para mejorar instrumentos electrónicos comerciales.

Una de las áreas más empleadas para elaborar dispositivos a base de fibra óptica es la creación y desarrollo de sensores, los cuales, debido a sus propiedades y configuraciones actúan mejorando la señal resultante. A continuación, se mostrarán algunos de los trabajos que consideramos más relevantes desde el 2015 hasta la actualidad con respecto a dispositivos de fibra óptica que desarrollen sensores de vibración, destacando sus ventajas y desventajas.

1.1.1. Sensores de vibración

Los sensores de vibración con fibra óptica se emplean principalmente en motores que induzcan oscilaciones en el sistema. Las vibraciones que producen los motores varían dependiendo de la condición del motor, debido a desgaste, fallas mecánicas, falta de mantenimiento, etc., generando así ruidos específicos según la falla a tratar [2], de este

modo, una de las alternativas para la detección de fallas en motores es la implementación de sensores todo fibra.

Con el paso de los años se han empleado varios métodos para crear sensores de fibra óptica, por ejemplo, la implementación de rejillas de Bragg de fibra (FBG en inglés Fiber Bragg Gratings), la implementación de fibras mantenedoras de polarización (PM, en inglés Polarization Maintaining Fiber) logrando mejor sensibilidad en los sensores [3] o la utilización de fibra óptica distribuida [4,5,6], donde la vibración puede inducir cambios en el índice de refracción resultando una variación de fase de las ondas como lo demuestran en el artículo realizado en 2017, donde diseñaron un sensor de vibraciones con fibra distribuida con la capacidad de realizar mediciones multipunto fáciles de localizar [4], no obstante, al emplear FGB o fibra distribuida, los costos de los dispositivos aumentan en comparación al emplear fibra estándar.

En el 2015, se desarrolló un sensor a base de fibras ópticas monomodo estrechadas por método Cantiléver, el cual permitía medir con exactitud las fallas inducidas por vibraciones en motores rotatorios, donde a medida que se aumentaban las frecuencias de vibración del motor (las cuales variaban en un intervalo de 50 a 103 Hz), las señales de referencia y medidas se desfasaban debido al retardo del método [7].

Diversas investigaciones han demostrado que los interferómetros Sagnac de fibra óptica, funcionan como sensores, debido a su interacción de las señales contra-propagándose en el lazo de anillo, destacando su estructura simple. Una de las áreas que se ha tratado frecuentemente en estos interferómetros es la polarización, como se muestra en un trabajo del 2022 [8] donde se empleó: fibra de baja birrefringencia para formar un interferómetro Sagnac, un diodo láser de 1550 nm como fuente de bombeo, dos placas retardadoras de $\lambda/2$, $\lambda/4$ y un polarizador lineal, para ajustar la polarización y mejorar la sensibilidad del sistema; teniendo así una bocina para inducir vibraciones. Como resultado, se obtuvo un dispositivo con respuesta en variaciones en amplitud [8].

1.1.1. Aplicaciones de sensores acústicos

Entre los diversos sensores que pueden detectar distintas variables, surgió el interés de elaborar sensores que permitan la localización de señales acústicas, dando origen al estudio de la interacción acusto-óptica (AO), la cual ha tenido gran relevancia a lo largo de los últimos años, debido al interés de procesar luz sin necesidad de extraerla, produciendo menores pérdidas. Otra ventaja de estos dispositivos es que no requieren alineación, con la implementación de fibras ópticas con interacción AO se tiene la posibilidad de implementar filtros sintonizables, con aplicación en láseres sintonizables de fibra, permitiendo el ajuste de la longitud de onda de emisión [9].

En la actualidad, los sensores acústicos de fibra óptica han demostrado un gran desarrollo debido a su alta sensibilidad, peso ligero y la detección en tiempo real [10]. En el 2018, un estudio demostró la sensibilidad de una burbuja en empalmes de fibra óptica, la cual funcionaba como un interferómetro Fabry-Perot, donde al incrementar el diámetro de dicha burbuja su sensibilidad aumentaba, de este modo se empleó dicho dispositivo para detectar ondas acústicas generadas por un altavoz [10].

Otra aplicación de los sensores acústicos de fibra óptica se puede observar en un trabajo presentado en 2023, donde se emplearon diversos dispositivos basados en un interferómetro Michelson, los cuales se recubrían con diversos materiales como polietileno, acrílico, acero, etc., con la finalidad de medir la sensibilidad de cables ópticos en vibraciones acústicas en el espectro audible, lo que permite que estos dispositivos funcionen como micrófonos sensibles que puedan capturar el habla humana[11].

1.2 Justificación

Los dispositivos electrónicos que son empleados en la actualidad poseen una respuesta muy lenta en comparación a dispositivos elaborados de fibra óptica, los cuales también cuentan con la ventaja de tener una vida útil mayor a sus contrapartes electrónicas, puesto que no les afectan los factores físicos externos, soportando temperaturas en un rango aproximado de -20 a 200 °C.

El presente documento describe el desarrollo de un sistema de detección de vibraciones por medio de un interferómetro Sagnac de fibra óptica en régimen pulsado, con posibles aplicaciones desde la detección de fallas en motores hasta en su uso como micrófonos para implantes cocleares basados en interferómetros tipo Sagnac de fibras monomodo (SMF, en inglés Single-Mode Fiber).

1.3 Objetivo

Realizar la implementación de un sistema basado en técnicas de interferometría óptica empleando fibras ópticas, con el propósito de contar con un sistema de procesamiento que permita la detección de señales de vibración enfocado en un amplio rango de frecuencias, lo cual nos permitirá emplear el dispositivo en futuras aplicaciones médicas o industriales, como lo puede ser la mejora de la tecnología de implantes cocleares en personas con neuropatía auditiva o la detección en falla de motores.

1.4 Objetivos específicos

Para poder desarrollar nuestro dispositivo y cumplir en forma con el proceso de titulación para obtener el grado de Maestra en Ingeniería Eléctrica se deben cumplir una serie de objetivos específicos, los cuales son:

- Estudiar y analizar los sensores comerciales para detección de fallas en motores.
- Estudiar los métodos actuales con los que se desarrollan los implantes cocleares para pacientes con deficiencias auditivas.
- Desarrollo teórico-numérico del esquema propuesto.
- Desarrollo experimental del interferómetro con fibra óptica de comunicaciones.
- Caracterización y estudio de señales vibracionales y acústicas detectadas por el interferómetro desarrollado de forma experimental.
- Proponer una técnica para el uso del sensor en el dominio temporal, sin la necesidad de emplear el OSA (Optical Spectrum Analyzer).
- Obtener información sobre el desarrollo e implementación de sistema que permita

el manejo de señales obtenidas en el trabajo experimental.

- Buscar posibles ideas de optimización del prototipo desarrollado, basándose en mejoras estructurales, de adquisición, filtrado, etc.
- Discretización de los resultados más importantes del trabajo y planteamiento de posible trabajo a futuro.
- Búsqueda de empaquetamiento del dispositivo, implementando un primer prototipo.
- Obtención de grado de maestra en ingeniería en tiempo y forma.

1.5 Descripción de la tesis

En el capítulo 2 se mencionan los principios básicos para el desarrollo y análisis, presentando ventajas de un interferómetro basado en una arquitectura Sagnac en comparación a otras configuraciones.

En el capítulo 3 se dan a conocer los elementos ópticos y electrónicos empleados para la elaboración del interferómetro propuesto, así como también se mostrarán las distintas configuraciones del interferómetro de anillo desarrolladas para el análisis de pruebas y resultados.

En el capítulo 4 se exponen los resultados encontrados, enfocándonos en los que nos servirán como la base para detección de vibraciones en nuestro dispositivo y el análisis de sus características, como la resolución y sensibilidad.

Finalmente, en el capítulo 5 se muestran las conclusiones del trabajo expuesto, así como posibles propuestas de trabajos a futuro, con el fin de continuar con el estudio y desarrollo sobre las áreas de impacto del proyecto.

Al término del documento se presenta la sección de anexos, donde se encuentran los códigos de Arduino y Matlab empleados a lo largo del proyecto de tesis.

1.6 REFERENCIAS

- [1] D. Ceballos, Técnicas de sensado con fibras ópticas para monitoreo distribuido, 02/04/2023.
- [2] D. María y A. García, Detección de falla de desbalance mecánico en motores de inducción por medio de sonido, Jóvenes en la ciencia, Universidad de Guanajuato, 2016.
- [3] K. Wanda, H. Nauri, D. Yamamoto, T. Matsuyama y H. Horinaka, Balanced polarization maintaining fiber Sagnac interferometer vibration sensor, Optics Express, Vol. 19, N° 22, 2011, <https://doi.org/10.1364/OE.19.021467>.
- [4] C. Pan, X. Liu, H. Zhu, X. Shan and X. Sun, Distributed optical fiber vibration sensor base don Sagnac interference in conjunction with OTDR, Optics Express, Vol. 25, N° 17, 2017, <https://doi.org/10.1364/OE.25.020056>.
- [5] P. Li, Y. Wang, X. Liu, Q. Bai, P. Wang, Y. Gao and H. Zhang Sagnac Vibration Sensing System With Nested Pulse Method, 2021
- [6] I. Brutkoski, G. Heim, D. Fernandes, J. Galvao, M. J. da Silva, D. R, A. Ozcáriz, C. R, C. Martelli, J. Cardozo, Electric discharge detection and localization using a distributed optical fiber vibration sensor, 2020.
- [7] Y. Rodríguez, W. Falcón, S. Cabarroury, Y. Camacho, A. Blanco y C. Cardozo, Desarrollo de estructuras de fibra óptica estrechada (Taper) para detección de vibraciones mecánicas, Revista de Ciencia y Tecnología, Vol. 19, N° 1, 2015.
- [8] H. Hernández, A. Beltrán, A. Mora, B. Bravo y O. Pottiez, Sagnac with Double-Sense Twisted Low-Birefringence Standard Fiber as Vibration Sensor, Sensors 2022, 2022, <https://doi.org/10.3390/s22218557>.

- [9] G. Ramírez, Interacción acusto-óptica en fibra óptica basada en ondas de reflexión: moduladores y láseres de fibra óptica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, pp. 5-8, pp. 47-48, 2017.
- [10] H. Xu, G. Wang, J. Ma, L. Jin, K. Oh and B. Guan, Bubble-on-fiber (Bof): a built-in tunable broadband acousto-optic sensor for liquid-immersible in situ measurements, Optics Express Vol. 26, N° 9, 2018, <https://doi.org/10.1364/OE.26.011976>.
- [11] P. Dejdar, O. Mokry, M. Cizek, P. Rajmic, P. Munster, J. Schimmel, L. Pravdova, T. Horvath y O. Cip, Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations, Scientific Reports, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34097-9>.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presentan los principios de interacción de la luz en fibras ópticas y en interferómetros de fibra óptica, centrándonos en interferómetros de anillo Sagnac, siendo la base de nuestros dispositivos implementados.

2.1 Fibras ópticas

Con la invención del láser en 1960, surgió la idea de utilizarlo para transportar información, en 1966 se logró acoplar luz a una fibra óptica, sin embargo, no fue hasta 1970 que los investigadores de Corning Glass Works fabricaron una fibra de silicio con una atenuación de 20 dB/km [1], de este modo se abrió paso a la transmisión de información por medio de fibras ópticas.

En comparación con cables de cobre convencionales, la fibra óptica posee mayores ventajas debido a que son ligeras, con bajas pérdidas, amplia capacidad de transmisión [2] y su inmunidad a la interferencia electromagnética [1], esto debido a que están elaboradas principalmente de silicio de alta pureza.

Las fibras ópticas son un tipo de guías de onda, es decir, son estructuras físicas que guían ondas electromagnéticas. Tienen diámetros de entre 10 a 200 μm , dividiéndose en dos partes principales el núcleo y el revestimiento, siendo la primera la parte central (teniendo un índice de refracción n_1) y más pequeña de la fibra [2], la segunda parte de la fibra óptica, el revestimiento con un índice de refracción n_2 menor al núcleo n_1 [3, 2]. Si el diámetro de las fibras es grande comparado con la longitud de onda $[\lambda]$ de la energía radiante, su análisis se centra en la óptica geométrica, mientras que, si el diámetro es del orden de λ , la transmisión se asemejará mucho a la manera en que las microondas avanzan a lo largo de las guías de onda [1]. Así, si el diámetro del núcleo es pequeño, propagándose un solo modo en la fibra, se considera monomodo, usualmente estas fibras

poseen un diámetro de núcleo entre 4 y 10 μm ; mientras que las fibras con un diámetro del núcleo grande (50-150 μm) son multimodo [3].

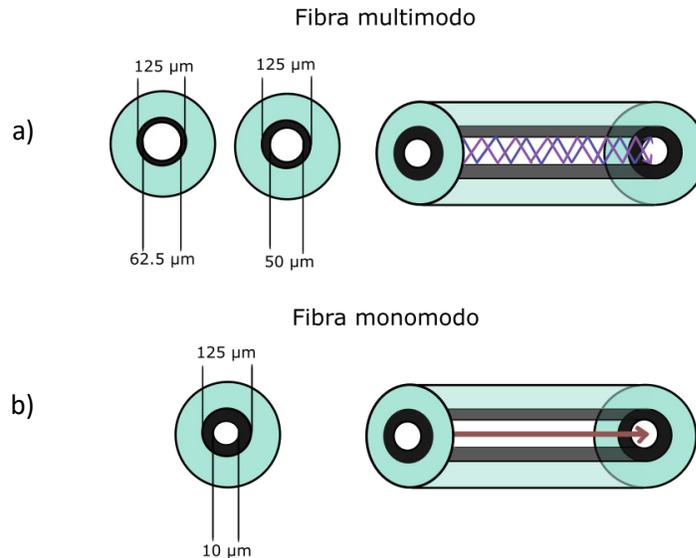


Fig.2.1. Fibra óptica con a) Fibra multimodo, b) Fibra monomodo.

Las fibras ópticas se rigen por la Ley de Snell, la cual relaciona el coeficiente de los índices de refracción con el ángulo del haz de luz incidente y refractando:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde θ_1 es el ángulo entre el haz de luz incidente y la normal (perpendicular) a la superficie y θ_2 es el ángulo entre el haz de luz refractado y la normal a la superficie [2].

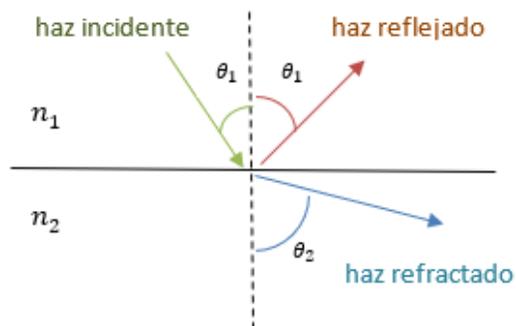


Fig.2.2. Parámetros de la ley de Snell.

De la ley de Snell surge la apertura numérica (AN), ya que es un indicador del ángulo

máximo con que un haz puede ingresar a la fibra óptica para que se produzca reflexión total interna [3] y el mayor porcentaje de la luz quede confinada en el núcleo.

En una guía de onda plana con índice homogéneo, también denominado índice en escalón (donde el índice varía en el material de manera abrupta a lo largo del eje) se tiene el núcleo (core), con un índice de refracción n_1 , el cual está ubicado entre un material de índice n_2 y un recubrimiento (cladding) de índice n_3 , de modo que $n_1 > n_2 \geq n_3$. Si $n_2 = n_3$, se dice que la guía es simétrica [3].

Si la luz se introduce en el material por uno de sus laterales se requiere que el ángulo incidente sea menor que el ángulo de aceptación θ_a de este modo la luz queda confinada en la guía. Según la ley de Snell, este ángulo define la apertura numérica (AN) [1], siendo:

$$AN = \text{sen}\theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Si el índice de refracción del núcleo es ligeramente superior al del material, se tiene que:

$$AN \cong \sqrt{2n_1\Delta n} = n_1\sqrt{2\Delta n} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

En las guías de onda tendremos dos tipos de rayos, los rayos ligados, los cuales permanecen en el núcleo y los no ligados, que son aquellos que se refractan fuera del núcleo, por lo cual, cuando la luz queda totalmente confinada en la guía habiendo reflexión total interna se tiene un modo guiado dominante. De esta manera, pueden existir dos diferentes modos, los cuales dependerán de la orientación de los campos eléctrico (transversal eléctrico o modo TE) y magnéticos (transversal magnético o modo TM) de las ondas [1]. Las componentes están dadas por:

$$\text{Modo TE: } E(0, E_y, 0), H(H_x, 0, H_z)$$

$$\text{Modo TM: } E(E_x, 0, E_z), H(0, H_y, 0)$$

Los modos que interactúan poseen una constante de propagación β , que está dada por el componente z del vector $n_1 k_0$, donde k_0 es el vector de onda en el vacío ($k_0 = \omega/c$ (Ec. 2.5)):

$$\beta = k_0 n_1 \sin\Phi \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Y las constantes de propagación de los modos guiados se rigen por el intervalo:

$$n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Unos de los factores que intervienen en la propagación modal son la frecuencia normalizada (V), el índice normalizado (b) y el parámetro de asimetría de la guía (a) [3].

$$V = k_0 d A N \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Para modos TE:

$$b^{TE} = \frac{\beta^2 - k_2^2}{k_1^2 - k_2^2} = \frac{N^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$N = \frac{\beta}{k_0} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$a^{TE} = \frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Para modos TM:

$$b^{TM} = \frac{n_1^2 (\beta^2 - k_2^2)}{n_2^2 q_2 (k_1^2 - k_2^2)} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$q_2 = \frac{\beta^2}{k_1^2} + \frac{\beta^2}{k_2^2} - 1 \quad (\text{Ec. 2.13})$$

$$a^{TM} = \frac{n_1^4 (n_2^2 - n_3^2)}{n_3^4 (n_1^2 - n_2^2)} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Para obtener el número de modos soportados por una guía de onda simétrica se utiliza la frecuencia normalizada de corte para el modo de orden m :

$$m = \frac{V_c(m)}{\pi} = \frac{2d\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda_c(m)} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Como en todo sistema, existen mecanismos y parámetros (como impurezas, materiales, geometría de la fibra, etc.) que afectan la propagación de modos. Estos factores producen pérdidas de la potencia óptica y ensanchamiento intramodal, generando distorsiones en la señal.

2.2.1. Atenuación

Las pérdidas o atenuaciones en una fibra se modelan con el coeficiente de atenuación (α):

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_0}{P_i} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Donde P_0 y P_i son las potencias de salida y entrada respectivamente, L la longitud de la fibra óptica.

Las pérdidas también se originan por factores intrínsecos y extrínsecos. Los primeros proceden de la fabricación y los segundos de las impurezas de los materiales [3].

2.2.2. Dispersión

Para la propagación de pulsos la dispersión juega un papel importante ya que provoca un ensanchamiento temporal de los pulsos cuyo origen se encuentra en el material de la fibra, la geometría de esta y en la distribución espectral de los pulsos, provocando una distorsión o degradación de la señal [3].

Existen dos tipos de dispersión: intermodal e intramodal. Donde la primera se presenta en fibras multimodo y se origina por la variación de la velocidad de grupo de los modos y depende de la longitud de la fibra, ocasionando un ensanchamiento temporal el cual puede provocar un solapamiento parcial o total en pulsos siguientes [3].

En el caso de la dispersión intramodal o cromática se debe a la variación de la velocidad

de grupo con la longitud de onda como consecuencia de la dependencia del índice de refracción y de los parámetros de la fibra con la longitud de onda, afectando a fibras multimodo y monomodo [3].

En la fibra óptica pueden viajar desde uno hasta varios modos o rayos de luz, los cuales, al estar interactuando internamente en la estructura, y bajo ciertas circunstancias son capaces de crear interferencias en las señales, este fenómeno puede ser beneficioso o dañino para las señales, dependiendo de la aplicación a considerar.

2.2 Interferencia

El fenómeno de interferencia se centra en el principio de superposición de dos ondas armónicas que se propagan en un medio lineal, donde inicialmente las ondas se encuentran a la misma frecuencia con polarizaciones lineales y ortogonales entre sí [4]. Por ejemplo, el resultado de la suma de dos ondas armónicas, de igual frecuencia, es otra onda armónica de la misma frecuencia, cuya amplitud dependerá de las diferencias de fases; de este modo estas diferencias pueden dar lugar a interferencias constructivas o destructivas [4].

Para que la interferencia sea constructiva, el desfase entre las dos ondas debe ser un múltiplo entero de 2π . Si la irradiancia $I_1 + I_2 < I < I_{max}$ (Ec. 2.17), la interferencia será destructiva [2]. La irradiancia resultante es:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\theta \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Arago y Fresnel, demostraron que dos rayos polarizados ubicados en un mismo plano se interfieren, pero no se relacionan cuando se encuentran perpendicularmente, surgiendo así las leyes de interferencia de Fresnel-Arago [5]:

Primera ley: Dos haces de luz polarizada paralelamente interferirán de la misma manera que la luz ordinaria [1,5].

Segunda ley: Dos haces de luz polarizada a ángulos rectos no producen el fenómeno de

interferencia [1,5].

Tercera ley: Dos haces que estaban originalmente polarizados a ángulos rectos puede ser traídos al mismo plano de polarización sin necesariamente ocasionar una interferencia [1,5].

Para obtener un patrón de interferencia se requiere de dos o más haces interaccionando entre sí, de este modo, a lo largo de los años se han desarrollado técnicas de interferencia, como son la realización de dispositivos interferómetros.

2.4 Tipos de interferómetros

Los interferómetros son empleados para medir la superposición de las ondas, clasificándose en dos áreas importantes: los interferómetros de división de frente de onda y los interferómetros de división de amplitud. En el primer caso suele usarse con fuentes puntuales o extendidas que emiten ondas en diferentes direcciones, empleando aberturas para aislar dos haces a partir de porciones separadas del frente de onda primario [5], los interferómetros más conocidos de estos tipos son: Young, el espejo doble y el prisma de Fresnel.

La interferencia en el experimento de Young consiste en que una onda incide sobre una placa delgada con dos rendijas, en el cual la luz pasa por las aberturas ocasionando un patrón de interferencia [6].

Para interferómetros de división de amplitud, el haz es dividido en uno o más haces por superficies parcialmente reflejantes, donde una parte de la luz será reflejada y la otra transmitida [5], entre estos se encuentra: Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot y Sagnac.

En la actualidad, los interferómetros más empleados son los de división de amplitud debido a sus posibles combinaciones y adaptaciones. El más utilizado es el Mach-Zehnder, el cual consiste en un rayo de luz que se divide en dos partes las cuales siguen dos caminos distintos para después ser combinados nuevamente [7].

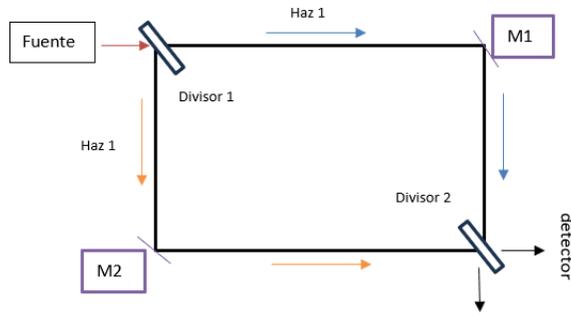


Fig.2.3. Esquema de interferómetro Mach-Zehnder empleando óptica de bulto.

El interferómetro Michelson consiste en una fuente láser divergente, que viaja hasta un divisor de haz que separa la luz en dos frentes de ondas idénticas las cuales se propagan en direcciones perpendiculares [8].

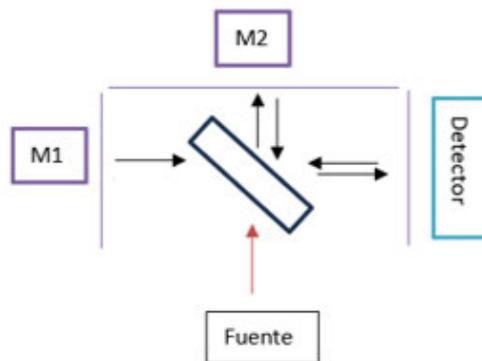


Fig.2.4. Esquema de interferómetro Michelson empleando óptica de bulto.

El interferómetro Fabry-Perot se destaca por la interferencia de múltiples ondas generadas por dos láminas paralelas recubiertas por una película plateada de alta reflectividad parcialmente transparente separadas a una distancia (d) [8].

Por último, se tiene el interferómetro de Sagnac, el cual está asociado al movimiento de rotación, donde se tiene un haz que se divide en dos haces que viajan en un lazo cerrado idéntico, pero con direcciones opuestas [9], interactuando en el anillo del sistema ocasionando una interferencia.

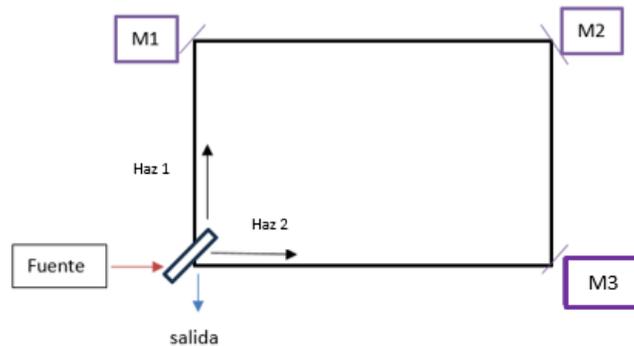


Fig.2.5. Esquema de interferómetro Sagnac empleando óptica de bulto.

Los interferómetros usualmente están compuestos de varios espejos, fibra, acopladores, divisores, etc.; no obstante, estos elementos ocasionan que los dispositivos interferométricos no sean simples y su tamaño no sea compacto. En el caso del interferómetro Sagnac, su implementación lo hace muy factible debido a su tamaño compacto y fácil fabricación.

2.5 Interferómetro de Sagnac

Un interferómetro de Sagnac (SI) o también conocido como interferómetro de anillo, posee una configuración sencilla y compacta, teniendo grandes ventajas ya que presenta una respuesta rápida, no es afectado por perturbaciones externas debidas a frecuencias eléctricas, tiene bajas pérdidas y suele utilizarse para configuraciones más complejas mezclándolas con otras configuraciones interferométricas [10].

En este tipo de interferómetros se requiere que dos haces posean estados de polarización iguales para que puedan superponerse en el detector, sin embargo, cuando la polarización entre ambos haces no es completamente paralela, la interferencia se ve reducida; mientras que si la polarización es ortogonal no existirá ninguna interferencia [10].

Un SI formado con fibra posee una fuente emisora, un acoplador direccional, un lazo de fibra y finalmente cuenta con un elemento de detección [10].

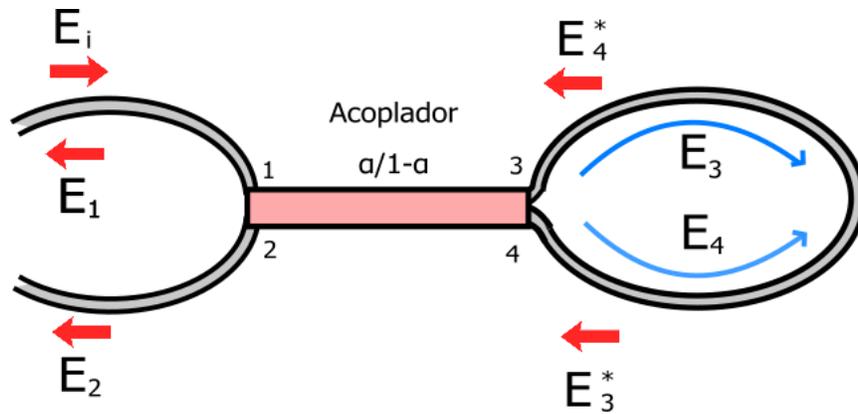


Fig.2.6. Esquema de un interferómetro de Sagnac formado totalmente de fibra óptica.

El campo de entrada E_i , es dividido en dos campos de amplitudes complementarias con una diferencia de fase de $\pi/2$ entre ellas, cada campo sale a través de los puertos de salida (3 y 4) recorriendo el lazo Sagnac, de manera que ambos regresan al acoplador de fibra, recombinándose y emitiendo señal por el puerto 1 y 2, cuando los campos pasan por el acoplador, las ondas interferirán, teniendo onda transmitida y reflejada con una diferencia de fase que puede ser diferente de $\pi/2$ [11].

Se considera para el análisis un campo de entrada definido por

$$E_i = \widehat{e}_x E_x + \widehat{e}_y E_y \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde:

$$E_x = E_i \cos \varphi_0 \quad (\text{Ec. 2.20})$$

$$E_y = E_i \sin \varphi_0 \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Siendo φ_0 el ángulo entre el eje de polarización del campo y del eje x de la fibra. Siguiendo el funcionamiento del interferómetro de Sagnac, la señal al pasar por el acoplador sufre el fenómeno de acoplamiento de los modos dividiendo la señal en dos haces E_3 y E_4 [9], las cuales obtienen:

$$E_3 = \alpha^{1/2} (\widehat{e}_x E_x + \widehat{e}_y E_y) \quad (\text{Ec. 2.22})$$

$$E_4 = i(1 - \alpha)^{1/2} (\widehat{e}_x E_x + \widehat{e}_y E_y) \quad (\text{Ec. 2.23})$$

De este modo al ingresar al acoplador resultan dos nuevos campos de salida definidos como:

$$E_3^* = \alpha^{1/2} E_4 + i(1 - \alpha)^{1/2} E_3 \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$E_4^* = \alpha^{1/2} E_3 + i(1 - \alpha)^{1/2} E_4 \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Cuando E_3 y E_4 han recorrido la totalidad del lazo pasan por el acoplador por segunda vez, ocurriendo un intercambio de energía, obteniendo como resultante:

$$E_3^* = \widehat{e}_x E_y \alpha^{1/2} (1 - \alpha)^{1/2} \exp(i\Phi_{Ly}) \{ \exp[i(\Phi_{Lx} - \Phi_{Ly})] + 1 \} + \widehat{e}_y E_x i \alpha^{1/2} (1 - \alpha)^{1/2} \exp(i\Phi_{Lx}) \{ \exp[i(\Phi_{Lx} - \Phi_{Ly})] + 1 \} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$$E_4^* = \widehat{e}_x E_y \exp(i\Phi_{Ly}) \{ (\alpha - 1) \exp[i(\Phi_{Lx} - \Phi_{Ly})] + \alpha \} + \widehat{e}_y E_x \exp(i\Phi_{Lx}) \{ (\alpha - 1) \exp[i(\Phi_{Ly} - \Phi_{Lx})] + \alpha \} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Donde:

$$\Phi_{Lx,y} = \frac{2\pi n_{x,y} L}{\lambda} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

En la cual, L_x y L_y son la longitud de repetición (L) tomada desde el plano x y y, respectivamente.

Para la reflectancia (R) y transmitancia (T) del interferómetro Sagnac, se tiene:

$$R = \frac{|E_3^*|^2}{|E_i|^2} = 2\alpha(1 - \alpha)[1 + \cos(\Phi_{Lx} - \Phi_{Ly})] \quad (\text{Ec. 2.29})$$

$$T = \frac{|E_4^*|^2}{|E_i|^2} = 1 - 2\alpha(1 - \alpha)[1 + \cos(\Phi_{Lx} - \Phi_{Ly})] \quad (\text{Ec. 2.30})$$

La intensidad de salida del SI dependerá del corrimiento de fase entre las ondas, el cual puede ser modificado por una acción externa, lo cual conlleva a que el dispositivo sea un buen sensor. La profundidad de modulación (m) [9] se puede determinar por:

$$m = \frac{2\alpha(1-\alpha)}{1-2\alpha(1-\alpha)} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

$$I_R = 2T^2 R^2 [I + \cos(\Phi_{Lx} - \Phi_{Ly})] I_i \quad (\text{Ec. 2.32})$$

$$I_T = [R^4 + T^4 + 2T^2R^2 \cos(\Phi_{Lx} - \Phi_{Ly})]I_i \quad (\text{Ec. 2.33})$$

Donde

I_i es la irradiancia de entrada

Una de las variantes del interferómetro de Sagnac que aprovecha los efectos no lineales de las fibras ópticas es el interferómetro no lineal de Sagnac, también conocido como espejo de lazo óptico no-lineal (NOLM, por sus siglas en inglés) el cual posee conmutación óptica dependiente de la potencia debido a los cambios de fase inducidos en su sistema [12].

2.6 NOLM

En la actualidad el espejo de lazo óptico no lineal es un dispositivo muy investigado, debido a su dependencia de potencia, usándose como una especie de absorbedor saturable artificial [12]. Para obtener este dispositivo se introduce algún elemento no lineal en el interferómetro Sagnac produciendo una diferencia de fase no lineal, comúnmente se logra introduciendo tramos largos de fibra óptica o utilizando altas potencias, además, si se incorpora un amplificador en un espejo de bucle se tiene una variante del NOLM llamada Lazo amplificador no lineal (NALM, en inglés Non-Linear Amplifier Loop Mirror) [12].

El NOLM suele emplearse en muchos dispositivos por sus aplicaciones de demultiplexado, configuración de fase y láseres de amarre de modos. Los láseres de fibra de amarre de modos suelen ser láseres de figura de ocho (F8L), en el cual suele emplearse el NOLM o el NALM [13].

Como ya se mencionó, para que conmute el dispositivo NOLM suele emplearse la rotación no-lineal de polarización (NPR, en inglés Non-linear Polarization Rotation), logrando que el dispositivo sea más flexible para aplicaciones en sistemas de óptica ultrarrápida [14]. Para esta técnica suele emplearse una placa de cuarto de onda (QWR, en inglés Quarter Wave Retarder) la cual crea una diferencia de polarización entre los haces que interfieren

dependiendo de la potencia de los haces que se contra-pongan, logrando de esta manera la conmutación del NOLM [14].

Una manera sencilla de estudiar el comportamiento del interferómetro Sagnac y del NOLM en las simulaciones o análisis numérico, es el uso de las Matrices de Jones para representar los cambios en los estados de polarización de los dispositivos ópticos.

2.7 Matrices de Jones

Cuando la luz se propaga en un medio lineal, sufre cierto cambio en la polarización, la cual puede describirse usando el formalismo del vector de Stokes o por la matriz de coherencia conocida como la matriz de polarización [15]. El medio modifica el estado de polarización de la luz cuando ésta interactúa con el primero, entonces el efecto del medio se representa con un operador lineal el cual actúa sobre los vectores de Jones o de Stokes [16].

El formalismo de Jones es una manera para describir el estado de polarización de la luz, el cual puede representarse con una onda transversal que se propaga en dirección z [16], al momento de trabajar con este formalismo se tienen que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El haz es infinito, monocromático y de modo TEM (transversal electromagnético) [16].
2. La interacción entre el haz incidente y el dispositivo óptico es lineal, conservando la frecuencia de la luz [16].
3. El elemento óptico ubicado en el camino del rayo de luz modifica solo el estado de polarización de la onda de luz [16].
4. No se tiene en cuenta la componente magnética de la onda de luz [16].

La luz polarizada se puede descomponer en los modos TEM, siendo:

$$E_x(z, t) = E_{x0} \cos(\omega t - kz + \Phi_x) \quad (\text{Ec. 2.34})$$

$$E_y(z, t) = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \Phi_y) \quad (\text{Ec. 2.35})$$

Al combinar las ecuaciones 2.34 y 2.35, se obtiene el vector de Jones de luz polarizada, también conocido como vector de Maxwell o columna de Maxwell [17]:

$$E = \begin{bmatrix} E_{x0} e^{i\Phi_x} \\ E_{y0} e^{i\Phi_y} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

Si la luz se propaga en un medio birrefringente cambiará su vector de Jones, en el cual se tiene la matriz de Jones, que corresponde a matrices complejas 2x2, así un elemento óptico (polarizador, retardador, rotador) se puede simular empleando las matrices de Jones [18].

Tabla 2.1. Representación del estado de polarización por medio de vectores de Jones.

Estado de polarización de la luz	Vector de Jones
Polarización lineal horizontal	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización lineal vertical	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Polarización lineal a +45°	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
Polarización circular derecha	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$
Polarización circular izquierda	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$
Polarización elíptica derecha	$\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \begin{bmatrix} a \\ b - ic \end{bmatrix}$

Polarización elíptica izquierda

$$\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \begin{bmatrix} a \\ b + ic \end{bmatrix}$$

Cuando se maneja un solo haz de luz polarizada, los parámetros de Stokes son adecuados para describir cualquier estado de polarización, pero, cuando se utilizan para describir la superposición de varios haces polarizados, los parámetros de Stokes no son óptimos, es decir, se deben utilizar interferómetros que utilizan una sola fuente de luz para la superposición de haces [18].

Tabla 2.2. Matrices de Jones para componentes ópticos más utilizados.

Estado de polarización de la luz	Vector de Jones
QWR con su eje rápido en vertical	$e^{i\frac{\pi}{4}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$
QWR con su eje rápido horizontal	$e^{i\frac{\pi}{4}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$
Polarizador homogéneo circular a la derecha	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$
Polarizador homogéneo circular izquierdo	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{bmatrix}$
Polarización circular izquierda	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$
Polarización elíptica derecha	$\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \begin{bmatrix} a \\ b - ic \end{bmatrix}$
Polarización elíptica izquierda	$\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \begin{bmatrix} a \\ b + ic \end{bmatrix}$
Control de polarización en línea	$\begin{bmatrix} e^{-i\Gamma/2} & 0 \\ 0 & e^{i\Gamma/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sen\alpha \\ -\sen\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$

$\Gamma = \delta l$ y $\delta = 6 \times 10^{-11}$

No obstante, la simulación no es la única manera de observar el comportamiento de un interferómetro. La manera más conocida y utilizada es empleando y analizando la transformada rápida de Fourier (FFT, en inglés Fast Fourier Transform) del patrón de interferencia generado, con la finalidad de observar las frecuencias que interactúan en el interferómetro.

2.4 La transformada rápida de Fourier (FFT)

La FFT surge de la necesidad de calcular la transformada de Fourier discreta (DFT), donde la segunda se suele emplear para el procesamiento de datos y señales, logrando transformar señales periódicas discretas a señales en el dominio de la frecuencia, siguiendo la ecuación:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (\text{Ec. 2.37})$$

De este modo la FFT es un algoritmo que sirve para calcular la DFT, donde la primera es una representación de una función periódica como una sumatoria infinita de múltiples señales sinusoidales [19].

En general, se desea que las señales sean continuas y periódicas, sin embargo, en algunos casos las señales no son periódicas, teniendo discontinuidades. Por lo cual, para que los datos de la señal sean procesados correctamente se emplean ventanas, las cuales consisten en multiplicar el tiempo por una ventana de longitud finita, realizando una convolución. A continuación, se mostrarán algunos tipos de ventanas para filtrado de señales discontinuas:

- 1) Ventana rectangular: Es la ventana más simple, también es conocida como la ventana de Dirichlet y se define como [19].

$$w(n) = 1, 0 \leq [n] \leq N/2 \quad (\text{Ec. 2.38})$$

- 2) Hanning: Es Útil para analizar regímenes más largos que la duración de la ventana [19].

$$w(n) = 10.5 - 0.5 \cos(2 \pi n/N) \quad (\text{Ec. 2.39})$$

Con N=32.

- 3) Blackman-Harris: Esta ventana emplea los coeficientes de la Tabla de Blackman-Harris (Tabla 2.3), donde si se emplean los tres primeros términos de la ecuación 2.37 se tendrá un lóbulo lateral de -70 dB, mientras que, si se ocupan todos los términos de la misma ecuación se tendrá un lóbulo lateral por debajo o igual a -92.01 dB [20].

$$w(n) = a_0 + a_1 \cos(2 \pi n/N) + a_2 \cos(4 \pi n/N) + a_3 \cos(6 \pi n/N) \quad (\text{Ec. 2.40})$$

Tabla 2.3. Coeficientes de Blackman-Harris [23]

	Mínimo tres términos (-70.83 dB)	Tres términos (-62.05 dB)	Mínimo cuatro términos (-92.01 dB)	Cuatro términos (-74 dB)
a_0	0.42323	0.44959	0.35875	0.40217
a_1	0.49755	0.49364	0.48829	0.49703
a_2	0.07922	0.05677	0.14128	0.09892
a_3	-	-	0.01168	0.00188

- 4) Superior plana: También es conocida como Flat-top y es llamada así por su estructura casi o totalmente plana del lóbulo principal [23].

$$w(n) = a_0 + a_1 \cos(2 \pi n/N) + a_2 \cos(4 \pi n/N) + a_3 \cos(6 \pi n/N) + a_4 \cos(8 \pi n/N) \quad (\text{Ec. 2.41})$$

Estas cuatro ventanas son las más utilizadas, y son las ventanas de filtrado para la FFT que emplea el osciloscopio *InfiniiVision MSOX6004A*, siendo este uno de los instrumentos que

emplearemos para las pruebas de nuestro sistema. Las características principales del osciloscopio se verán más adelante en el capítulo 3, sección 3.2.2.

En el dispositivo fabricado se emplearán los conceptos mencionados con anterioridad ya sea para el estudio del comportamiento o para el análisis de los resultados tanto en régimen continuo como pulsado.

2.7 Pulsos de ruido

Antes de adentrarnos a este tema, debemos saber que las ondas monocromáticas están compuestas por una sola longitud, color o frecuencia, de este modo se puede generar un láser que emita radiación de una sola longitud de onda en forma de pulsos, donde el pulso resultante es graficado como la potencia del láser en función del tiempo [21], lo que muestra la cantidad de energía que contiene el pulso, como se muestra en la Figura 2.7.

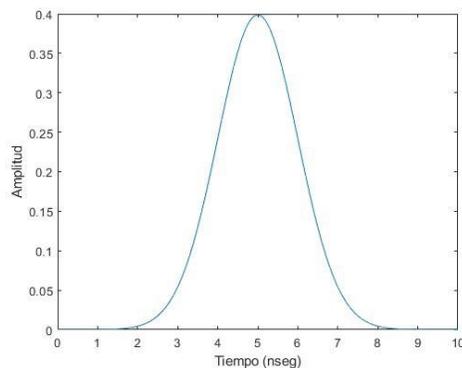


Fig.2.7. Pulso de un láser.

Por otra parte, los pulsos de ruido (NLPs) también conocidos como Noise-like pulses o pulsos similares al ruido, son pulsos altamente complejos, que poseen un rango de duración del orden de picosegundos hasta los microsegundos [22]. Esta clase de pulsos se conforma internamente de miles de pulsos compactos que están por debajo de los picosegundos, y entre sus características se encuentran que la duración y amplitud de los subpulsos varía aleatoriamente [22] como se muestra en la Figura 2.8 correspondiente a la simulación de esta clase de pulsos. Al ser pulsos con dinámicas complejas y duraciones

cortas, muchos aparatos de medición no cuentan con la resolución para detectarlos y las mediciones que presentan son el resultado de la curva envolvente de estos pulsos [23].

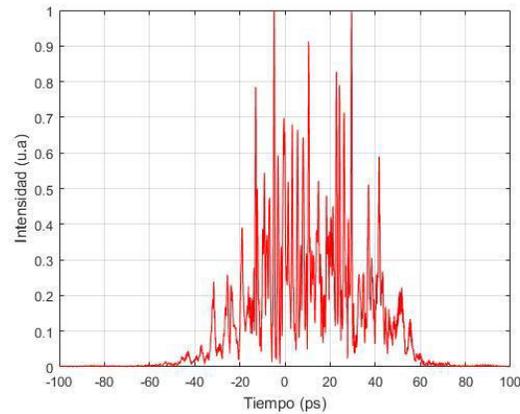


Fig.2.8. Simulación de un pulso de ruido (NLPs).

Los aparatos electrónicos como los fotodetectores y los osciloscopios promedian los subpulsos, presentando una envolvente del pulso, que muestra características más finas y suave, lo cual nos lleva a tener un perfil temporal más simple; como se muestra en la Figura 2.9.

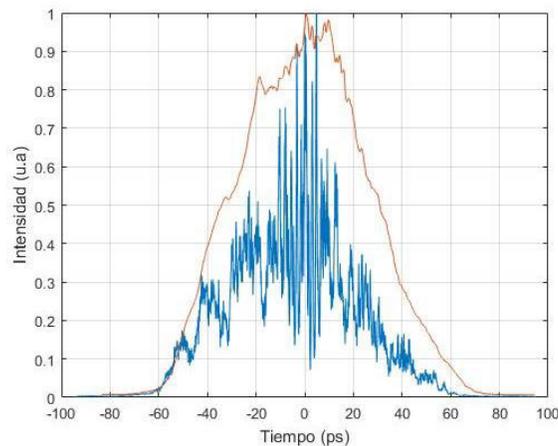


Fig.2.9. Simulación de un pulso de ruido (NLPs) con envolvente.

Comúnmente, se tiene la creencia que los pulsos de ruido no son favorables para aplicaciones, debido a su alta inestabilidad y su gran complejidad, sin embargo, debido a la gran cantidad de componentes temporales y frecuenciales es posible que se puedan aprovechar para realizar diferentes aplicaciones, como es el caso de nuestro dispositivo,

en el cual se utilizará una fuente de bombeo (ésta se mostrara más adelante en el capítulo 3) que genere pulsos de ruido para observar cómo estos afectan en la detección de la señal resultante.

Una vez descritos los conceptos teóricos del diseño y análisis de interferómetros en el siguiente capítulo, se describirá el desarrollo de un interferómetro en anillo, basado en un interferómetro Sagnac para la detección de señales de vibración, mostrando los elementos que conforman nuestro dispositivo, así como las herramientas y técnicas que se emplearon para realizar la detección de la respuesta.

2.10 REFERENCIAS

- [1] E. Hecht, Óptica, tercera edición, editorial Addison Wesley Iberoamericana S.A, pp. 198-200, pp. 384, 2000.
- [2] R. Ledesma, Transmisión y recepción de dos canales de voz por fibra óptica con premodulación digital, Universidad de las Américas Puebla, pp. 3-18, 2005.
- [3] M. Calvo, Óptica avanzada, pp. 207-243, 2002.
- [4] E. Izquierdo, C. Hasis, Guía de trabajo para el estudio de oscilaciones y onda, S/F.
- [5] N. Casillas, Implementación del interferómetro cíclico para la demostración experimental de las leyes de Fresnel-Arago, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 8-11, pp. 49-55, 2014.
- [6] V. Romero, Introducción a la Física Cuántica, 2018.
- [7] N. Morales, Interferómetro de Mach-Zehnder, 2014.
- [8] V. Guzmán, Investigación y diseño de sensores de fibra óptica por interferometría, Universidad Autónoma de Nuevo León, pp. 2-6, 2014.
- [9] I. Huixtla, Láser de fibra óptica térmicamente sintonizable por un filtro compuesto por dos interferómetros de Sagnac, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, pp. 16-33, 2008.
- [10] M. Villareal, Interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo e implementación de un control de temperatura PID, Universidad Autónoma de Nuevo León, pp. 13, pp. 18-26, 2019.
- [11] C. Juárez, Caracterización y control del estado de polarización de la luz en un interferómetro de Sagnac, Universidad de Quintana Roo, pp. 34-

39, 2020.

- [12] Zhao J., Zhou J., Yuyuan J., Deyuan S., Andréi K., Nonlinear Absorbing-Loop Mirror in a Holmium-Doped Fiber Laser, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 38, N° 21, 2020, [doi: 10.1109/JLT.2020.3005611](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3005611).
- [13] B. Ibarra, E. Kuzin, D. Gomez, F. Gutierrez, S. Mendoza y J. Haus, A mode-locked fiber laser using a Sagnac interferometer and nonlinear polarization rotation, *IOPScience, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, [doi: 10.1088/1464-4258/5/5/370](https://doi.org/10.1088/1464-4258/5/5/370).
- [14] A. González, Aplicaciones del interferómetro de Sagnac de fibra en tecnología de telecomunicaciones y para la generación de pulsos ópticos ultracortos, *Centro de Investigaciones en Optica, A.C.*, pp. 1-18, 2010.
- [15] J. Gutiérrez, Análisis de polarización de la interacción Luz-Materia en medios anisotrópicos, *Centro de Investigaciones en Optica, A.C.*, pp. 30-31, 2008.
- [16] C. Bonin, Formalismo de Jones: interacción de luz polarizada con diferentes componentes ópticos, *Instituto de Física del Litoral*, 2017, [doi: 10.13140/RG.2.2.35209.44649/2](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35209.44649/2).
- [17] J. Beyerer, F. León and C. Frese, *Machine vision: Automated visual inspectio: Theory, practice and applications*, 2015, [doi:10.1007/978-3-662-47794-6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47794-6).
- [18] J. Filoteo, Análisis y desarrollo de un filtro DMZI-SI aplicado a la obtención de una fuente láser de múltiples longitudes de onda y conmutable, *Universidad de Guanajuato*, pp. 35-44, 2021.
- [19] M. Bringas, *Transformada rápida de Fourier*, s/f.
- [20] K. Prabhu, *Window functions and their applications in signal processing*,

Primera Edición, CRC Press, pp. 148-153, 2014,
<https://doi.org/10.1201/9781315216386>.

- [21] Rami Arieli, A. Requena, C. Cruz, A. Batian y J. Zuñiga, The Laser Adventure, Weizmann Institute of Science, Rehovot, ISRAEL /Universidad de Murcia, Capitulo 7 Sección 3, 1997.
- [22] H. Hernandez, Estudio y caracterización de pulsos de ruido generados por láseres de fibra en amarre de modos pasivo, Centro de investigaciones en Optica, A.C., pp. 7-10, 2015.
- [23] Y. García, Diseño experimental de láseres de fibra óptica con la técnica amarre de modos pasivo en la región 1.5-2 micas empleando fibras de doble revestimiento con tulio y erbio/iterbio, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, pp. 157-158, 2022.

Capítulo 3

Diseño de un interferómetro de anillo basado en un interferómetro Sagnac.

En este capítulo se darán a conocer los dispositivos ópticos, electrónicos y de medición empleados para la realización de pruebas, estos divididos en secciones con especificaciones de los elementos. Posteriormente en la sección 3.4 se expondrá como se realizaron los diferentes prototipos del interferómetro de anillo basado en un Sagnac, así como las complicaciones de cada uno.

Más adelante en el capítulo 4 se mostrarán los resultados más interesantes obtenidos con los diferentes modelos propuestos.

3.1 Elementos ópticos empleados

A continuación, se mencionarán los elementos empleados para la elaboración del dispositivo interferométrico de anillo.

3.1.1. Acoplador de fibra óptica

Los acopladores de fibra óptica o conocidos también como combinadores de fibra son dispositivos ópticos pasivos, que tienen la función de interconectar o separar de manera fácil y rápida diversas señales [1]. Dichos dispositivos pueden tener muchas conexiones, con la finalidad de que pueda soportar fibras monomodo o multimodo [2].

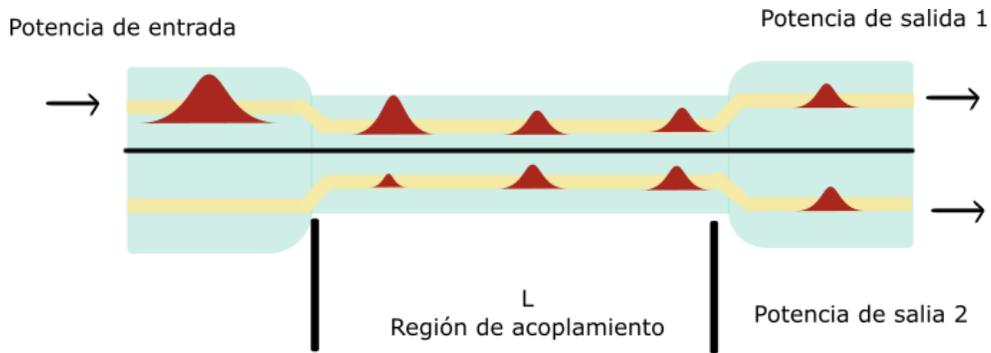


Fig.3.1 Funcionamiento de un acoplador de fibra.

Existen diversas técnicas para fabricar acopladores de fibra óptica. Uno de los métodos, es la fusión de fibras ópticas, donde se retira el recubrimiento para posteriormente estirarlas y fusionarlas por medio de una flama controlada [1]. En la actualidad, se tienen dispositivos especiales que son comercializados, suelen tener diferentes números de puertos 1x2, 1x4, 2x2, 4x4, etc., con el propósito de dividir salidas y entradas permitiendo conectar ya sea diferentes tipos de bombeo o diferentes tipos de salidas. Cabe resaltar que los acopladores trabajan a bombeos diferentes, es decir, es esencial verificar la longitud de onda a la que se está trabajando.

En el caso del dispositivo en anillo se emplearon los dos métodos más comunes, la fabricación de uno por fusión y emplear un acoplador comercial.

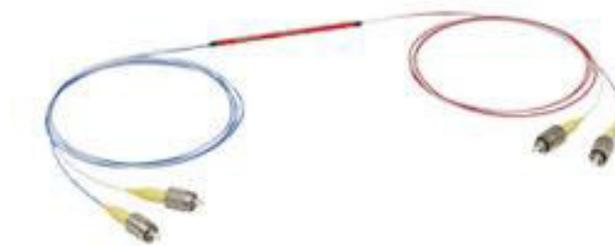


Fig.3.2 Acoplador de fibra 2x2 a 1550 nm, TW1550R5F2 marca Thorlabs® [3].

El acoplador comercial es un TW1550R5F2 50/50 donde el 50% de la señal viaja por el dispositivo, mientras que el restante va a la salida, este dispositivo es marca Thorlabs® y trabaja a una longitud de 1550 ± 100 nm.

3.1.2. Fibra mantenedora de polarización

Las fibras mantenedoras de polarización de alta birrefringencia (HI-BI PM), como su nombre lo dice poseen un alto valor de birrefringencia, con la finalidad de mantener el estado de polarización de la señal óptica [4]. Estas fibras poseen el fenómeno de dispersión por modo de polarización (PMD), dicho fenómeno degrada los pulsos ópticos propagados por la fibra provocando un ensanchamiento temporal [5].

En fibras ópticas la birrefringencia está presente desde sus procesos de fabricación, debido a su forma, tensiones, entre otros factores; lo cual afecta a los haces de luz incidente en mayor o menor medida [4], provocando que los estados de polarización viajen a distintas velocidades, provocando un retraso en los estados de polarización denominado retardo diferencial de grupo (DGD) indicándonos la magnitud de la PMD [4].

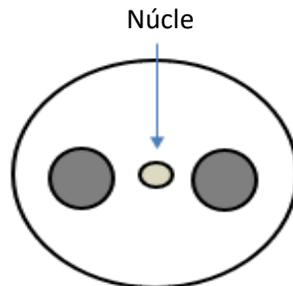


Fig.3.3 Fibra PM 15-U25A de manera interna

En este trabajo se utilizó una fibra mantenedora de polarización tipo panda, modelo PM 15-U25A, con longitud de repetición en un rango de 3-5 mm; esta fibra posee dos cilindros de vidrio dopado con boro colocados en lados opuestos del núcleo [6].

Tabla.3.1. Parámetros de fibra PM 15-U25A [7]

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
Diámetro del revestimiento	125 μm
Longitud de onda de operación	1550 nm

Birrefringencia	4×10^{-4}
Máxima atenuación	$\leq 2 \text{ dB/km}$

3.1.3. Control de polarización

Muchos fenómenos presentados en una fibra óptica son inducidos por múltiples factores como es el caso de la polarización en fibras monomodo. Existen diversas formas de inducir polarización en las fibras, induciendo curvatura, presión y torsión; para inducir estos fenómenos de manera más precisa se emplean los controladores de polarización manuales.

Los controles de polarización (PC) manuales presentan una forma simple y son muy útiles para cambiar el estado de polarización, su funcionamiento consiste en la creación de birrefringencia, la cual crea un eje rápido produciendo una mayor velocidad en la señal y debido a la diferencia se crea un estado diferente de polarización al interior de la fibra mediante un esfuerzo externo [8].

Los controles de polarización comercializados pueden tener diversos números de placas, siendo los más comunes los de tres y dos placas. Un control de polarización de tres placas su configuración más habitual es $\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$ [8].



Fig.3.4 Placa controladora de polarización (PC) FPC560, $\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$, marca Thorlabs ® [9]

En las placas controladoras de polarización manuales, la birrefringencia está en función del diámetro de las placas, número de vueltas, diámetro de la fibra empleada y la longitud de operación, teniendo retardo (ϕ):

$$\phi = \frac{2\pi^2 a N d^2}{\lambda D} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$\phi = \frac{\pi a N d^2}{\lambda D} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

a es una constante, siendo 0.133 [8] para fibras de silicio

N es el número de vueltas en cada placa

d el diámetro del revestimiento del núcleo

λ es la longitud de operación

D es el diámetro de cada placa

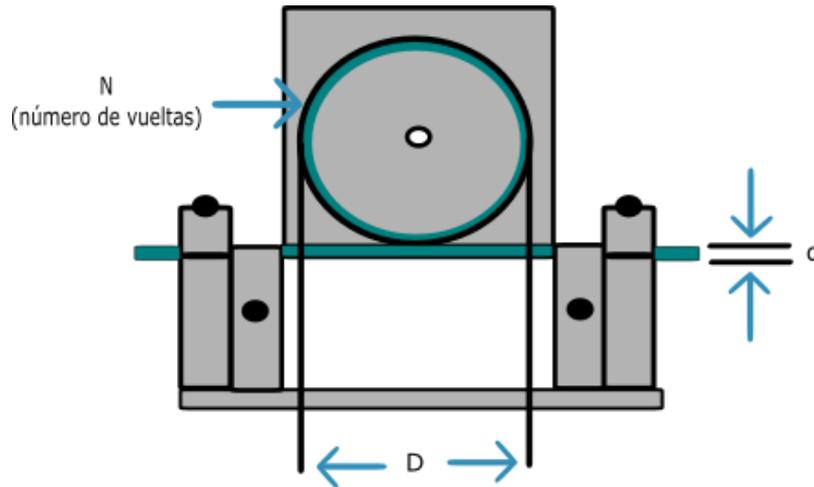


Fig.3.5 Placa controladora de polarización con parámetros de número de vueltas en cada placa, diámetro de revestimiento y diámetro de la placa

Existen otros dispositivos controladores de polarización como es el caso del PC lineal CPC250, de la marca Thorlabs, el cual emplearemos para nuestro interferómetro en anillo. Dicho dispositivo funciona ejerciendo presión y rotando la fibra. Al ejercer presión se produce una birrefringencia lineal, obteniendo dos modos generados que son predominantemente polarizados en dos direcciones ortogonales, de este modo al aplicarle un esfuerzo externo, en este caso presión es posible generar cualquier estado de polarización [10].



Fig. 3.6. Control de polarización lineal CPC250, marca Thorlabs® [11]

3.1.4. Láser de figura ocho

El arreglo láser empleado en este trabajo es un láser con configuración de anillo que emplea un absorbedor saturable, el cual utiliza la técnica de amarre de modos pasivo aplicando un NOLM, el cual funciona como un absorbedor saturable (SA) por sus características y es el que le da su forma de figura ocho.

El amarre de modos pasivo emplea un absorbedor saturable, el cual opera en régimen no lineal, sin necesidad de un dispositivo externo, siendo de esta manera un dispositivo totalmente pasivo [12]. De este modo, el NOLM atenúa componentes con potencias menores a la potencia de entrada ocasionando un efecto de compresión de pulsos con duración del orden de los femtosegundos (fs) [12].

El láser, además de emplear un NOLM, consta de una fibra dopada de erbio (EDF) para amplificar la señal, placas controladoras de polarización HWR (placa retardadora de media onda) ($\lambda/2$) y QWR ($\lambda/4$), las cuales sirven para ajustar las características de conmutación y un control de polarización PC el cual se utiliza para modificar la transmisión [12].

Este tipo de láseres puede operar en diferentes regímenes, lo cual permite que la sensibilidad del interferómetro de anillo varíe dependiendo del perfil de entrada, una gran ventaja, pues es posible observar distintos comportamientos utilizando un solo dispositivo.

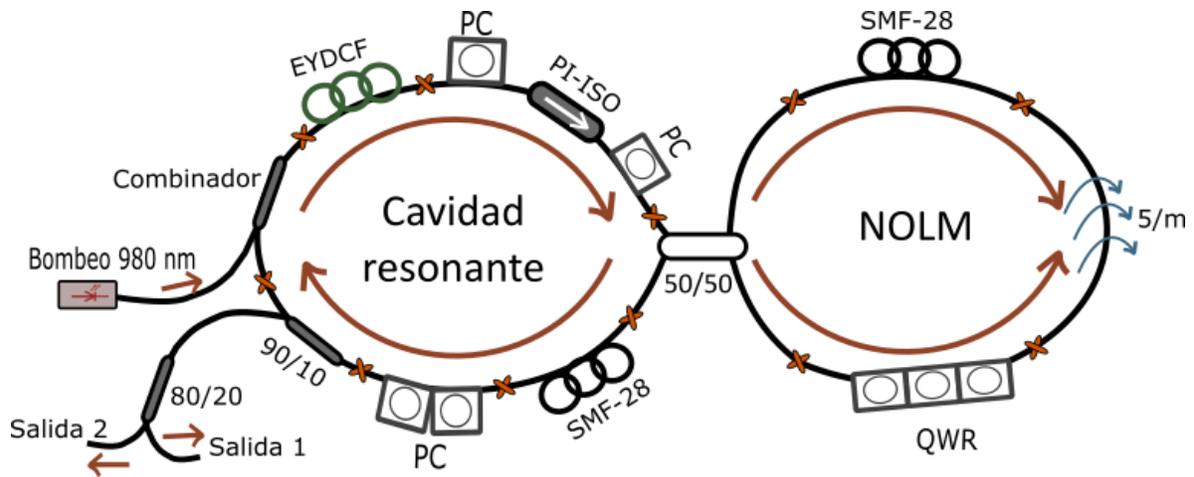


Fig. 3.7. Esquema láser de figura ocho, empleado como fuente de bombeo para el dispositivo realizado

Cabe resaltar que este láser cuenta con una placa automatizada lo cual permite identificar las regiones de operación con mayor facilidad.

3.1.5. Aislador de fibra óptica

Un aislador óptico (ISO) es de suma importancia para tener una estabilidad en el sistema óptico, así como eliminar las reflexiones de los dispositivos, protegiendo fuentes de bombeo de haces de luz reflejada [13]. Para este trabajo se empleó un aislador IOSS5111111 para evitar las reflexiones que se puedan presentar en el interferómetro de anillo y no reingresaran a la cavidad láser.



Fig. 3.8. Aislador IOSS5111111, marca Oplink® [14]

El aislador empleado es un IOSS5111111, oplink, el cual trabaja a 1550 nm con una dependencia de polarización de < 0.02 dB, con una pérdida de retorno de ≥ 65 y una pérdida de retorno salida de ≥ 60 .

3.2 Equipo de medición y detección

Para analizar nuestro dispositivo se emplean diversos aparatos de medición con la finalidad de corroborar los datos simulados, a continuación, se mencionarán las características y funcionamiento de los materiales y herramientas utilizados como son: analizador de espectros portátil, el osciloscopio de rápida adquisición, el analizador de espectros óptico y los fotodetectores, máquina estrechadora de fibra óptica, y acelerómetro/giroscopio de Arduino.

3.2.1. Analizador de frecuencia portátil

El analizador de frecuencia sirve principalmente para medir la repetición de longitudes de onda de una señal, detecta la amplitud de esta en dominio de la frecuencia.

Para el estudio de nuestro dispositivo se empleó un analizador de espectros marca tinySA® con dos entradas una de 0.1-350 MHz con resolución de frecuencia de 156 Hz por debajo de una salida de 47 MHz o 312 Hz por encima de una salida de 47 MHz y otra de 240 MHz-960 Hz la cual posee una resolución de frecuencia de 156 Hz por debajo de una salida de 480 MHz o 312 Hz por encima de una salida de 480 MHz; tiene un nivel de entrada máximo sin atenuación de +10 dBm y un error de ± 2 dB, una velocidad de escaneo de más de 1000 puntos/segundo. Posee una batería recargable de máximo de 2 horas, nivel máximo de entrada de 10 dBm, con 290 puntos de escaneo, cuenta con un software para la computadora llamado TinySA con el fin de analizar datos.



Fig. 3.9. Analizador de espectros, marca tinySA® [15]

3.2.2. Osciloscopio

Los osciloscopios son instrumentos de medición que sirven para representar gráficamente señales eléctricas que oscilan en el tiempo, donde el eje vertical muestra el voltaje y el horizontal las magnitudes de tiempo.



Fig. 3.10. Osciloscopio InfiniiVision MSOX6004A, marca KEYSIGHT® [16]

Para la realización de pruebas, así como la caracterización del interferómetro en anillo se empleó un osciloscopio InfiniiVision MSOX6004A (mostrado en la Figura 3.10), el cual cuenta con las siguientes características principales.

Tabla.3.2. Características principales del InfiniiVision MSOX6004A [16]

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
Voltaje máximo	Entradas analógicas: 300 Vrms, 400 Vpk, sobrevoltaje de transiente 1.6 kVpk, 50 Ω de entrada Entradas digitales: 40 V pico
Frecuencia	1 a 6 GHz
Resolución	2.5 pico segundos
Error de fase	1 MHz: <0.5 grados
Velocidad de muestreo	20 GSa/s
Impedancia	1 M Ω
Canales	4 canales y 16 canales digitales

Máxima memoria de profundidad	4 Mpts
Puerto USB para guardado de documentos	Formatos: scp, .bmp a 8 y 24 bits, .png a 24 bits, .hml, datos CSV, ASCII (.csv)

3.2.3. Analizador de espectros óptico (OSA)

El analizador de espectros óptico mejor conocido como OSA, permite medir la longitud de onda y el nivel de potencia óptica, en el eje y el cual indica la potencia y en el eje x la longitud de onda.

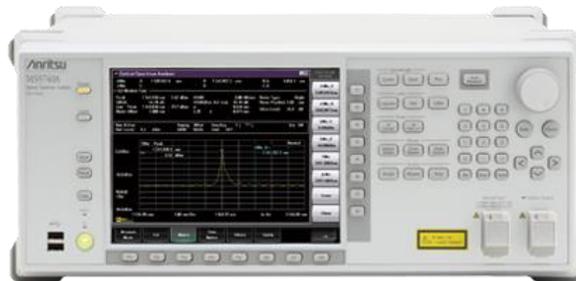


Fig. 3.11. OSA MS9740A, marca Anritsu® [17]

Para la medición de las señales en longitud de onda, se utilizó un OSA MS9740A, con las siguientes características:

Tabla.3.3. Características principales del OSA MS9740A [17]

Parámetros	Valores
Fibra óptica aplicable	Fibra estándar SM de 10 μm /125 μm Fibra multimodo de 50 μm /125 μm
Rango de medición de la longitud de onda	600 nm a 1750 nm
Precisión de longitud de onda	± 20 pm (1520 nm a 1620 nm, resolución: 0,03 a 0,2 nm) ± 100 pm (1520 nm a 1620 nm, resolución: 0,5, 1,0 nm)
Potencia máxima de entrada	+ 23 dBm

Resolución de ancho de banda mínimo	30 pm
Rendimiento dinámico	≥ 60 dB
Barrido	Ancho de barrido: 0.2 nm a 1200 nm Velocidad de barrido: $\leq 0,2$ s (intervalo de 5 nm)

3.2.4. Fotodetectores

Los fotodetectores son sensores que generan una señal eléctrica que depende de la radiación electromagnética que recibe, siendo mayormente la luz el estímulo empleado. Posee un filtro RC (el cual está compuesto por una resistencia y un capacitor) cuya función es filtrar el ruido de alta frecuencia de la entrada para que este no afecte las mediciones tomadas.



Fig. 3.12. Fotodetector DET08CFC, marca Thorlabs® [18]



Fig. 3.13. Fotodetector DET01CFC, marca Thorlabs® [18]

En el caso del interferómetro de anillo se emplearon dos fotodetectores (DET08CFC y DET01CFC) con la finalidad de medir simultáneamente la salida del láser F8L y del

dispositivo interferómetro realizado.

Tabla.3.4. Características principales de los fotodetectores [18]

	DET01CFC	DET08CFC
Longitud de onda	800-1700 nm	800-1700 nm
Detector	InGaAs	InGaAs
Banda Ancha	1.2 GHz	5 GHz
Potencia máxima	18 mW	100 mW
Voltaje de salida	0 a 1 V	2 V
Batería usada	A24 de 12 V y 20 mAh	A24 de 12 V y 20 mAh
Corriente (Id)	0.235 nA	1.5 nA

3.2.5. Máquina estrechadora de fibra óptica

Uno de los dispositivos empleados para la fabricación de los diseños de interferómetros de anillos es la máquina para fabricación de fibra óptica estrechada mediante fusión y estiramiento (MFFOE), su funcionamiento consiste en calentar la fibra óptica para después estirla, logrando adelgazar su diámetro [19].

La MFFOE está compuesta por un banco de estiramiento donde se encuentran los motores a paso, guías de desplazamiento, carros de fijación, un soplete y un controlador de flujo de gases, funciona por medio de un software de control Windows 7, el cual permite controlar la velocidad de los motores, así como la suministración de los gases de butano y oxígeno [20].



Fig. 3.14. Máquina estrechadora MFFOE

3.2.6. MPU6050

El MPU6050 es un módulo compatible con Arduino®, cuenta con un chip de seis grados de libertad ya que posee un giroscopio de tres ejes y un acelerómetro de 3 ejes. En el caso del interferómetro de anillo, se usó el acelerómetro para medir la aceleración de la pieza de Medium Density Fibreboard (MDF) que se mostrara en la sección 3.3, ya que ese incremento de rapidez debe de coincidir con la frecuencia de vibración.

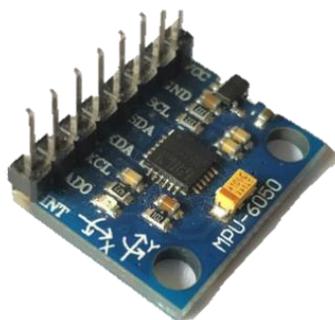


Fig. 3.15. Acelerómetro MPU6050 marca InvenSense®

Tabla.3.5. Características principales de MPU60S0 [21]

MPU6050	
Voltaje de operación	4.3 V ~ 9 V
Comunicación	Protocolos IIC e I2C estándar

Rango de aceleración	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$
Gama del giroscopio	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000 \text{ }^\circ/\text{s}$

Todos estos aparatos y dispositivos mostrados con anterioridad nos ayudaron en la realización de las pruebas correspondientes, ya sea para el análisis o la visualización de las señales de salida y entrada.

En la siguiente sección se mostrarán los diferentes arreglos propuestos mencionando sus ventajas e inconvenientes presentados a lo largo de la realización de las muestras.

3.3 Diseño de interferómetro en anillo

La elaboración, estudio, análisis y desarrollo de nuevos dispositivos trae consigo retos considerables, tanto para la fabricación como la caracterización de estos; lo que lleva consigo la aplicación de diversas técnicas, así como el estudio de nuevos diseños para facilitar aplicaciones.

Como se mencionó en capítulos anteriores, uno de los interferómetros más utilizados en la actualidad es el interferómetro Sagnac, debido a su fácil fabricación y entendimiento, debido a esto se realizó el análisis y estudio de un interferómetro en anillo basado en el interferómetro anteriormente mencionado.

3.3.1. Primer prototipo con fibra estrechada (Taper)

En el 2017 se realizó un estudio con fibras estrechadas por medio de la técnica de flama, la cual consiste en fusionar y estirar la fibra, reduciendo tanto el diámetro como el núcleo de la fibra, por lo cual, al reducirse el núcleo en la fibra óptica, el diámetro del modo fundamental es mayor en la zona del cuello lo cual conlleva a incrementar la superposición de los modos ópticos [19]. Basándonos en esto se utilizó la máquina estrechadora MFFOE, un láser de figura ocho como fuente de bombeo (Figura 3.7), fibra estándar SMF-28 y un analizador de espectros.

Como primer prototipo se utilizó fibra SMF-28 con longitud de dos metros, formando un

Sagnac con un anillo de diámetro de 5 cm y una longitud sin recubrimiento de 3.5-4 cm trenzado en 7 vueltas. Los parámetros que se emplearon en la MFFOE fueron oxígeno 1500 y butano 720, estos parámetros son los indicados en el hardware para tener una flama más pura que pueda fundir el silicio de la fibra óptica, se tiene longitud de 2 milímetros del desplazamiento del quemador, con parámetro de cuello a 10 micras y el proceso de estirado detenido en el 64%.

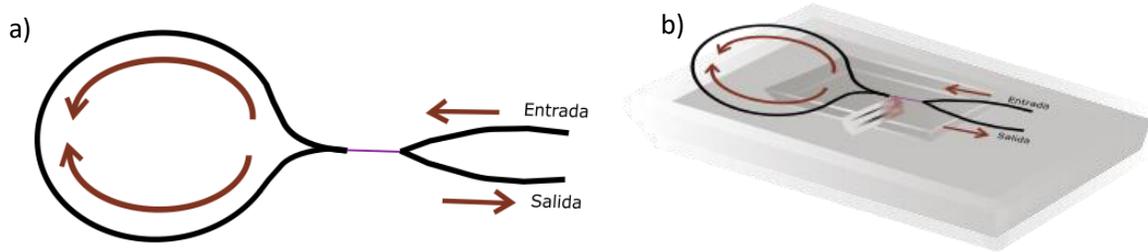


Fig. 3.16. a) Primer prototipo de interferómetro en anillo con fibra SMF-28 estrechada, b) fibra en anillo ubicada en máquina estrechadora para ser fusionada y estirada.

Se colocó el dispositivo encima de una estructura donde tenía contacto con un cono de material PLA (ácido poliláctico), sobre una bocina; la respuesta de la señal se observó por medio de un osciloscopio, donde, al generar ruido en el dispositivo el cono vibraba. El interferómetro de anillo presentó una buena respuesta en detección de sonido, siendo demasiado sensible, detectando sonidos exteriores que ocasionaban ruido en la señal de respuesta. Una vez estrechada la fibra estándar, el manejo del dispositivo es sumamente complicado debido a sus dimensiones, siendo más frágil y propenso a rupturas.

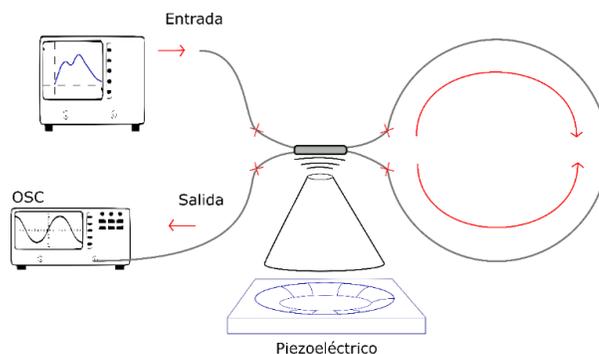


Fig. 3.17. Primer arreglo experimental con máquina MFFOE.

Se realizaron numerosas pruebas con el método de estiramiento y fusión, empleando fibra estándar y de dispersión desplazada, donde esta segunda tuvo mejores resultados, pero se descartó debido al alto costo de la fibra óptica. Así mismo se variaron los parámetros de velocidad de estiramiento y amplitud inicial de oscilación, para que el quemador de la flama pudiera recorrer los 3.5-4 cm de la fibra sin recubrimiento; de igual forma, las placas controladoras de polarización del láser F8L se fueron moviendo para analizar distintas regiones de operación, así como mayor sensibilidad. Con estos cambios aplicados, se pudo observar que el número de vueltas de trenzado influye en una mejor sensibilidad, por lo cual las vueltas deben ser iguales o superiores a 7 y se debe estar vigilando constantemente el porcentaje de progreso de fusión, debido a que entre 50% a 70% los interferómetros estrechados tienen una respuesta rápida y al sobrepasar el 70% el estrechamiento termina rompiendo la fibra. Otro factor importante en la fabricación es la presión inducida por los sujetadores que fijan la fibra a la banda de la MFFOE, ya que, al colocarlos, ocasionan birrefringencia en el dispositivo.

Para corroborar la parte experimental con la parte teórica se realizó un programa empleando las matrices de Jones y el software Matlab. El análisis numérico se muestra en el capítulo 4.

3.3.2. Segundo arreglo experimental con acoplador de fibra

Tomando en cuenta la simulación y los problemas presentados en el primer arreglo, se optó por realizar un interferómetro con elementos ópticos; donde, en lugar de emplear una fibra trenzada que mantiene el estado de polarización, se utiliza una fibra mantenedora de polarización, pues se ha visto que fibra torcida exhibe este tipo de comportamiento [12], agregando en este tramo un polarizador lineal, con el objetivo de manipular el estado de polarización de la luz. Así mismo a cambio de fusionar la fibra, que es la parte que nos causó mayores problemas en el dispositivo uno, usamos un acoplador 50/50; fabricando el dispositivo utilizando un acoplador y fibra mantenedora de polarización. Para tener un control de sensibilidad en el dispositivo se utilizaron en la entrada tres placas, una placa A de $\frac{\lambda}{4}$ (QWR) con 3 vueltas, una placa B $\frac{\lambda}{2}$ (HWR) con 6

vueltas y una placa $C \frac{\lambda}{4}$ (QWR) con 3 vueltas.

Para los diferentes experimentos en esta configuración, se utilizó el láser de figura ocho como entrada de nuestro dispositivo, con una corriente suministrada al láser de 3.0 y 3.5 Amperios, con potencia de 6 Watts o 7.14 Watts, correspondientemente.

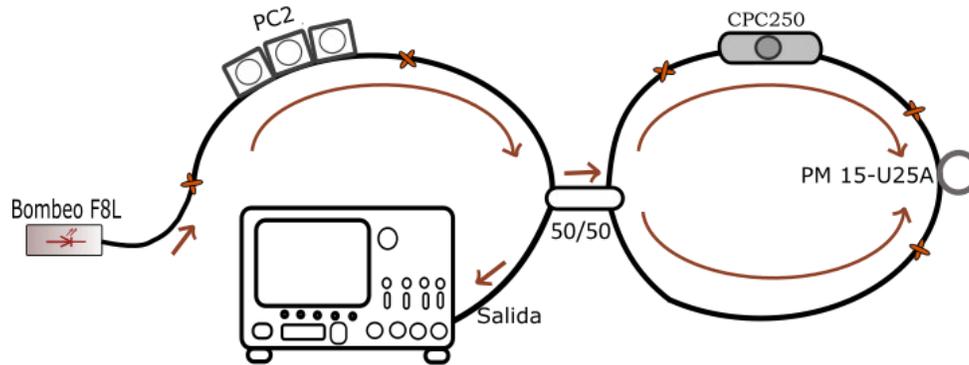
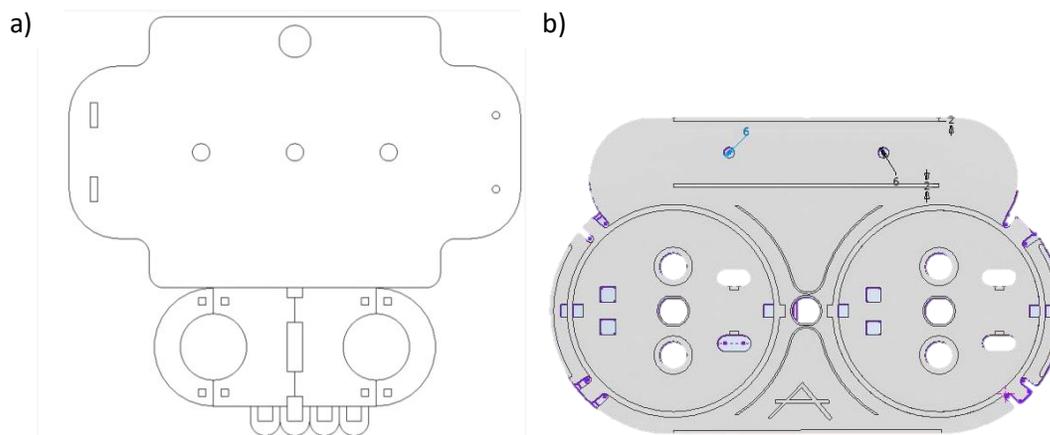


Fig. 3.18. Arreglo experimental con acoplador 50/50.

Se tuvieron diversos arreglos físicos en nuestro esquema, con la finalidad de obtener el mejor método para inducir vibraciones en el dispositivo, de este modo el dispositivo fue montado en una base fabricada de MDF, debido a que el material es ligero y económico. Para ajustar nuestro dispositivo fabricado se empleó una base impresa en PLA para posicionar el acoplador 50/50 y el polarizador lineal.



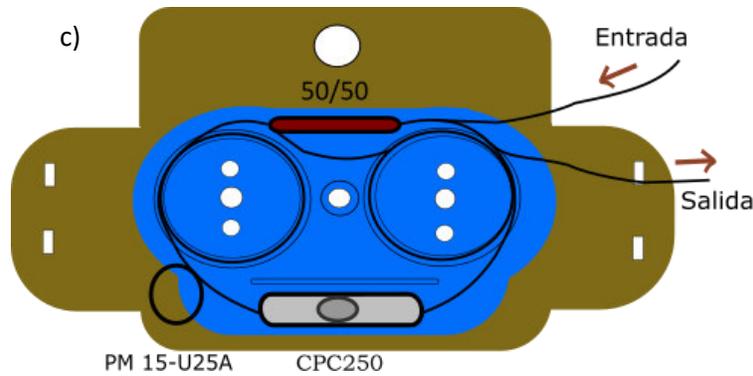


Fig.3.19, a) diseño de la base para motores y dispositivo, b) base de montura en impresión 3D, para el acoplador y control de polarización lineal de fibra óptica, c) interferómetro montado en las placas.

3.3.2.1. Sensor con acoplador empleando dos motores DC

La primera variante de nuestro esquema de la Figura 3.18 (la cual llamaremos tercer prototipo), empleó dos motores desbalanceados de corriente directa (DC, Direct Current) al extremo del dispositivo, los cuales se conectaron a una fuente de alimentación para variar su voltaje de 0 a 5 Volts.

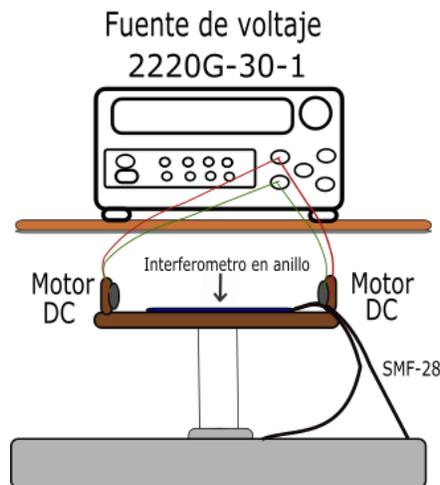


Fig.3.20. Arreglo experimental con dos motores.

Al tener dos motores surgían inconvenientes, pues un motor se desfasaba con respecto al otro, a pesar de encenderlos al mismo tiempo, lo cual ocasionaba que nuestra respuesta no fuera confiable.

3.3.2.2. Sensor con acoplador empleando acelerómetro de Arduino

Con los problemas presentados en la primera variante, se optó por usar un solo motor en el cual el voltaje suministrado se hacía por medio de un Arduino variando un potenciómetro teniendo un motor desbalanceado con 1000 revoluciones por minuto (para medir las revoluciones del motor se empleó la aplicación móvil StrobeLight). En el otro extremo de la placa se fijó un acelerómetro para Arduino MPU6050, con la finalidad de mostrar la aceleración que el motor presentaba al variar su velocidad. El programa aplicado para esta configuración se encuentra en el anexo 1.

Otro cambio incorporado en la realización de esta variante, así como en las variantes futuras, fue la incorporación de un aislador IOSS5111111 a la entrada del interferómetro de anillo debido que al emplear una configuración basada en un interferómetro Sagnac se presentaba cierta reflexión que afectaba a la salida del láser F8L, esto se solucionó con el dispositivo IOSS5111111.

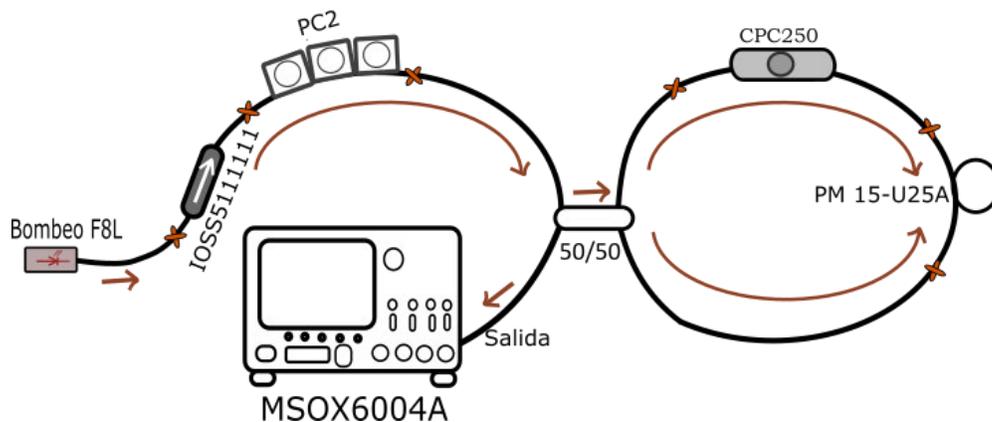


Fig. 3.21. Arreglo experimental empleando un aislador a la entrada del interferómetro en anillo.

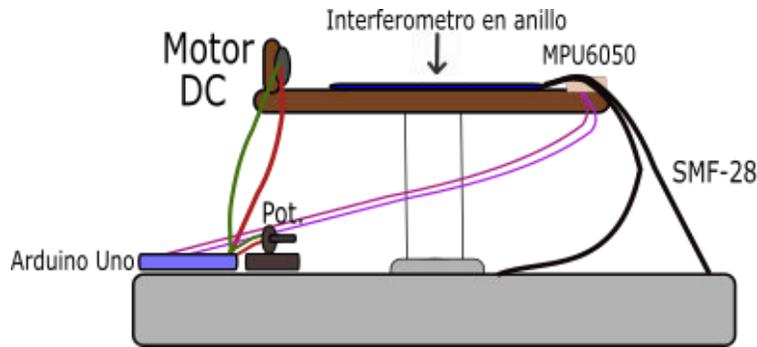


Fig. 3.22. Arreglo experimental con acoplador 50/50 y un solo motor, variando sus revoluciones por medio de un potenciómetro.

En esta variante se varió el voltaje de 0 a 5 Volts con intervalos de 0.5, donde se grababa la señal obtenida al subir el voltaje y posteriormente se bajaba a cero en cada caso, para posteriormente subir de nuevo el voltaje y grabar la señal; también se aumentó el voltaje gradualmente de 0 a 5 Volts en intervalos de 1 Volt, estos resultados serán expuestos más adelante.

3.3.2.3. Sensor con acoplador empleando un Arduino

Para tener un mayor control en la visibilidad de resultados, el código de Arduino se modificó para que el estado del motor variara abruptamente entre encendido y apagado cada determinado tiempo (este código se presenta en la sección de anexos).

Con el fin de observar las regiones en las cuales nuestro dispositivo presentaba comportamientos interesantes, se modificó la posición de las placas controladoras de polarización de la entrada del sistema, es decir, las placas que se variaron fueron: la placa automatizada de $\lambda/4$ con tres vueltas, así como la placa HWR ($\lambda/2$) con seis vueltas y las QWR ($\lambda/4$) con tres vueltas dentro de la cavidad láser de figura ocho y las placas A, B y C de entrada de nuestro dispositivo. Modificando estos parámetros se obtuvieron múltiples regiones de interés, no obstante, únicamente nos centramos en las regiones donde el ancho del pulso varía conforme aumentan las vibraciones del sistema; estos resultados, al igual que todos los demás, serán presentados en la sección de resultados del capítulo 4.

3.3.2.4. Sensor con acoplador empleando un motor de DC

Con la finalidad de tener pruebas más precisas se modificó el arreglo manteniendo un sólo motor, pero descartando el Arduino y sustituyéndolo por una fuente controlada de voltaje, donde se varió nuevamente el voltaje de 0-5 Volts, grabando las señales resultantes en el osciloscopio y en analizador de espectros ópticos.

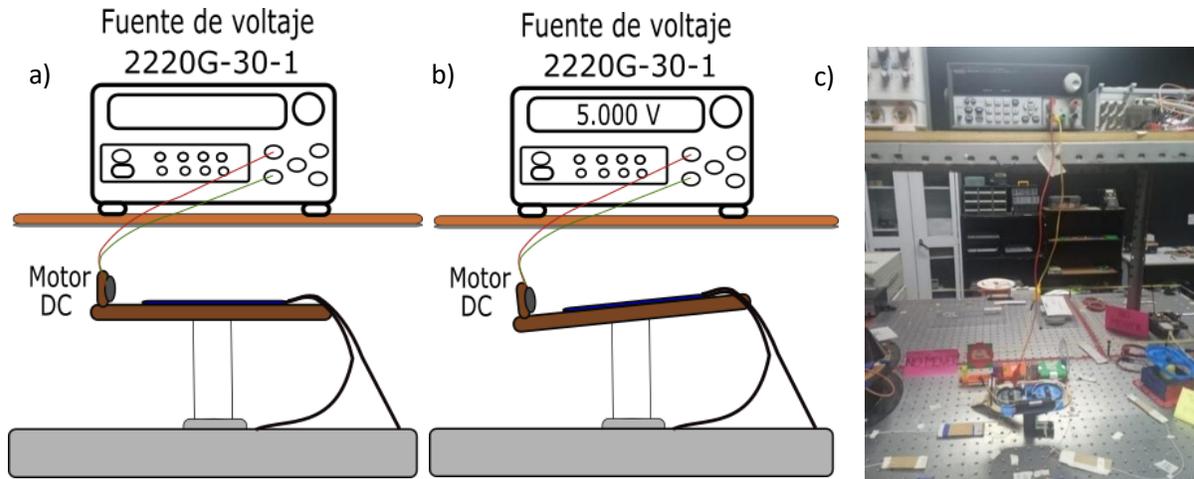


Fig. 3.23. Representación del movimiento vibratorio de la placa de MDF a) motor apagado, b) motor encendido, c) vista real del arreglo

3.4 REFERENCIAS

- [1] J. Álvarez, Fabricación y caracterización de acopladores de fibra óptica unimodo, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 40, 44, 1994.
- [2] V. Guzmán, Investigación y diseño de sensores de fibra óptica por interferometría, Universidad Autónoma de Nuevo León, pp. 17-18, 2014.
- [3] Thorlabs ®, hoja de datos de acoplador de fibra 2x2, modelo TW1550R5F2.
- [4] J. Cadena, Análisis y simulación del fenómeno de dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas ITU-T G.655, Escuela politécnica nacional, pp. 28, 45-46, 2017.
- [5] J. Cadena y M. Jiménez, Análisis y simulación del fenómeno de dispersión por modo de polarización (PMD) en fibras ópticas ITU-T G.655, Revista Politécnica, Vol. 43, N°2, 2019.
- [6] L. Donals y R. Tumminelli, Explicación de las fibras que mantienen la polarización, Fiber Optics Center, 2021.
- [7] FOSCO® hoja de datos PMF tipo PANDA, modelo PM 15-U25A, <https://www.fiberoptics4sale.com/products/pm15-u25a>
- [8] S. Cotrino y J. Jiménez, Análisis de funcionamiento de control manual de polarización, Universidad de los Andes, 2021.
- [9] Thorlabs ®, hoja de datos de controlador de polarización, modelo FPC560.
- [10] J. Filoteo, Análisis y desarrollo de un filtro DMZI-SI aplicando a la obtención de una fuente láser de múltiples longitudes de onda conmutable, Universidad de Guanajuato, pp. 54, 57, 2021.

- [11] Thorlabs®, hoja de datos de control de polarización, modelo CPC250, https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9_PF.cfm?ObjectGroup_ID=2161
- [12] J. Hernández, Estudio teórico-experimental de un láser de figura ocho y su aplicación en la generación de supercontinuo en fibras ópticas; estudio de la generación de supercontinuo en fibras microestructuradas a partir de pulsos de nanosegundos, Centro de Investigaciones en óptica, A.C., pp. 78-83, 2012.
- [13] C. Ayala y D. Tentori, Caracterización de un aislador de fibra insensible al estado de polarización, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, Vol. e-Gnosis, 2009.
- [14] Oplink®, hoja de datos del aislador IOSS5111111.
- [15] tinySA®, hoja de datos del analizador de espectros básico.
- [16] Keysight Technologies®, manual InfiniiVision 6000 X-Series Oscilloscopes.
- [17] Anritsu®, manual Advancing beyond, Optical Spectrum Analyzer (OSA) MS9740A.
- [18] Thorlabs®, High-Speed Fiber-Coupled Detectors, Fiber-Coupled InGaAs Detectors: 800-1700 nm.
- [19] G. Ramírez, Interacción acusto-óptica en fibra óptica basada en ondas de reflexión: moduladores y láseres de fibra óptica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, pp. 48-62, 2017.
- [20] MFFOE, manual máquina para la fabricación de fibras ópticas estrechadas mediante fusión y estiramiento (MFFOE)
- [21] InvenSense®, hoja de datos MPU-6000/MPU-6050 9-Axis Evaluation

Board User Guide.

- [22] Anritsu corporation®, manual MS9740A Optical Spectrum Analyzer Operation Manual, 21st Edition.
- [23] N. Becue, F. Madruga, C. Galíndez, J. Lazaro, J. Lopez, Control del periodo espectral de interferencias en tapers de fibras monomodo, Ingeniería Fotónica, 2013.

Capítulo 4

Resultados y discusiones

Como se mencionó en el capítulo 1, se propuso el desarrollo y análisis de un dispositivo interferométrico todo fibra, el cual nos ayudara a la detección de vibraciones causadas por sonido. De este modo fue obtenido un dispositivo fabricado con elementos ópticos sensible a vibraciones mecánicas y provocadas por sonido.

En este capítulo se presentarán los análisis numéricos y experimentales, los cuales serán presentados en un orden evolutivo con la finalidad de apreciar las mejoras del dispositivo.

Se realizaron aproximadamente 100 pruebas con las diferentes configuraciones del arreglo propuesto en el capítulo 3 sección 3.3, no obstante, en este capítulo se mostrarán los resultados más relevantes e interesantes.

4.1. Resultados numéricos

Una de las maneras más prácticas para realizar comparaciones de versatilidad es la realización de simulaciones, estas se llevan a cabo con la finalidad de empatar el comportamiento interno de dispositivos ópticos de manera numérica con el comportamiento de manera experimental.

Aludido a lo anterior, en este trabajo se emplearon las matrices de Jones, las cuales se mencionan en la Tabla 3.6, para generar un interferómetro Sagnac. Las matrices de Jones son empleadas debido al comportamiento esperado en el dispositivo, teniendo como polarización de entrada en la simulación una polarización lineal y un factor de acoplamiento, debido a que se espera un cambio en la polarización por QWR y por la fibra torcida [1] que simula el acoplador del interferómetro, puesto que divide y recombina señales y a su vez induce birrefringencia provocando un cambio en la polarización.

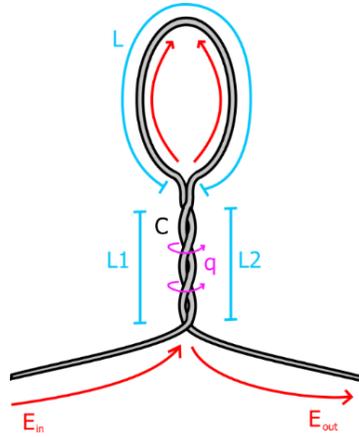


Fig. 4.1. Dispositivo en anillo Sagnac para el desarrollo de la simulación.

El esquema simulado para las pruebas realizadas es el que se muestra en la Figura 4.1, teniendo una variación en L1 y L2 para variar el acoplamiento del dispositivo, pudiendo cambiar la señal de entrada y el número de torsiones.

Tabla.4.1. Matrices de Jones empleadas en la simulación

QWR	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$
CW	$\begin{bmatrix} e^{\frac{i3\gamma LP_{in}}{4}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{i3\gamma LP_{in}}{4}} \end{bmatrix}$
CCW	$\begin{bmatrix} e^{i\gamma(3+\text{sen}(2\varphi))LP_{in}} & 0 \\ 0 & e^{i\gamma(3+\text{sen}(2\varphi))LP_{in}} \end{bmatrix}$

En las matrices γ corresponde al coeficiente no lineal de la fibra para ambas secciones, φ nos indica el ángulo de la polarización lineal de la entrada y P_{in} es la potencia de entrada. La potencia resultante (potencia de salida) dependerá de la transmisión del dispositivo y de un factor periódico dependiente de la longitud de onda y la diferencia de caminos ópticos. Mencionado esto, el sistema está descrito por las siguientes ecuaciones.

$$E_{out_{cw}} = C\sqrt{P_{in}} QWR_{cw} F_{cw} E_{in} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$E_{out_{ccw}} = -(1 - C)\sqrt{P_{in}} QWR_{ccw} F_{ccw} E_{in} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$\Delta\theta = k q \frac{2\pi}{\lambda} n(L_1 - L_2) \quad (\text{Ec. 4.3})$$

$$P_{out} = T \frac{1}{2} \cos(2 \Delta\theta) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

En la simulación aplicada, el programa recibe un archivo de referencia, el cual es un espectro super continuo obtenido de manera experimental en el laboratorio con ayuda del láser de figura ocho (Figura 3.7), con la finalidad de que la señal resultante siga la referencia; así mismo, se ingresa una amplitud inicial, un índice de refracción, un ángulo de polarización deseado y dos longitudes (L1 y L2, como se muestra en la Figura 4.1), dichas longitudes pueden variar un poco.

En el caso mostrado en la Figura 4.2, se proporcionó una señal de amplitud 1, longitud L1 de 20.5 cm y L2 de 20.1 cm, índice de refracción de 1.46 y ángulo de polarización de $\pi/2$.

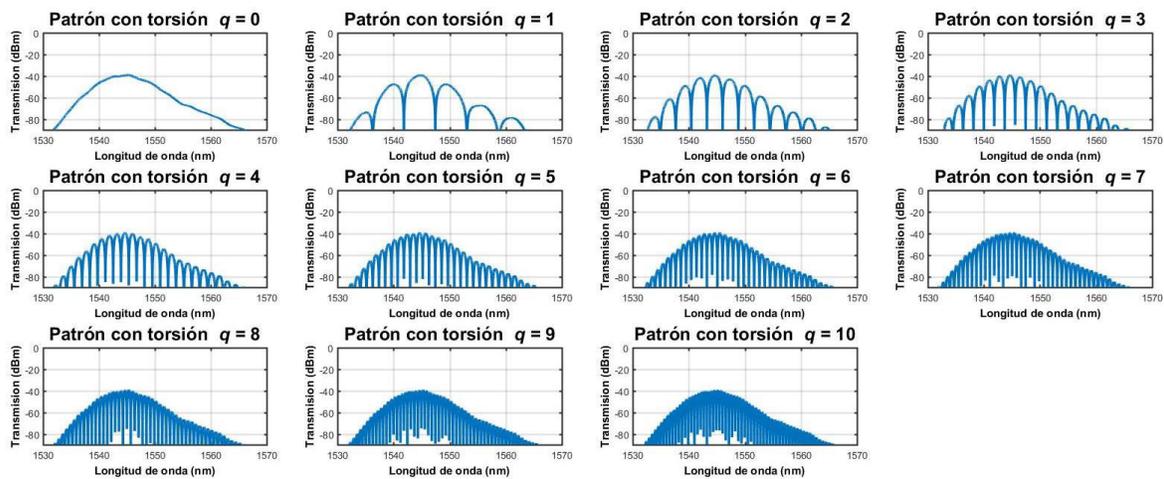


Fig. 4.2. Simulación de patrón de interferencia resultante del comportamiento de un interferómetro Sagnac.

Podemos observar que entre más torsiones se apliquen en el dispositivo tiene mayor respuesta de interferencia, teniendo mejores resultados a partir de 5 vueltas, como se muestra en la Figura 4.2.

Al simular la respuesta de nuestro dispositivo y ver como éste se comporta espectralmente, obtenemos las gráficas presentadas en la Figura 4.3 con los mismos

parámetros que la Figura 4.2 pero con 9 torsiones simuladas, donde se tiene una entrada de amplio espectro (línea roja), siendo esta la salida del láser y la entrada del dispositivo; el resultado experimental (línea magenta) correspondiente al patrón obtenido en el laboratorio; y el resultado de la simulación en Matlab (línea azul). Podemos observar la aparición de valles y crestas sobre el espectro, lo cual indica un fenómeno de interferencia.

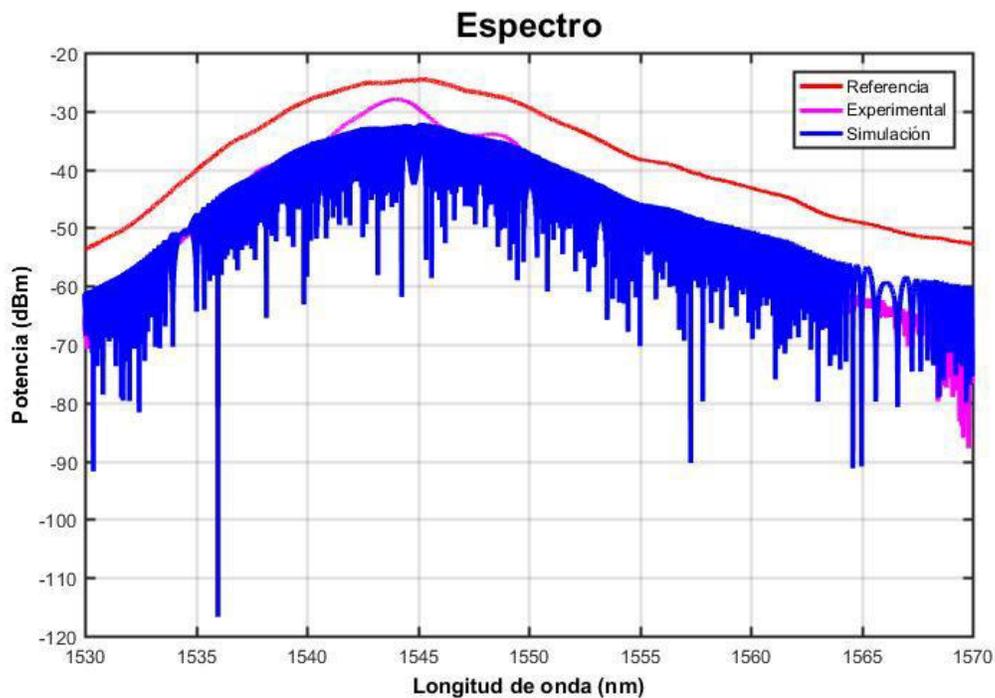


Fig. 4.3. Simulación de patrón de interferencia resultante del comportamiento de un interferómetro Sagnac con 9 torsiones.

Notando que el patrón de interferencia es más profundo en la simulación lo cual se cree que es debido a que los modos interactúan de mejor manera. Cabe resaltar que si se aumenta el número de torsiones el patrón de interferencia se hace cada vez más angosto [2].

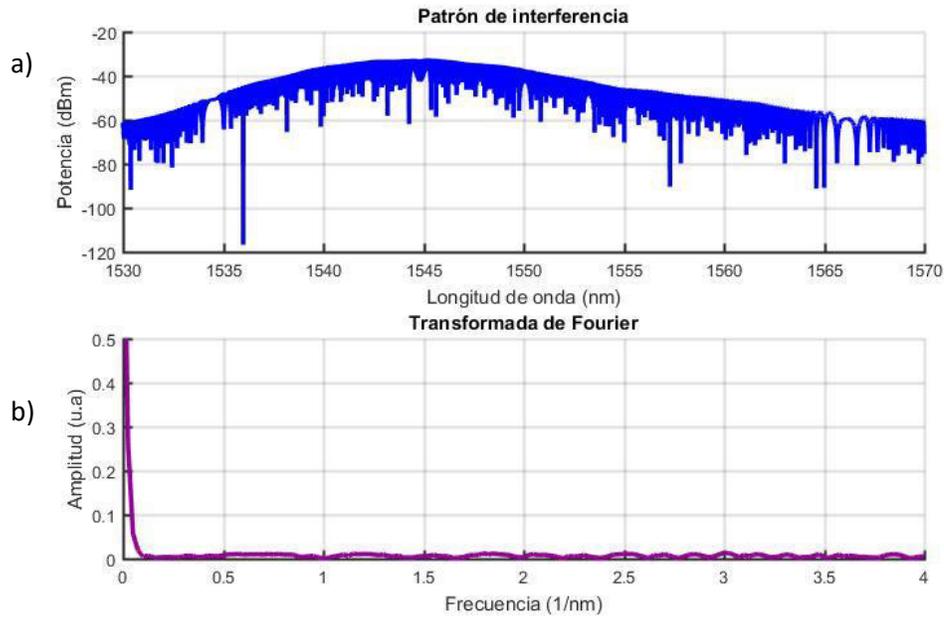


Fig. 4.4. a) Simulación de patrón de interferencia resultante al aplicar potencia de entrada de 10 mW, longitud L1 de 205 cm y L2 de 201 cm, índice de refracción de 1.46 y ángulo de polarización de $\pi/2$ con 9 torsiones simuladas, b) transformada de Fourier de la señal simulada.

En la Figura 4.4 b) se aprecia las frecuencias resultantes de la respuesta obtenida de la señal, estas no se encuentran totalmente definidas debido al comportamiento del patrón de interferencia simulado.

También se apreció, debido a la simulación, que entre menor tramo de fibra se utilice y se apliquen mayores torsiones el patrón de interferencia es mejor, así como su respuesta en frecuencia, esto se puede ver en la Figura 4.5. Esto se debe a que al aplicarle mayor número de torsiones la birrefringencia aumenta. La birrefringencia puede ser expresada como:

$$B_{cir} = 2g'q \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde $g'=0.073$ para el silicio y q es la razón de torsión por unidad de longitud [1].

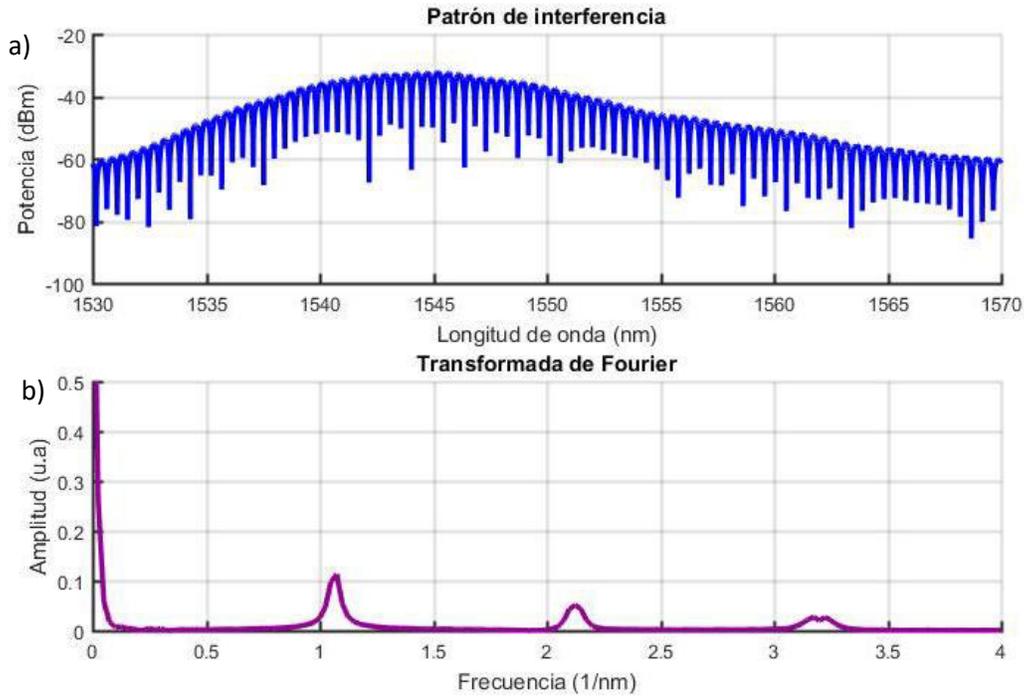


Fig. 4.5. a) Simulación de patrón de interferencia resultante al aplicar potencia de entrada de 10 mW, longitud L1 de 3.01 cm y L2 de 3.02 cm, índice de refracción de 1.46 y ángulo de polarización de $\pi/2$ con 5 torsiones simuladas, b) Transformada de Fourier de la señal simulada.

Para todas las simulaciones se empleó un rango de 1530 a 1570 nm, con 5001 puntos de muestreo, para garantizar que las variaciones observadas fueran debido solamente a variaciones del factor q .

Estas respuestas simuladas, corroboran que este dispositivo puede ser empleado como un sensor de vibración con distintas aplicaciones como el análisis en motores para observar su desgaste a través de la frecuencia acústica de repetición [3], puesto que los motores suelen producir sonidos específicos al tener una falla eléctrica, cada falla en los motores posee una frecuencia de repetición diferente [4], donde al aplicarle la FFT podemos observar la frecuencia de la falla, lo cual beneficia a nuestro dispositivo. Sin embargo, al realizar el estrechamiento de la fibra óptica, se tienen diversos problemas previamente mencionados, entre las que podemos resaltar la fragilidad de los dispositivos.

4.2. Resultados experimentales

Los resultados se presentarán en dominio del tiempo con voltaje normalizado con unidades arbitrarias (u.a) a 1 y respuesta de transformada rápida de Fourier en ventana de Hanning, estas gráficas de respuesta fueron procesadas por medio del software Matlab.

En las pruebas realizadas con las diferentes configuraciones de nuestro sistema se empleó un osciloscopio InfiniiVision MSOX6004A para observar la señal de salida de nuestro sistema, la cual corresponde a la salida de alta potencia (aproximadamente 4.5 mW a 9 mW de potencia promedio) del láser de figura ocho (F8L), teniendo conectada esta salida al osciloscopio por medio del fotodetector de 0-10 V para tener mayor resolución, mientras que para algunas pruebas la salida de baja potencia (2 mW a 4 mW) del F8L se conectó el dispositivo Tiny por medio del fotodetector DET01CFC para visualizar que nuestra señal de entrada del dispositivo en anillo permanecía estable. Para aplicar vibraciones al sistema se empleó en lado de la fibra mantenedora de polarización un motor desbalanceado, como se muestra en el capítulo 3 sección 3.3. Cabe señalar que el régimen estudiado en los resultados oficiales fue un régimen pulsado.

Para las diversas pruebas realizadas se empleó la variación del voltaje en el motor, pues este genera vibraciones de acuerdo con el voltaje aplicado, siendo desde 0 a 5 Volts, o de 0 a 8 Volts, con la finalidad de obtener la frecuencia correspondiente a cada voltaje, se utilizó la aplicación StrobeLigth móvil la cual nos arroja las revoluciones por minuto (RPM, en inglés Revolutions Per Minute) y la frecuencia en Hertz del motor.

4.1.1. Régimen continuo

Un láser en régimen continuo emite un haz constante a lo largo del tiempo, lo cual se diferencia en un láser de régimen pulsado, en el cual el bombeo tiene la forma de pulsos de varias longitudes de onda producidas por el medio activo [5].

Se empleó el analizador de espectros ópticos, para visualizar la señal de respuesta de nuestro dispositivo al aumentar y disminuir el voltaje del motor en un rango de 3.8 a 5.8

Volts (este rango fue tomado debido a que el motor era más estable en estos voltajes) con la finalidad de examinar si la señal resultante sufría cambios considerables.

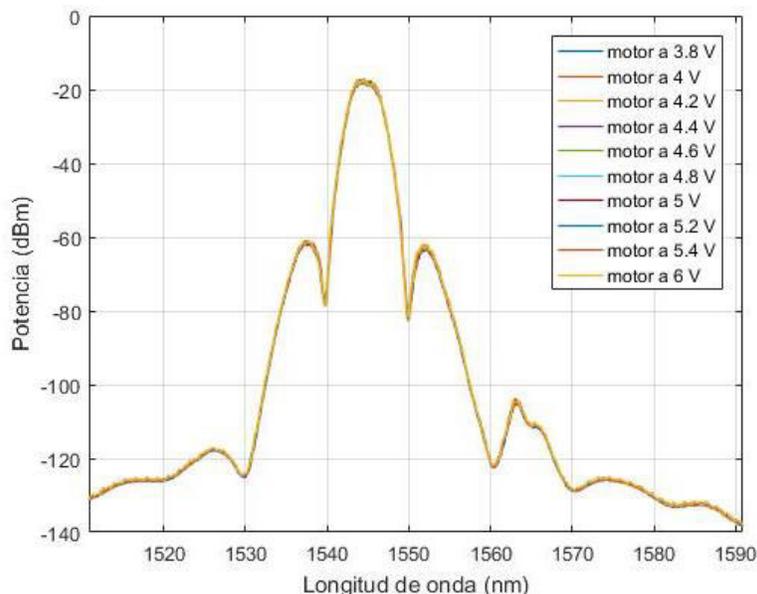


Fig.4.6. Respuesta del dispositivo en longitud de onda variando el voltaje del motor de 3.8 a 6 Volts, visto en el dispositivo OSA.

En el análisis de las señales resultantes del OSA, se visualizaron los máximos ubicados en uno de los valles, donde su longitud de onda destacaba en un intervalo de 1549.8 a 1549.95 nm, se eligió este valle debido a que era el que presentaba cambios más significativos en la señal, pues 1550 nm es la longitud de onda de operación del sistema láser que genera la señal de entrada del dispositivo.

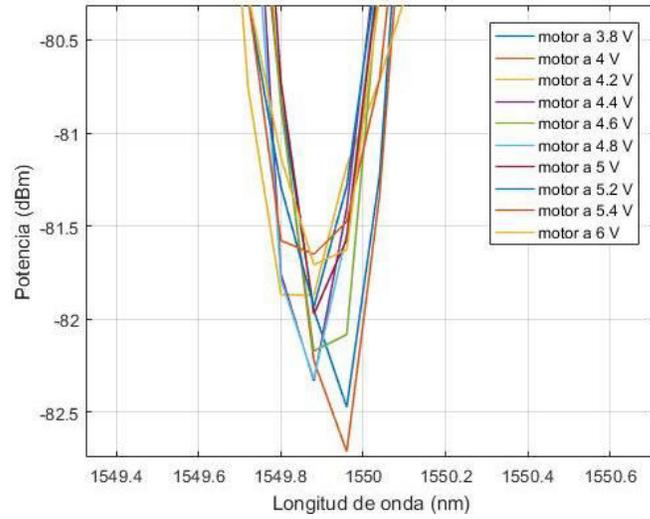


Fig.4.7. Sección de análisis en uno de los valles de la señal de rango de 1549-1550 nm.

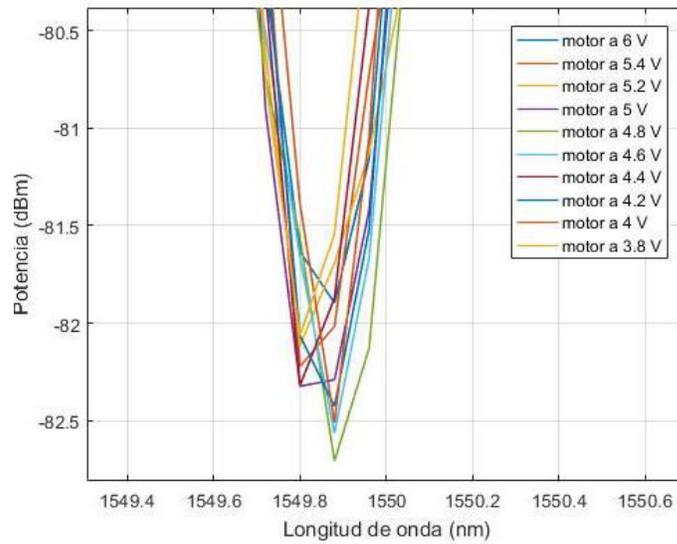


Fig.4.8. Sección de análisis en uno de los valles de la señal de rango de 1549-1551 nm, decrementando el voltaje de 6-3.8 Volts.

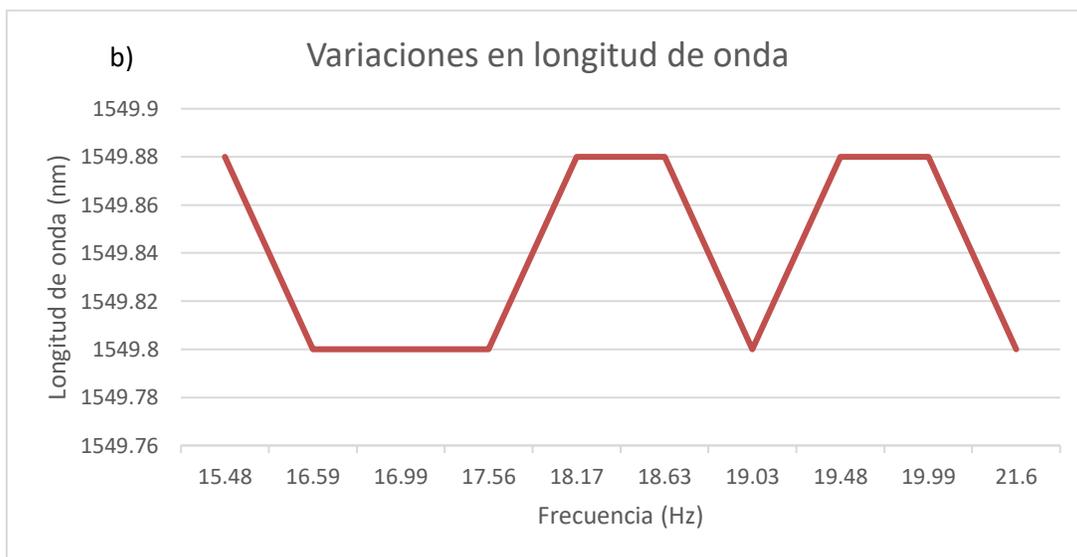
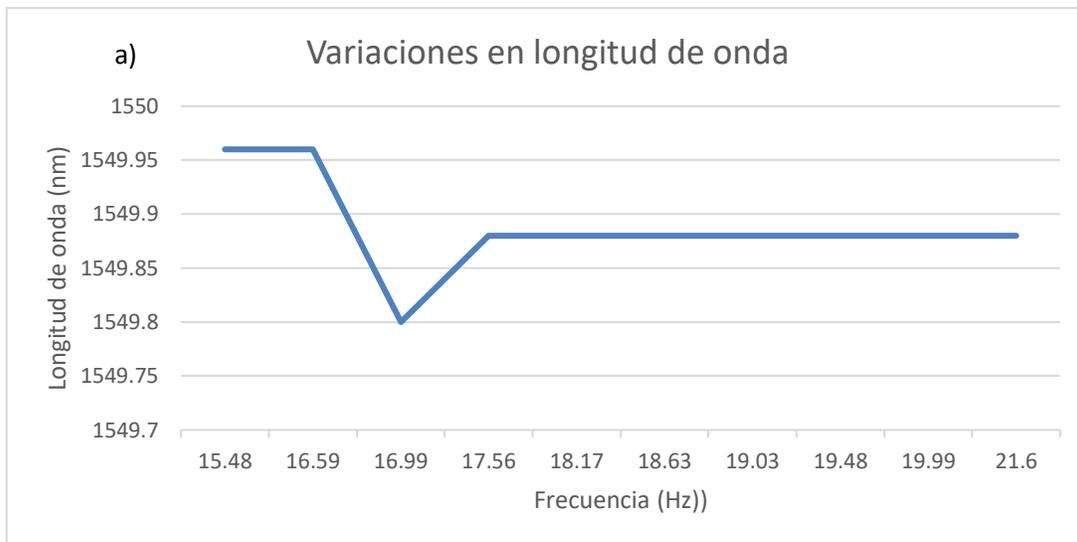


Fig.4.9. Comportamiento de variaciones en longitudes de onda a) Respuesta al aumentar el voltaje de manera ascendente con respecto a la figura 4.7, b) Respuesta al disminuir el voltaje con respecto a la Figura 4.8.

Se puede apreciar en la Figura 4.9, que existe un desfase debido a las vibraciones del sistema y el tipo de pulsos complejos (NLPs) utilizados en la entrada, pero, en el dominio espectral, la señal de respuesta no nos arroja información del comportamiento de nuestro dispositivo. Por tal motivo, se empleó el osciloscopio como método de visualización en dominio temporal, lo que nos permitió caracterizar nuestro sensor de una forma innovadora, de menor costo y más rápida.

Para la realización de pruebas, fue tomado en consideración el quinto prototipo de nuestro dispositivo (sección 3.3.2.3) y con la finalidad de centrarnos en una sola región de comportamiento. Fue visualizada la salida de baja potencia del láser de figura ocho (F8L) conectándola al analizador de espectros (Tiny) para encontrar zonas de régimen continuo y estudiar cómo esta entrada afecta en la respuesta del dispositivo detectado, dando como resultado respuestas interesantes, sin embargo, no se profundizará en ellos ya que van más allá de los objetivos planteados para este trabajo, el cual está centrado en el uso de los pulsos como instrumento de medición, sin embargo, se espera que sean abordados en trabajos a futuro.

De este modo, la salida del dispositivo interferómetro fue grabada con 2000 promedios en el osciloscopio, empleando los ángulos de la Tabla 4.2, con una corriente de 3 amperios a nuestra fuente de bombeo (láser F8L); la corriente fue fijada en ese valor para evitar que el empalme entre la fibra estándar y la fibra de erbio del láser de figura ocho se dañara.

Tabla 4.2. Parámetros de los ángulos para el tercer arreglo del interferómetro en anillo con movimiento de placas para observar señales de interés.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 155°	Placa A 35°
Placa $\lambda/4$ 145°	Placa B 160°
Placa $\lambda/2$ 40°	Placa C 140°
Placa $\lambda/4$ 65°	

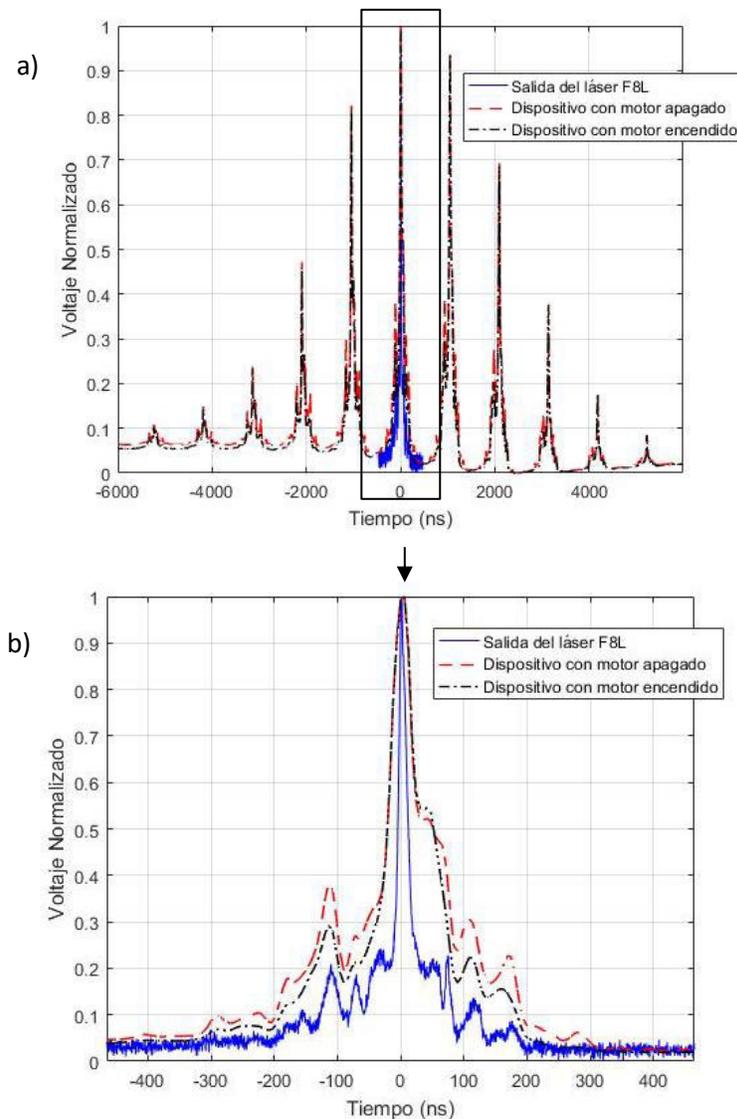


Fig.4.10. a) Gráfica de respuesta de variación en un régimen continuo, b) Acercamiento de la señal del inciso a).

Con el régimen continuo del F8L fue lograda una zona de diversas frecuencias en la salida del interferómetro con tiempos continuos que se extienden desde -5000 a 5000 nano segundos, como se muestra en la Figura 4.10.

Otra región interesante se dio con los parámetros de la Tabla 4.3, donde en esta ocasión el dispositivo generaba una señal semejante a los acelerómetros fabricados con interferómetros de fibra óptica [6] como se puede observar en las Figuras 4.11. y 4.13.

Tabla 4.3. Parámetros de los ángulos para el tercer arreglo del interferómetro en anillo con respuesta semejante a un acelerómetro.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 317°	Placa A 140°
Placa $\lambda/4$ 5°	Placa B 170°
Placa $\lambda/2$ 30°	Placa C 110°
Placa $\lambda/4$ 177°	

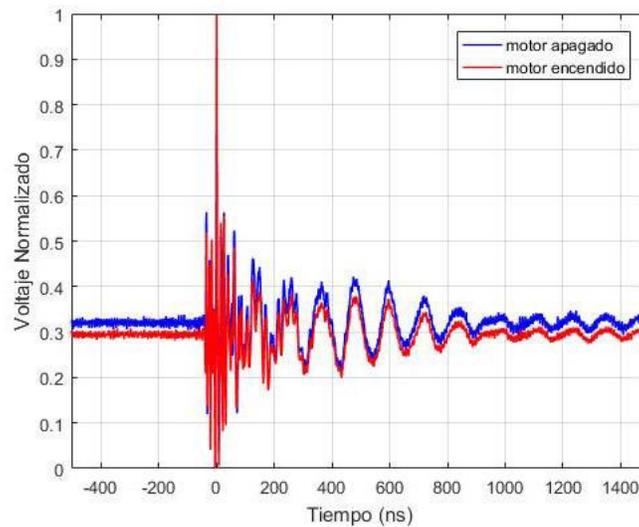


Fig.4.11. Gráfica de respuesta empleando los ángulos de la Tabla 4.3.

Las gráficas de la FFT adquiridas mediante el osciloscopio que se mostrarán en este capítulo, poseen con una amplitud normalizada con u.a, con la finalidad de apreciar mejor los cambios de la señal.

De la gráfica de la Figura 4.11 se obtuvo la transformada rápida de Fourier en la cual podemos notar que al encender el motor existe una detección en frecuencias específicas, lo que nos permite determinar que en el régimen continuo podríamos hacer la detección de vibraciones.

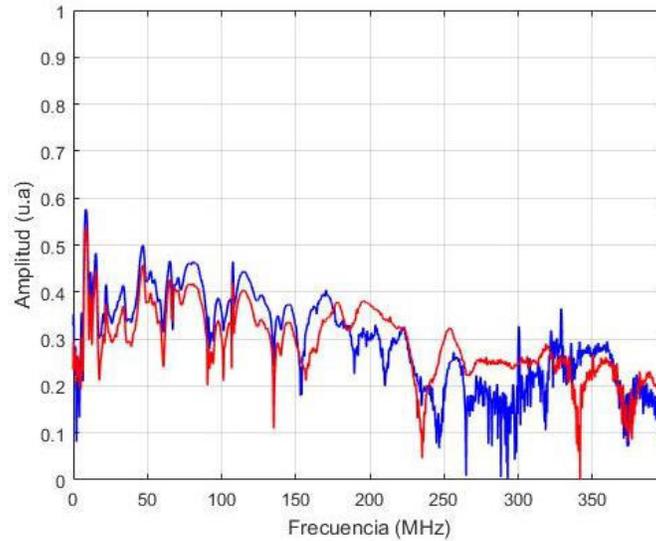


Fig.4.12. Gráfica de la transformada rápida de Fourier (FFT) de la Figura 4.11.

Posteriormente decidimos colocar las placas en ángulos diferentes para observar el comportamiento de salida de nuestro dispositivo, estos ángulos son mostrados en la Tabla 4.4. Realizando otro caso de análisis de la respuesta del sensor.

Tabla 4.4. Parámetros de los ángulos para el tercer arreglo del interferómetro en anillo con respuesta similar a un acelerómetro.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 45°	Placa A 180°
Placa $\lambda/4$ 175°	Placa B 180°
Placa $\lambda/2$ 0°	Placa C 110°
Placa $\lambda/4$ 0°	

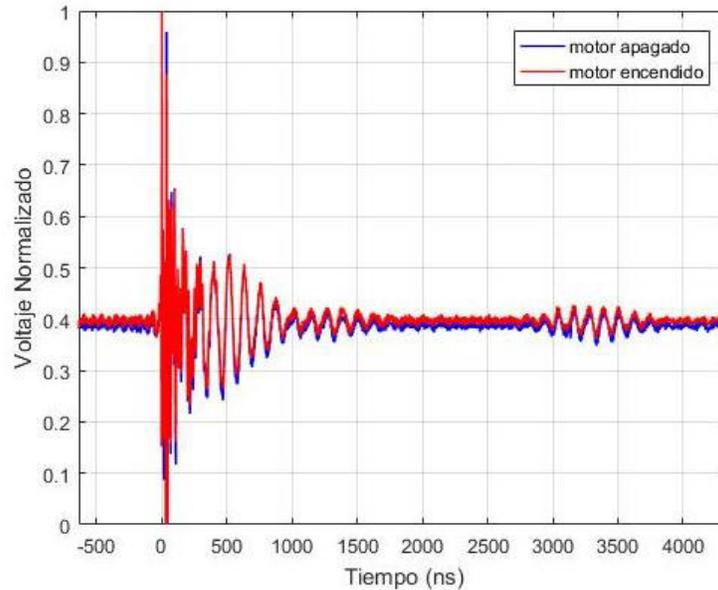


Fig.4.13. Gráfica de respuesta de variación en el ángulo de placas con los ángulos de la Tabla 4.4.

Estos resultados son de interés, debido a que recientemente la empresa LUNA desarrollo un dispositivo elaborado por medio de un interferómetro de fibra óptica basado en un interferómetro Fabry-Perot, el cual funciona como un acelerómetro capaz de detectar vibraciones en estructuras como puentes, incluso llega a tener una respuesta para frecuencias de 1 kHz [6]. Al comparar las gráficas presentadas por esta empresa podemos apreciar que la respuesta de nuestro dispositivo es muy similar a la proporcionada por el modelo LUNA o7510, siendo esta un área de oportunidad para este trabajo.

En la gráfica presentada en la Figura 4.13 se obtuvo una mayor exactitud de una señal con respecto a la respuesta de la Figura 4.11, viendo como en el primer caso la señal es más parecida a la respuesta del acelerómetro comercial.

La exactitud de la señal es mejor para la Figura 4.13 en comparación a la Figura 4.11 logrando apreciar este comportamiento en las gráficas de la FFT.

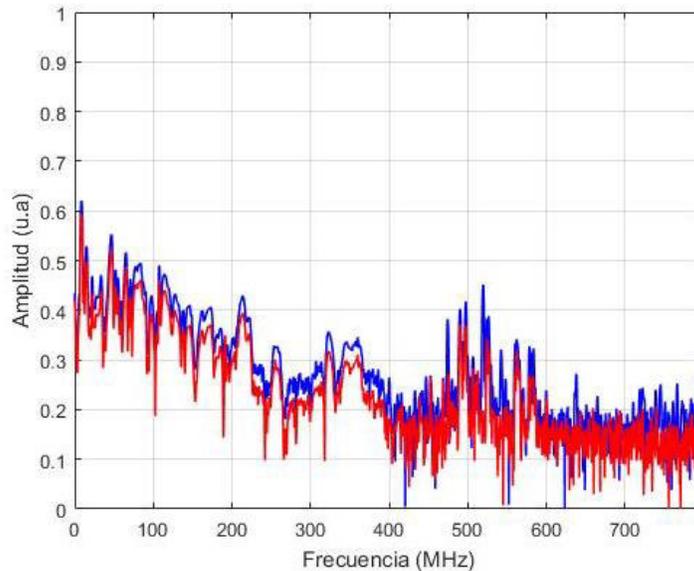


Fig.4.14. Gráfica de la transformada rápida de Fourier (FFT) de la Figura 4.13.

En la gráfica anterior pudimos apreciar de manera más notoria como al aumentar el voltaje del motor o en este caso encender el motor la respuesta del dispositivo se produce un cambio en las frecuencias detectadas, lo que indica cambio en la vibración del sistema.

4.1.2. Régimen pulsado

Una vez analizados los resultados anteriormente mostrados, decidimos trabajar en el dominio del tiempo, puesto que fueron visualizados cambios más significativos en el osciloscopio, lo cual también tiene la ventaja de reducción de costos, pues los OSA son dispositivos considerablemente más caros que los OSC. Todos estos cambios dieron consecuencia los resultados que se mostrarán en páginas siguientes.

Empleando un régimen pulsado y el prototipo mostrado en la Figura 3.22 del capítulo 3, se aumentó el voltaje del motor de 0 a 5 Volts, lo cual provocó un corrimiento hacia la parte derecha o izquierda de la señal (según la prueba realizada); es relevante destacar que, aunque se comenzó a aumentar el voltaje desde 0 Volts, se presentó un cambio significativo en la respuesta de la señal a partir de 1.5 Volts, debido a que el motor presentaba respuesta a partir de este voltaje.

Entre cada intervalo de voltaje se tuvo un tiempo de respuesta de 3-4 minutos, donde la

señal lograba estabilizarse, permitiéndonos grabar las respuestas de nuestro dispositivo después de este tiempo transcurrido, estos contratiempos se deben al diseño mecánico desarrollado para el sensor.

Para este caso se tuvieron las placas del F8L, así como del dispositivo, posicionadas en los ángulos que se muestran en la Tabla 4.5, y una corriente del láser de 3 A.

Tabla 4.5. Parámetros de los ángulos para el arreglo tres del interferómetro en anillo.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 285°	Placa A 35°
Placa $\lambda/4$ 145°	Placa B 160°
Placa $\lambda/2$ 170°	Placa C 140°
Placa $\lambda/4$ 155°	

Las gráficas de respuesta que se obtuvieron con estos ángulos tienen en el eje *y*, un voltaje normalizado de 0 a 1 Volt, en el eje *x* la variación de la señal con respecto al tiempo.

A pesar de tener tres muestras con los mismos ángulos, se puede observar en las Figuras 4.15 a) y b), así como en la Figura 4.16 a), que a simple vista el pulso es igual, no obstante, al verificar el ancho del pulso y el comportamiento que estas respuestas tenían al aplicarle vibraciones, se verifica que el pulso no es el mismo, esto debido a la interacción interna de los pulsos de ruido.

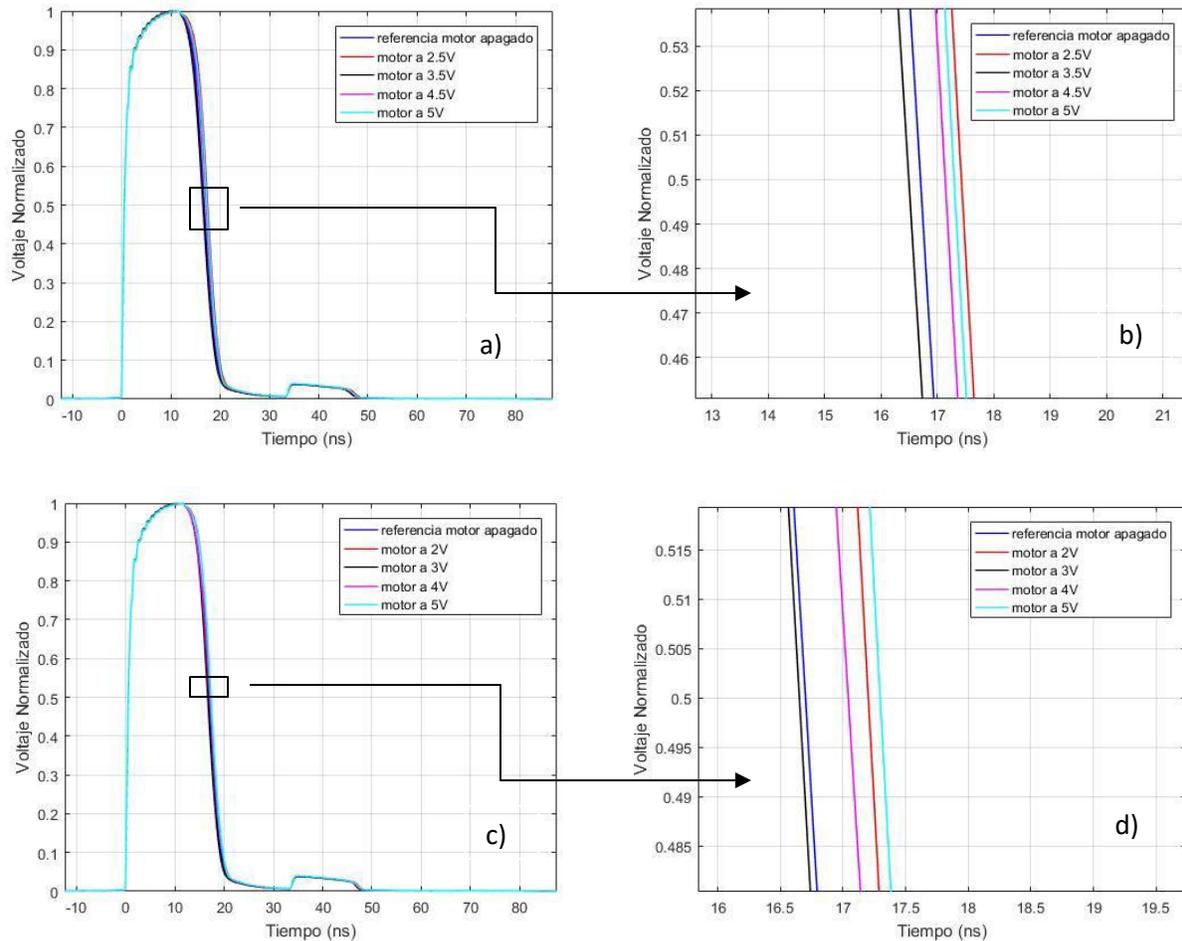


Fig.4.15. a) Respuesta del dispositivo variando el voltaje cada 0.5 Volts, b) Aumento en una sección respecto a la gráfica a, c) Gráfica de respuesta del dispositivo variando el voltaje cada 1 Volt, d) Aumento respecto a la gráfica 4.15 c.

En la Figura 4.15 b) y d) podemos apreciar que los voltajes de la señal se recorren hacia la derecha (2,2.5,4,4.5,5 Volts) o hacia la izquierda (3 y 3.5 Volts), tomando como referencia el motor apagado 0 V. Se cree que este ensanchamiento o estrechamiento del pulso es debido a la interacción del láser, ya que el pulso está conformado por sub-pulsos que son capaces de detectar estas variaciones. Mientras que en la Figuras 4.15 a) y 4.1 c) fue observado un ancho del pulso de aproximadamente 16 nano segundos (ns) para ambos casos.

Se realizó otra corrida del sistema, dejando las placas con los ángulos de la Tabla 4.5 y el

voltaje fue aumentando gradualmente, sin bajarlo o apagarlo en cada corrida, para este caso el ancho del pulso también se encuentra entre 16 nano segundos.

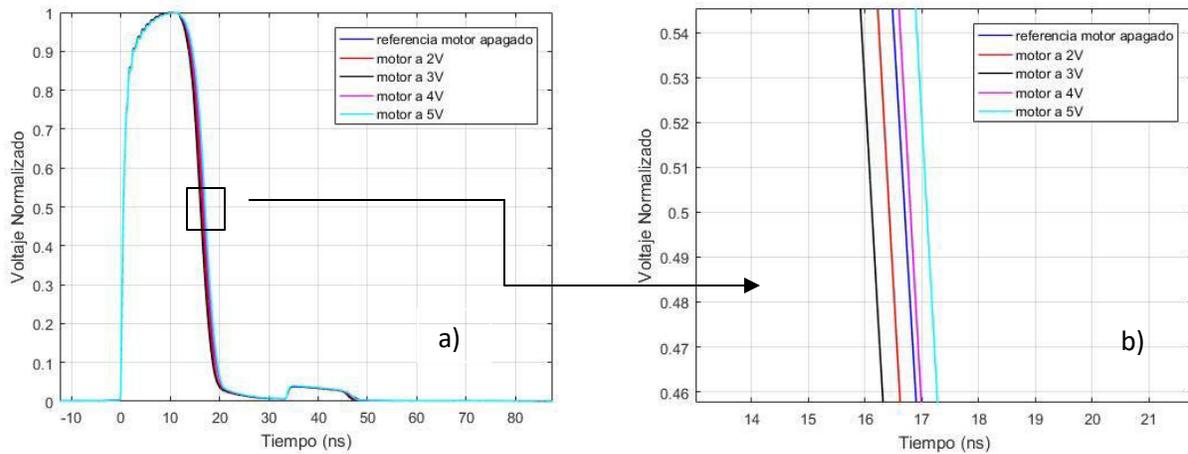


Fig.4.16. a) Respuesta del dispositivo variando el voltaje cada 1 Volt aumentándolo gradualmente sin bajar el voltaje en cada corrida, b) Respuesta del dispositivo con aumento 3V en una sección respecto a la gráfica a.

En la Figura 4.16 b) se tiene una respuesta diferente en el comportamiento a pesar de que el pulso es muy similar al de la Figuras 4.15 a) y c); para el caso de la Figura 4.16 b) fue apreciado que para valores menores a 3 V el pulso se estrecha, mientras que para señales mayores a 4 V se ensancha, esto puede ser debido a que el tiempo de respuesta para estabilizar la señal es mayor al aumentar sin reducir los voltajes.

Con estas muestras realizamos una linealización de las gráficas 4.15 c) y 4.16 a), donde se pudo observar que en ambos casos solo en rangos específicos se obtiene un comportamiento lineal, teniendo mejor desempeño cuando el voltaje se regresa a cero en cada aumento de voltaje.

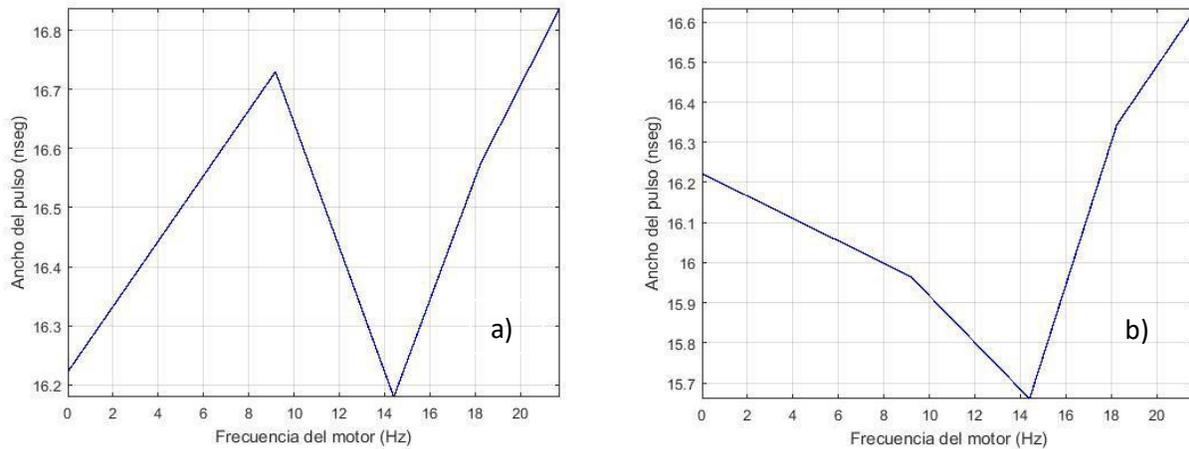


Fig.4.17. a) Variación del ancho del pulso de la gráfica c de la Figura 4.15, b) Variación del ancho del pulso de la gráfica a de la Figura 4.16.

En el caso de la Figura 4.17 a) los rangos donde la respuesta es lineal van de 0 a 9.18 Hz (correspondientes a un rango de 0 a 1.5 Volts) y de 14.41 a 21 Hz (correspondiente a un rango de 3 a 5 Volts), mientras que en su inciso b), el rango en la cual fue más lineal va de 0 a 9.18 Hz, lo que nos lleva a pensar que nuestro dispositivo posee una respuesta sensible a vibraciones, pero solo en ciertos intervalos.

Ahora, enfocándonos en la configuración cuatro de nuestro dispositivo, con una corriente del láser de 3 A y usando configuración de las placas que se muestra en la Tabla 4.6 se obtuvieron las gráficas 4.18 y 4.19.

Tabla 4.6. Parámetros de los ángulos para el tercer arreglo del interferómetro en anillo con respuesta de ensanchamiento o estrechamiento del pulso.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 85°	Placa A 35°
Placa $\lambda/4$ 107°	Placa B 135°
Placa $\lambda/2$ 25°	Placa C 95°
Placa $\lambda/4$ 47°	

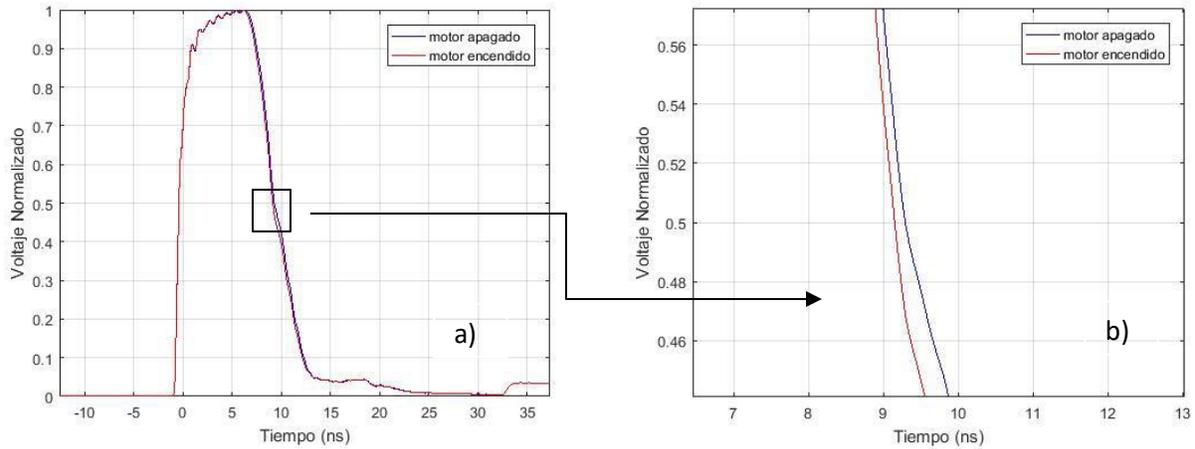


Fig.4.18. a) Respuesta del pulso al encender y apagar el voltaje, b) Aumento en la sección con mayor desplazamiento de la Figura 4.18 a.

En la Figura 4.18 b), fue visto que al encender el motor la señal se recorre a la izquierda, se cree que esto sucede debido a fenómenos dispersivos dentro de la cavidad.

Al aplicarle la FFT a la señal se presentaron variaciones en amplitud, viendo un cambio considerable en respuesta, esto se puede apreciar en la Figura 4.19 b).

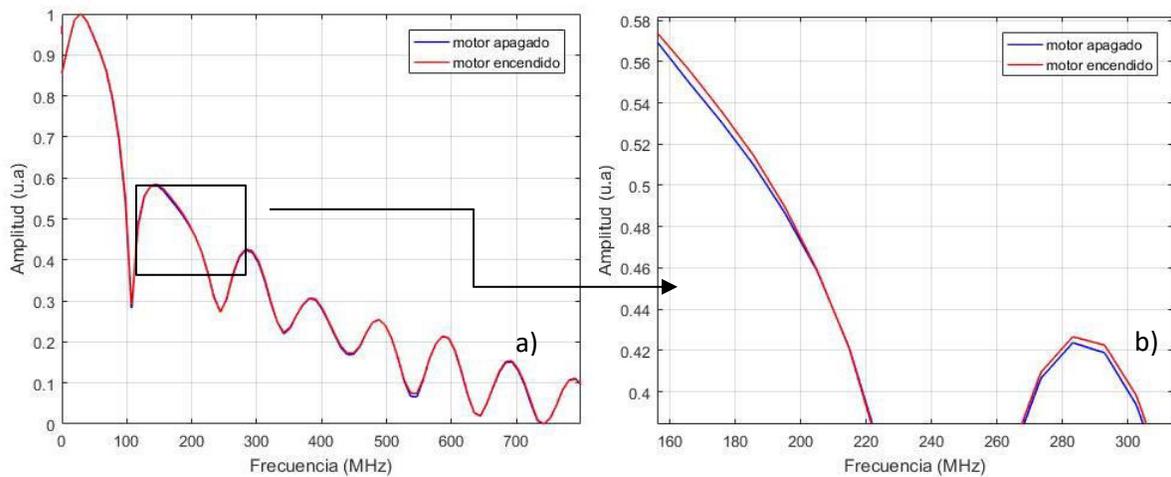


Fig.4.19. a) FFT del pulso al encender y apagar el motor, b) Aumento en una de las secciones de la Figura 4.19 a.

Al no apreciar cambios significativos con la configuración de la Figura 4.22, se optó por regresar a la estructura de un solo motor con fuente de voltaje (Figura 3.23), en estas pruebas el voltaje se varía cada Volt desde 0 V hasta 5 V consecutivos, teniendo tres

pruebas con ángulos iguales, estos datos se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Parámetros de los ángulos para el cuarto arreglo del interferómetro en anillo prueba 1, 2 y 3.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 180°	Placa A 200°
Placa $\lambda/4$ 23°	Placa B 3°
Placa $\lambda/2$ 45°	Placa C 70°
Placa $\lambda/4$ 130°	

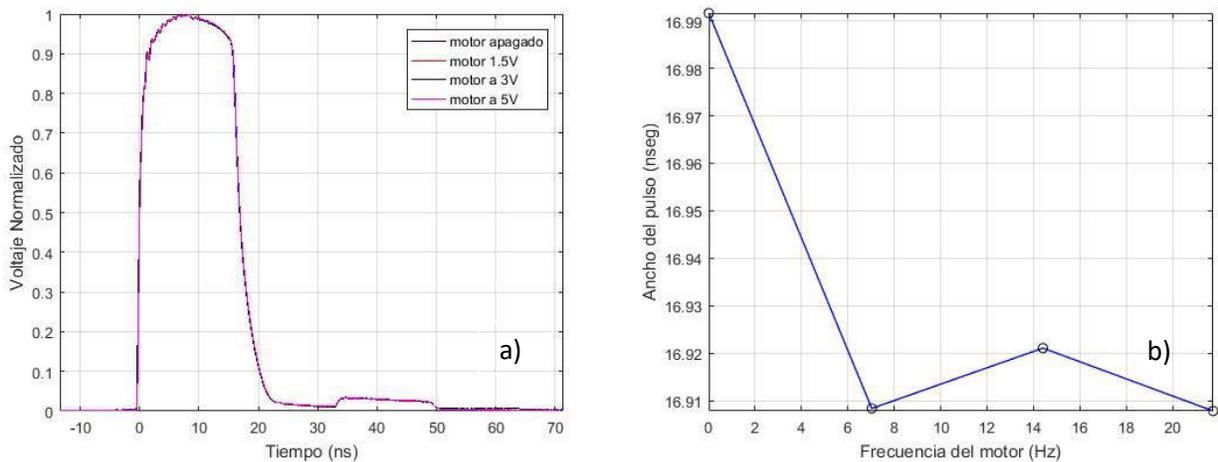


Fig.4.20. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del interferómetro, b) Respuesta en ancho temporal de la gráfica de la Figura 4.20 a.

En la gráfica de la Figura 4.20 b), notamos que hay varias regiones donde el voltaje varía de manera lineal ya sea en modo ascendente (rango de 7.03 a 14.41 Hz) o descendente (rango de 0 a 7.03 Hz), sin embargo, al analizar toda la gráfica fue visto que su respuesta general no resultó lineal.

Realizamos otra prueba, respetando los ángulos de la Tabla 4.7, con un pulso de respuesta muy parecido al de la Figura 4.20, sin embargo, en este caso el pulso fue más ancho (23 nano segundos) y el pulso permaneció más estable. La respuesta del interferómetro se guardó con 500 promedios en el osciloscopio.

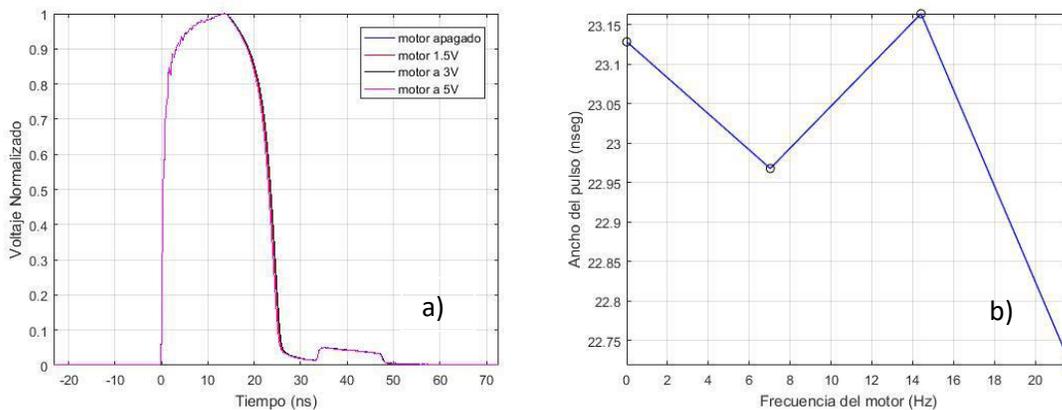


Fig.4.21. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del interferómetro, b) Respuesta de ancho temporal de la gráfica de la Figura 4.21 a.

En el caso de la Figura 4.21, se logró apreciar que el rango de respuesta descendente cambió en comparación al de la Figura 4.20, ya que, para el primer caso el pulso desciende en un intervalo de 0 a 7.03 Hz, bajando el ancho del pulso de 23.13 a 22.98 ns, y aumenta hasta 23.15 en un intervalo de 7.03 a 14.41 Hz; notando que en el primer caso de la Figura 4.20 b) el rango de respuesta es muy similar pero solo decae 0.08 nanosegundos, mientras que en el otro decae 0.15 ns.

Se cree que la señal del dispositivo se desplazó debido a que no nos encontrábamos en una región completamente estable de pulsos, ya que la señal resultante de la salida del láser para ambos casos posee la misma forma, solamente que en la prueba 2 el ancho del pulso es más estrecho comparándolo con la prueba 1, esto se puede apreciar en la Figura 4.22, donde en la prueba dos el ancho del pulso es de aproximadamente 16 ns mientras que en la primera prueba es de 13 ns, midiendo el ancho desde media altura (0.5, en voltaje normalizado).

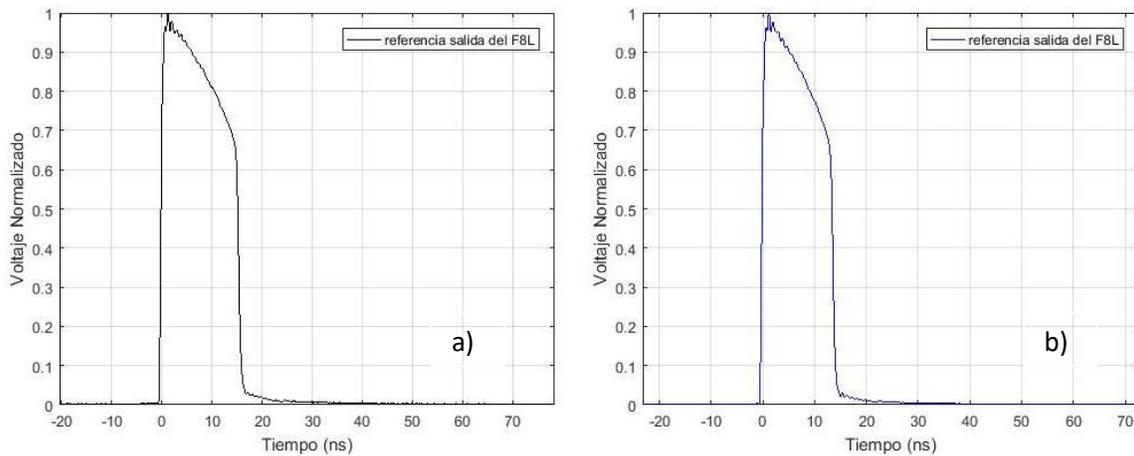


Fig.4.22. a) Prueba de respuesta al pulso de la señal de la salida del F8L en prueba 1, b) Prueba del pulso de la señal de la salida del F8L en prueba 2.

Fue elaborada una tercera prueba con la finalidad de observar si el comportamiento de los pulsos influía al momento de manipular la fibra mantenedora de polarización, de este modo se respetaron los ángulos de la Tabla 4.7, así como la corriente suministrada al láser siendo esta de 3 A, teniendo un pulso con frecuencia de repetición de 956.39 kHz, ancho de 21 ns, para la señal de alta potencia. La señal fue grabada con 500 promedios de las muestras.

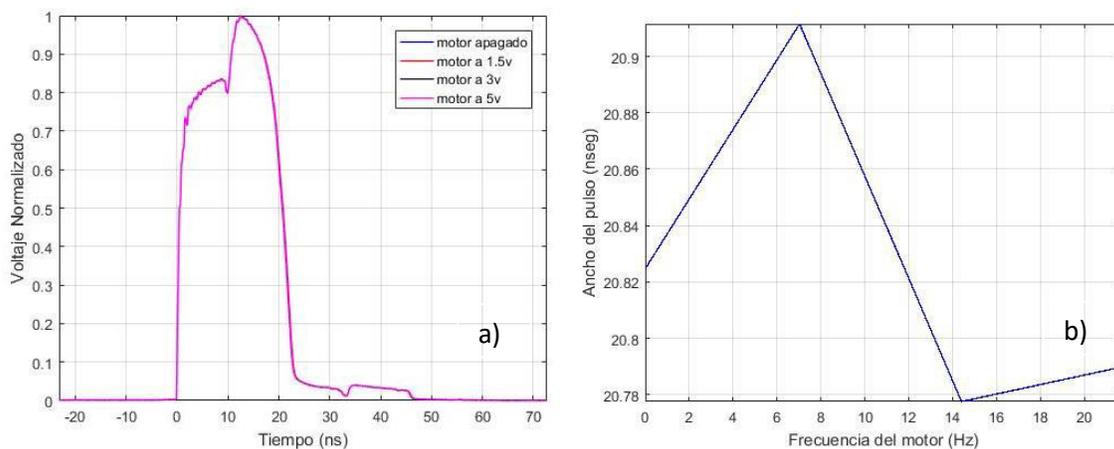


Fig.4.23. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del interferómetro en prueba 3, b) Respuesta del ancho temporal de la Figura 4.23 a, prueba 3.

A pesar de ser los mismos ángulos en las placas, pudimos notar al comparar la forma del pulso resultante de las Figuras 4.20 y 4.21 con las de la prueba 3 (Figura 4.23) que este resulta diferente para los tres casos.

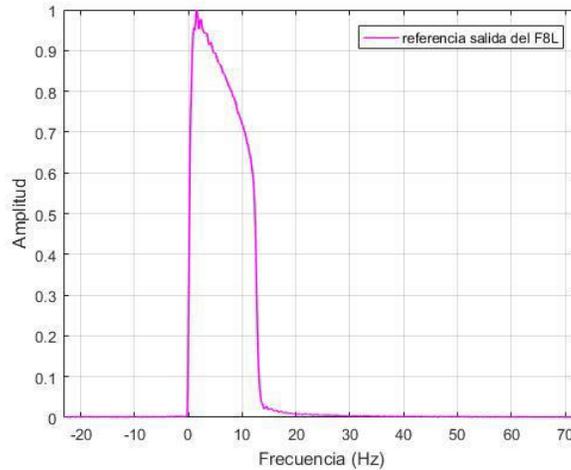


Fig.4.24. Respuesta al pulso de la señal de la salida del del láser de figura ocho (F8L) en prueba 3.

Comparando las respuestas de la salida del láser logramos notar que el ancho del pulso varía en cada prueba, en estos casos se estrecha el pulso, esto puede ocasionar que el ancho del pulso en la salida de nuestro dispositivo varíe.

Al analizar las tres pruebas encontramos que perturbaciones mecánicas, como corrientes ambientales de aire, en la fibra polarizadora PANDA PM 15-U25A, ocasionaban cambios en la señal de respuesta, es así como se optó por fijar la fibra a la placa de MDF con el propósito de mantenerla más estable.

Una vez fijada la fibra PANDA se realizó otra prueba con la cuarta configuración de nuestro dispositivo, pero con ángulos diferentes, con el propósito de obtener un perfil diferente de pulso que nos permitiera mejorar la sensibilidad, gracias a las variaciones internas del pulso.

Tabla 4.8. Parámetros de los ángulos para el cuarto arreglo del interferómetro en anillo.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 285°	Placa A 140°
Placa $\lambda/4$ 145°	Placa B 160°

Placa $\lambda/2$ 170° Placa $\lambda/4$ 155°	Placa C 35°
--	--------------------

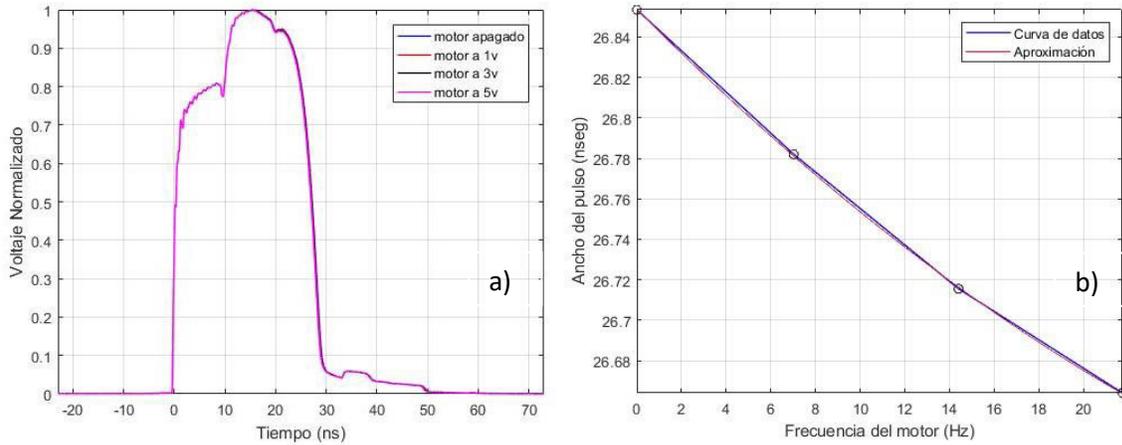


Fig.4.25. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del del láser de figura ocho (F8L), b) Datos obtenidos (línea azul) y curva de aproximación (línea roja) de la variación del ancho del pulso dependiendo de la frecuencia de vibración.

Notando que el pulso de salida de nuestro dispositivo, con los valores de los ángulos expuestos en la Tabla 4.8, es más ancho que los casos anteriores siendo de 27 nano segundos, con un voltaje pico-pico de 1.39 V. En cambio, como entrada de nuestro interferómetro de anillo tenemos pulsos con ancho de 15.46 ns, voltaje pico-pico de 38.6 mV, viendo que en ambos casos el pulso es más ancho y potente, podemos decir que esto favorece a un comportamiento más lineal que los casos anteriores.

En la Figura 4.25 se distinguió una curva de respuesta para la señal, aproximándola a un polinomio de segundo grado, se obtuvo la función $f(x) = 0.0001086x^2 - 0.0111x + 26.85$, arrojada por el código realizado en Matlab, el cual se encuentra en la sección de anexos.

Fue vista la respuesta de la FFT de los pulsos obtenidos en la Figura 4.25, teniendo dos gráficas de FFT una de 0-350 MHz, que es el rango que se maneja y como se presenta en el analizador de espectros ópticos portátil (Tiny) y otra gráfica en un rango de 0 a 1.6 GHz, ambas a -20 dB con ventana de Hanning.

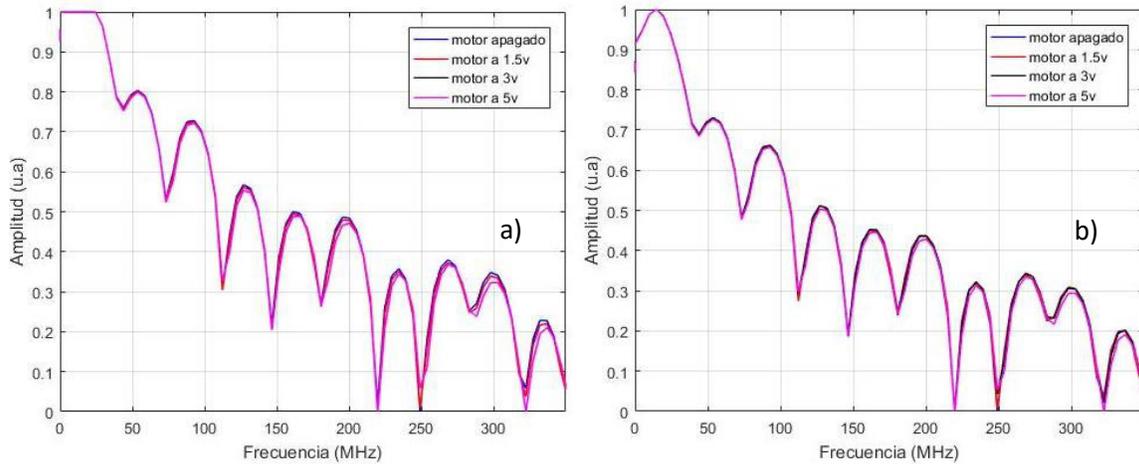


Fig.4.26. a) Respuesta FFT del pulso de la Figura 4.25 a con rango de 0-350 MHz en el osciloscopio, b) Respuesta FFT del pulso de la Figura 4.25 a con rango de 0-1.6 GHz en el osciloscopio.

En la señal con la FFT implementada, se observa un desplazamiento hacia la parte de debajo de la señal de referencia (motor apagado en 0 Volts), lo cual nos indica un cambio al aumentar los voltajes, independientemente de la ventana que se tome.

La respuesta del pulso de salida del láser F8L, es visualizada en la gráfica de la Figura 4.26, aunque la forma del pulso es muy similar a las ya vistas con anterioridad, este pulso es más ancho siendo de aproximadamente 19 ns.

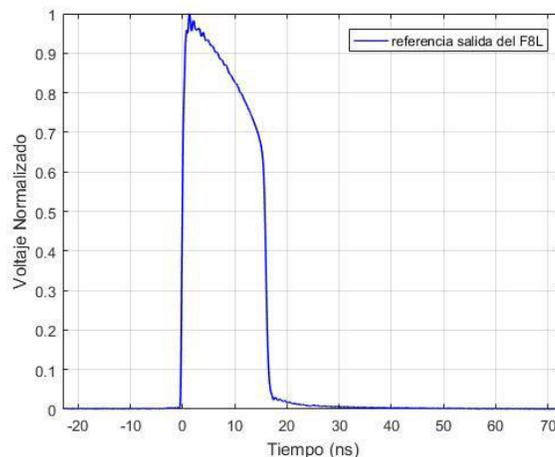


Fig.4.27. Respuesta al pulso de la señal de la salida del del láser de figura ocho (F8L) con placas en los ángulos de la Tabla 4.8.

Para determinar si las pruebas de nuestro interferómetro en anillo eran repetibles se cortó la entrada de nuestro dispositivo fabricado, empalmándolo nuevamente a la entrada del aislador de fibra IOSS5111111, lo cual aumento la potencia de salida del interferómetro en anillo siendo esta de casi 9 mW. Dichas pruebas fueron realizadas con la quinta configuración del sistema con una corriente de 3 A y variando el voltaje del motor desde 0 hasta 5 V, lo cual dio como resultado un ancho de pulsos de 18 nanosegundos que en comparación a los pulsos más anchos encontrados en pruebas anteriores decayó casi 10 ns, así como su valor de amplitud pico-pico fue de 1.17 Volts decayendo 0.2 Volts en comparación a sus pruebas anteriores, lo cual nos permite inferir por qué la potencia de salida del dispositivo aumento considerablemente.

La señal resultante osciló nuevamente, lo cual se aprecia mejor en la linealización de la Figura 4.28 b), donde es lineal el sistema de 0 a 3 Volts y posteriormente aumenta en el intervalo de 3 a 5 V. Estos resultados se obtuvieron con los ángulos de la Tabla 4.9 y una corriente de 3 A en él F8L.

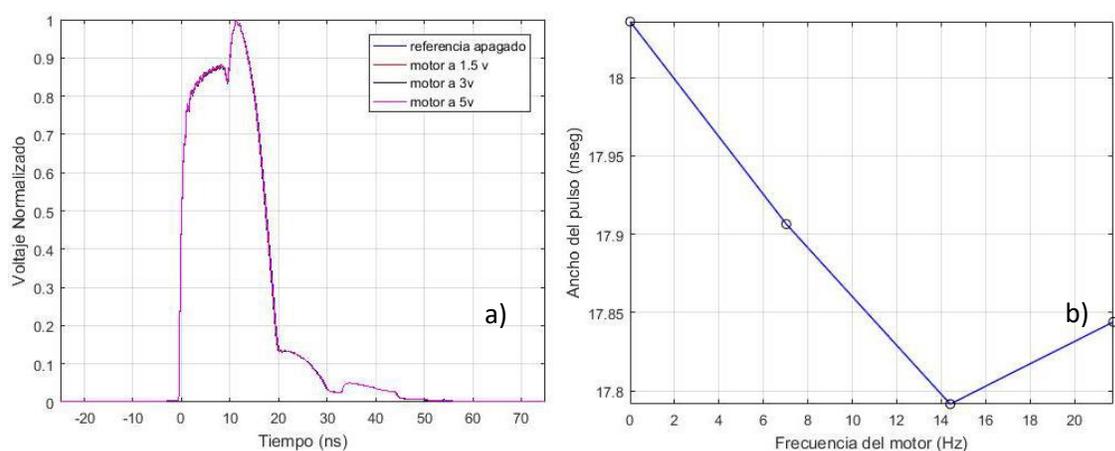


Fig.4.28. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo en anillo, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.28 a.

Tabla 4.9. Parámetros de los ángulos para el cuarto arreglo del interferómetro en anillo.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 355°	Placa A 140°
Placa $\lambda/4$ 50°	Placa B 168°
Placa $\lambda/2$ 175°	Placa C 30°
Placa $\lambda/4$ 155°	

Para observar cómo le afectaban las vibraciones de sonido al dispositivo fue incorporada una bocina cerca del interferómetro (Figura 4.29, inciso a), en la cual por medio de la aplicación en línea “Generador de tonos de online Mic test” se le introducían diferentes frecuencias.

Para esta prueba se fijó la intensidad del volumen de la aplicación al 50%, una onda senoidal de entrada y respetando los ángulos de las placas de la Tabla 4.9, guardando los resultados con 3000 promedios.

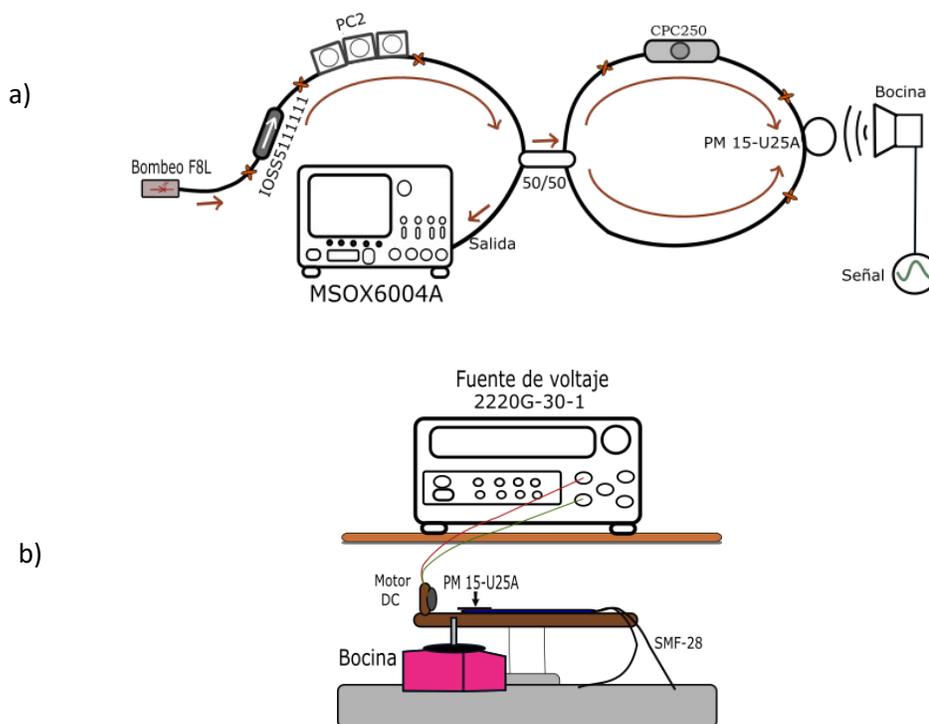


Fig.4.29. a) Arreglo experimental con bocina, b) Configuración del sistema para

aplicarle diferentes frecuencias.

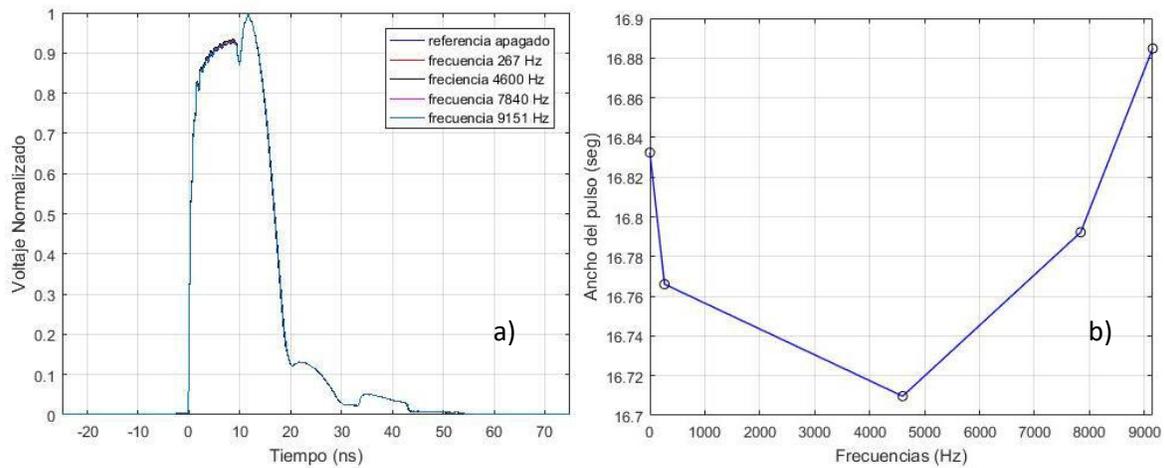


Fig.4.30. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo todo fibra con placas en los ángulos de la Tabla 4.9, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.30 a.

Fue notada una respuesta de linealización que por la forma se parece mucho a una función parabólica, que, aunque no sea lineal nos indica que existe un cambio en la señal resultante al variar las frecuencias que percibe el sistema.

Fueron implementadas otras pruebas teniendo más puntos de variación de voltaje, para este caso se respetaron los ángulos de la Tabla 4.9, comenzando la variación de voltajes de 1 a 5 Volts con intervalos de 0.5 V, el ancho del pulso para este caso se encuentra entre los 19 nanosegundos.

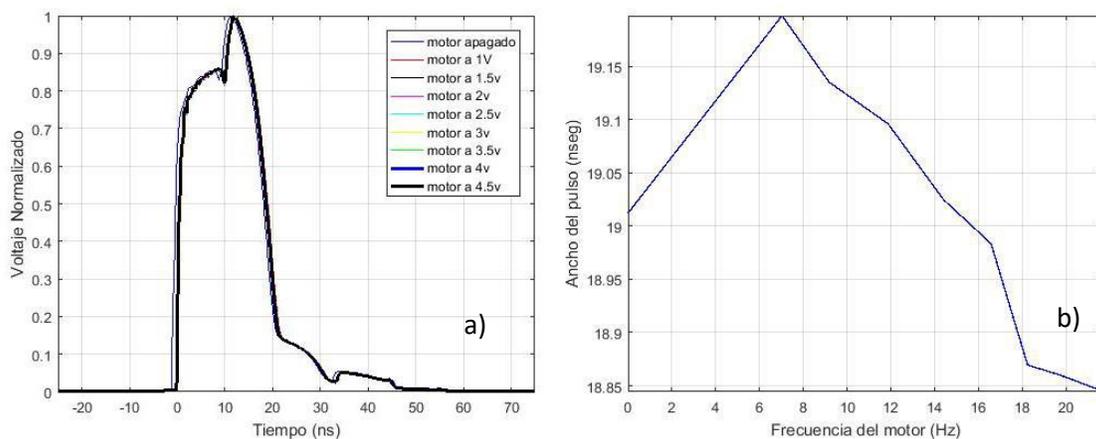


Fig.4.31. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo, variando el voltaje con intervalos de 0.5 Volts, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.31 a.

Con estas pruebas fue apreciado un corrimiento de la señal con un comportamiento casi lineal, no obstante, el voltaje sube drásticamente de 0 a 1.5 Volts esto se cree que es debido al tiempo de retardo del motor al momento de encender, por lo cual, se decidió analizar el rango de 7.03 a 21.75 Hz, teniendo así la respuesta que se contempla en la Figura 4.32, en la cual para adquirir una curva de aproximación que siguiera a los datos reales se utilizó un polinomio de primer orden, teniendo así la función $f(x) = -0.02568x + 19.38$.

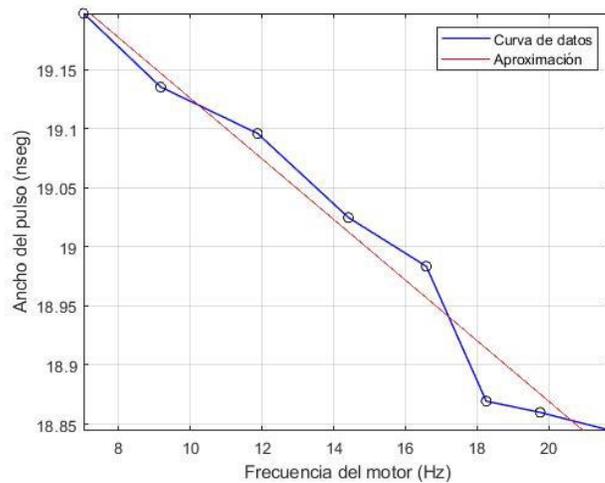


Fig.4.32. Gráfica de linealización con curva de aproximación aplicando un polinomio de primer orden.

Para analizar cómo se comportaba con diversas frecuencias fueron introducidas diversas señales frecuenciales por medio de la aplicación móvil, donde el volumen de la aplicación se tenía en 9% y el volumen del dispositivo móvil al 100%, con una onda de entrada senoidal.

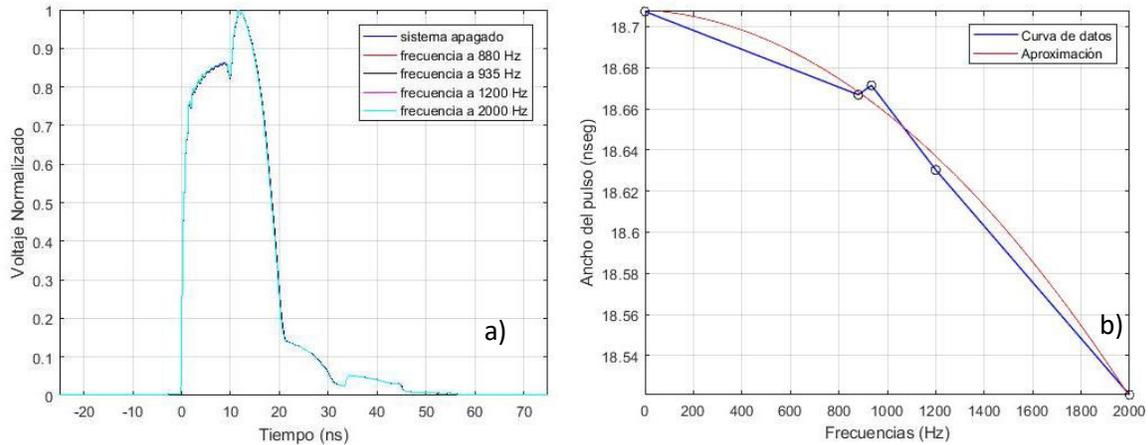


Fig.4.33. a) Respuesta al pulso variando las frecuencias de entrada, b) Curva de aproximación de la respuesta del pulso de la Figura 4.33 a.

La respuesta de la Figura 4.33 b) se observa con mayor linealidad, esto debido a como se fue incrementando gradualmente y en intervalos no tan alejados, logrando tener una curva de aproximación obtenida por un polinomio de segundo grado teniendo $f(x) = -4.36 \times 10^{-08}x^2 - 6.816 \times 10^{-06}x + 18.71$, sin embargo, la curva original no sigue completamente la curva de aproximación.

Posteriormente se decidió variar el ángulo de las placas del sistema (Tabla 4.10) sin perder la forma del pulso, con la finalidad de tener una región de mayor sensibilidad.

Tabla 4.10. Parámetros de los ángulos para el cuarto arreglo del interferómetro en anillo.

Placas del láser F8L	Placas del dispositivo
Placa automatizada $\lambda/4$ 355°	Placa A 140°
Placa $\lambda/4$ 75°	Placa B 168°
Placa $\lambda/2$ -10°	Placa C 30°
Placa $\lambda/4$ 30°	

Las pruebas en este caso fueron variando igualmente desde 1 hasta 5 Volts con intervalos de 0.5 Volts, los ángulos de posicionamiento de las placas nos permitieron tener un ancho de pulso de 18 nano segundos.

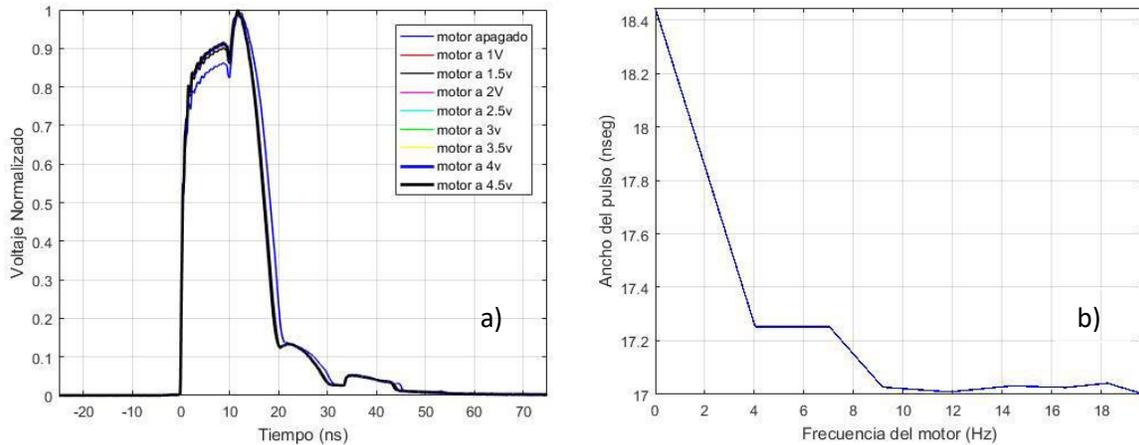


Fig.4.34. a) Respuesta al pulso variando el voltaje del motor, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.34 a.

Fue visto que la respuesta para el caso de la Figura 4.34 b), tiene un decaimiento en la señal con ligeras variaciones en los voltajes de 1 a 1.5 Volts, esto puede ser debido al tiempo de retardo del motor o a la fijación de la placa de MDF.

Teniendo nuevos ángulos en las placas (Tabla 4.11) donde variamos el voltaje desde 1.5 volts hasta 5 Volts, aumentándolo cada 0.5 Volts, con una corriente en el F8L de 3 A; lo cual nos dio un resultado similar al de la Figura 4.31, sin embargo, al comparar las Figuras 4.31 a) y 4.25 a) pudimos darnos cuenta de que el ancho del pulso para ambos casos está en 19.2 nanosegundos.

Tabla 4.11. Parámetros de los ángulos para el cuarto arreglo del interferómetro en anillo.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 355°	Placa A 140°
Placa $\lambda/4$ 75°	Placa B 178°
Placa $\lambda/2$ -28°	Placa C 45°
Placa $\lambda/4$ 175°	

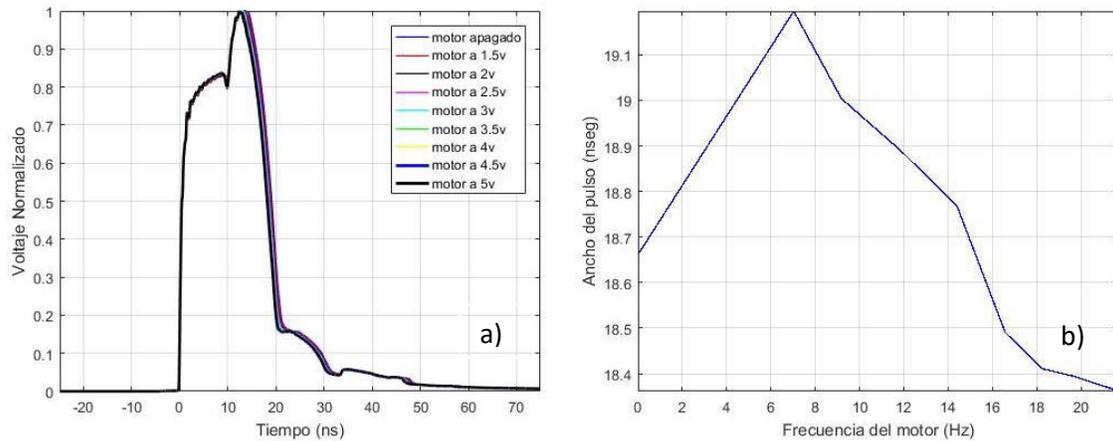


Fig.4.35. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo, variando el voltaje con intervalos de 0.5 Volts, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.35 a).

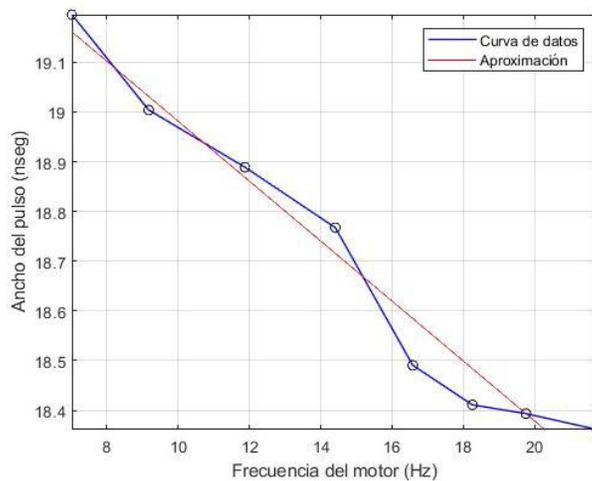


Fig.4.36. Gráfica de linealización respecto a la Figura 4.35 b).

Para estas pruebas fue decidió analizar la parte con mayor linealidad del sistema, siendo esta la sección de decaimiento del dispositivo, teniendo un rango de 7.03 a 21.75 Hz, como se puede apreciar en la Figura 4.36, a la cual se le aplicó una curva de aproximación (línea roja) con un polinomio de grado uno, con una función $f(x) = -0.06036x + 19.59$.

Para este caso fue considerado hacer nuevamente pruebas con frecuencias desde la aplicación móvil, las cuales aumentaban en intervalos de 400 Hz, teniendo las gráficas mostradas en la Figura 4.37. En esta gráfica se puede observar que para frecuencias

menores a 2000 Hz la señal decae y posteriormente oscila un poco, esto puede corregirse al aplicarle un mayor muestreo.

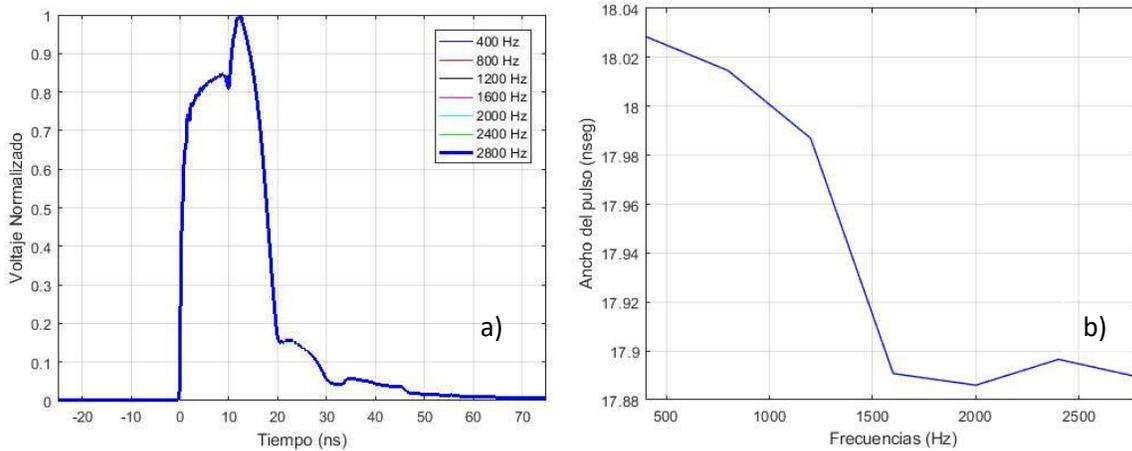


Fig.4.37. a) Respuesta al pulso variando las frecuencias de entrada, b) Variación del ancho del pulso de la Figura 4.37 a.

4.1.2.1. Análisis de resultados

Para la implementación de nuevas pruebas se utilizó el régimen pulsado del láser, variando el voltaje del motor en intervalos de 0.5 Volts desde 0 a 5 V, para corridas ascendentes y descendentes, con la finalidad de observar la histéresis de nuestro sistema, siendo las más lineales las exhibidas a continuación, por lo cual, para el análisis de las siguientes pruebas se emplearon siguientes formulas:

Alcance $A = (\text{límite superior}) - (\text{límite inferior})$ (Ec. 4.6)

Exactitud $Inex = ((\text{Valor ideal}) - (\text{valor medio}) / (\text{Valor ideal})) \times 100$ (Ec. 4.7)

$$Ex = 100\% - |Inex|$$
 (Ec. 4.8)

Precisión $P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$ (Ec. 4.9)

Sensibilidad $S = \frac{d}{dx} f(x) |_{x=x_0}$ (Ec. 4.10)

Histéresis $H = \frac{\text{maz}\{A_0, A_1 \dots A_n\}}{A_s} \times 100$ (Ec. 4.11)

En la primera prueba realizada para estas condiciones, se utilizó un pulso del dispositivo con frecuencia de repetición de 956.5 kHz, con voltaje pico-pico de 1.058 V, con ancho de 20.345 ns, esto con la salida láser de alta potencia teniendo una potencia resultante de aproximadamente 1.2 mW, lo cual bajo considerablemente en comparación a las pruebas anteriores que era de aproximadamente 4 mW. Mientras que para la entrada de nuestro dispositivo se tiene un pulso de voltaje pico-pico de 24.20 mV, ancho de 16.73 y potencia de salida de 0.7 mW.

Variando el voltaje de 1.5 Volts hasta 3.5 Volts, debido a que se intuyó que el motor no poseía una variación constante al aumentar o disminuir el voltaje del motor, teniendo pequeños saltos en la estructura, lo que se puede observar en las siguientes gráficas.

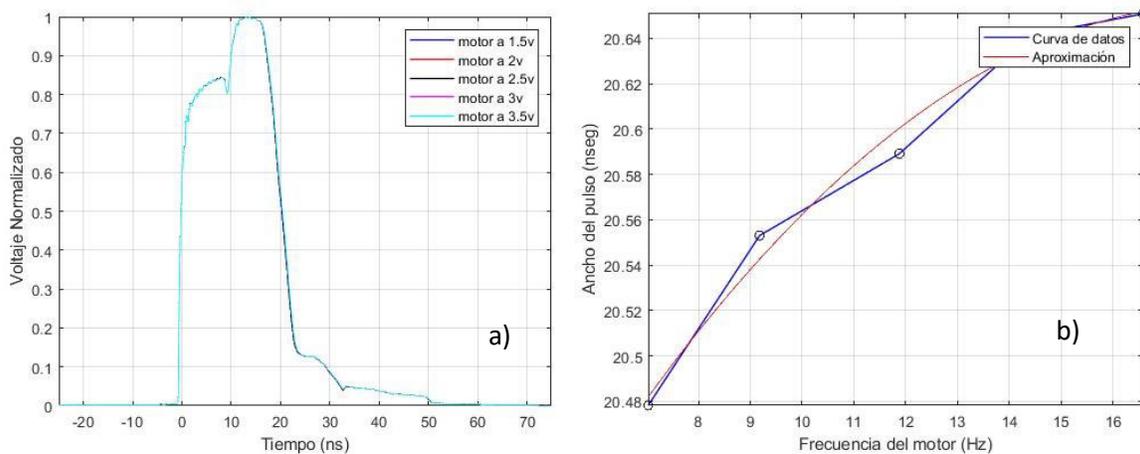


Fig.4.38. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo con placas posicionadas en los ángulos de la Tabla 4.12 con corridas ascendentes, b) Linealización de la respuesta del pulso de la Figura 4.38 a).

Tabla 4.12. Parámetros de los ángulos para el arreglo del interferómetro en anillo, para las Figuras 4.38, 4.39 y 4.40.

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 355°	Placa A 140°
Placa $\lambda/4$ 53°	Placa B 178°
Placa $\lambda/2$ -30°	Placa C 45°
Placa $\lambda/4$ 115°	
Placa a 115°	

Al momento de realizar la gráfica del caso de la Tabla 4.12, fue establecido visualizar la región del rango de 7.03 a 16.58 Hz (Figura 4.38 b), debido a que era la región que se visualizaba de manera más lineal, teniendo una curva ajustada de manera polinomial con función de $f(x) = -0.001411x^2 + 0.0511x + 20.19$

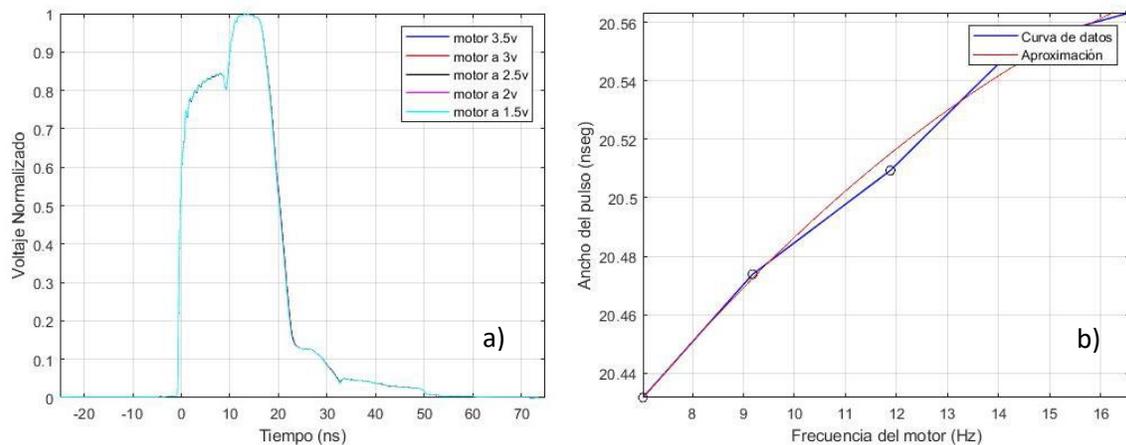


Fig.4.39. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo con placas posicionadas en los ángulos de la Tabla 4.12 con corridas descendentes, b) Linealización con curva de aproximación.

De manera descendente fueron empleado los voltajes de 3.5-1.5 Volts, en un rango de 7.03 a 16.58 Hz, con una función $f(x) = -0.0006725x^2 + 0.02996x + 20.25$. Con la Figura 4.39 b) fue apreciado un ancho mayor para frecuencia de 16.58 Hz (equivalente a 3.5 V) en comparación a la Figura 4.38 b), donde se tiene un incremento de 0.09 Hz.

Para la prueba descendente, el intervalo con mejor respuesta fue de 0 a 16.58 Hz (0 a 3.5 Volts), no obstante, solo se consideró el intervalo de 7.03 a 16.58 Hz para comparar la respuesta de la prueba con la señal resultante de la prueba ascendente.

Como se mencionó con anterioridad, para obtener un análisis completo de los datos se emplearon las fórmulas 4.6 a 4.11, teniendo así las Tablas 4.13, 4.14 y 4.16, con la finalidad de comparar el comportamiento del sensor para visualizar que prueba es la mejor. Cabe mencionar que la resolución para estos casos fue empleado el valor mínimo que se midió

experimentalmente en Hz, tomando un promedio de cada intervalo, no obstante, creemos que puede mejorar la resolución para cada caso, esto al aumentar el voltaje de motor en intervalos más cortos, sin embargo, por cuestiones de tiempo esto no fue corroborado exhaustivamente.

Tabla 4.13. Resultado de análisis con respuesta de decremento y aumento en voltaje, con respecto a la Figura 4.38 y 4.39.

<i>Parámetros</i>	<i>Aumentando voltaje</i>	<i>Decrementando voltaje</i>
Función de transferencia	de $f(x) = -0.001411x^2 + 0.0511x + 20.19$	$f(x) = -0.0006725x^2 + 0.02996x + 20.25$
Rango	Rango en x [7.03 a 16.58] Hz Rango en y [20.48 a 20.65] ns	Rango en x [7.03 a 16.58] Hz Rango en y [20.43 a 20.56] ns
Alcance	Alcance en y [9.55] Hz Alcance en x [0.17] ns	Alcance en y [9.55] Hz Alcance en x [0.13] ns
Exactitud	Con valor medio de 20.5827 Ex= 99.6730264%	Con valor medio de 20.5332 Ex= 99.4311651%
Precisión	P=±0.05135	P=±0.0584
Sensibilidad	0.031261 [ns/Hz]	0.017613 [ns/Hz]
Resolución	2.3875 Hz	2.3875 Hz
Histéresis	52.05882353%	52.05882353%

A diferencia de las otras métricas, la resolución depende del número de puntos que se utilicen, en este caso, se calculó promediando los incrementos de frecuencia para cada intervalo entre muestras.

Fue observado que la exactitud del dispositivo, en este caso, es mayor al aumentar el voltaje, pero la precisión es menor en comparación al momento de decrementar el voltaje, sin embargo, la histéresis del sistema es mejor en esta prueba, comparándola con las pruebas siguientes; en la sensibilidad para estos dos casos podemos notar que de manera creciente el incremento en la salida es mayor.

En la corrida posterior fue incrementado el voltaje utilizado el rango de 3 Volts a 5 Volts, ya que de manera frecuencial era el rango más lineal. Empleando el mismo intervalo de parámetros (Tabla 4.12), la corrida de manera ascendente, empleando una curva de aproximación polinomial, teniendo una función $f(x) = 0.0003941x^2 + 0.003561x + 19.97$.

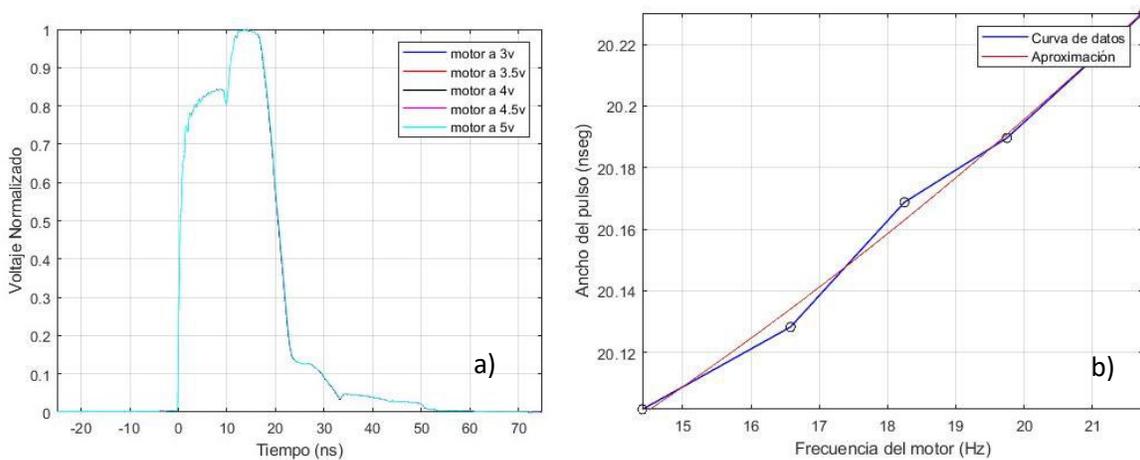


Fig.4.40. a) Respuesta al pulso de salida incrementando el voltaje de 0 a 5 Volts
b) Linealización con curva de aproximación.

Para la corrida descendente se empleó un rango de 5 a 3 Volts en intervalos de 0.5, tendiendo cinco puntos para observar cambio, de este modo se tuvo la respuesta vista en la Figura 4.41, que tiene una función de transferencia de $f(x) = 0.00038x^2 + 0.005961x + 19.95$.

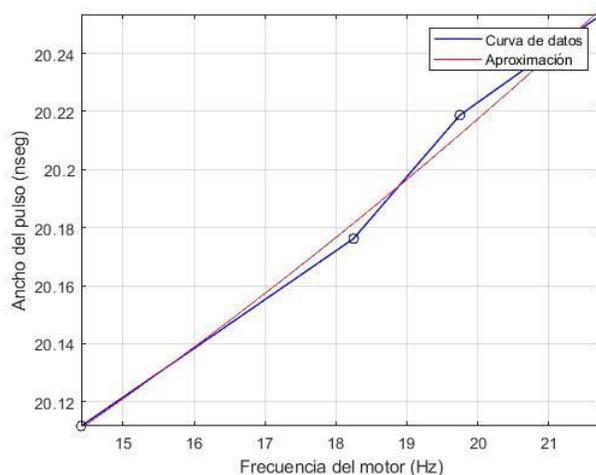


Fig.4.41. Respuesta lineal al pulso de la señal de la salida del dispositivo decrementando el voltaje de 5 a 0 Volts.

De manera descendente fue observado que a mayor frecuencia el pulso posee mayor ancho en comparación a su parte ascendente.

Aunque los rangos no son los mismos para los tres casos Tabla 4.13, 4.14 y 4.16, el alcance no varió de manera considerable siendo un rango de 0.12 a 0.3 nanosegundos. Para el segundo caso (Figura 4.40 y 4.41), se tienen la misma cantidad de datos tomada que en la prueba uno (Figura 4.38 y 4.39), pero se tiene una mayor exactitud, siendo más notoria en el decremento del voltaje, pero la precisión e histéresis disminuyeron.

Tabla 4.14. Resultado de análisis con respuesta de decremento y aumento en voltaje, con respecto a la Figura 4.39 y 4.40.

<i>Parámetros</i>	<i>Aumentando voltaje</i>	<i>Decrementando voltaje</i>
Función de transferencia	$f(x) = 0.0003941x^2 + 0.003561x + 19.97$	$f(x) = 0.00038x^2 + 0.005961x + 19.95$
Rango	Rango en x [14.41 a 21.75] Hz Rango en y [20.1015 a 20.2302] ns	Rango en x [14.41 a 21.75] Hz Rango en y [20.1117 a 20.2535] ns
Alcance	Alcance en y [7.34] Hz Alcance en x [0.1287] ns	Alcance en y [7.34] Hz Alcance en x [0.1418] ns
Exactitud	Con valor medio de 20.16368 Ex= 99.9746078%	Con valor medio de 21.19005 Ex=100%
Precisión	P=±0.03326	P=±0.039175
Sensibilidad	0.020704 [ns/Hz]	0.020971 [ns/Hz]
Resolución	1.835 Hz	1.835 Hz
Histéresis	42.0394737%	42.0394737%

Se optó por cambiar la forma del pulso de la señal resultante del interferómetro en anillo, teniendo los ángulos de las placas de la Tabla 4.15 con corriente suministrada al láser F8L de 3.5 A con 7.14 Watts.

Tabla 4.15. Parámetros de los ángulos para el arreglo del interferómetro en anillo

<i>Placas del láser F8L</i>	<i>Placas del dispositivo</i>
Placa automatizada $\lambda/4$ 95°	Placa A 170°
Placa $\lambda/4$ 13°	Placa B 148°
Placa $\lambda/2$ 178°	Placa C 200°
Placa $\lambda/4$ 175°	
Placa a 95°	
Placa b 95°	

Estos ángulos dieron una frecuencia de repetición de 956.42 kHz, con 24.98 mV pico-pico y un ancho de 21.2 ns, para la salida del láser F8L, teniendo una potencia de 3.5 mW. Para la salida del dispositivo en anillo resultó con una potencia promedio de 5 mW, con pulsos de frecuencia de repetición de 956.51 kHz, con 1.413 V pico-pico y un ancho de 30.614 ns. Con estos parámetros y variando el voltaje de 0 a 8 Volts, en intervalos de 1 Volt, de manera ascendente y descendente, tomando solo la parte del pulso donde la señal se ensancha o estrecha.

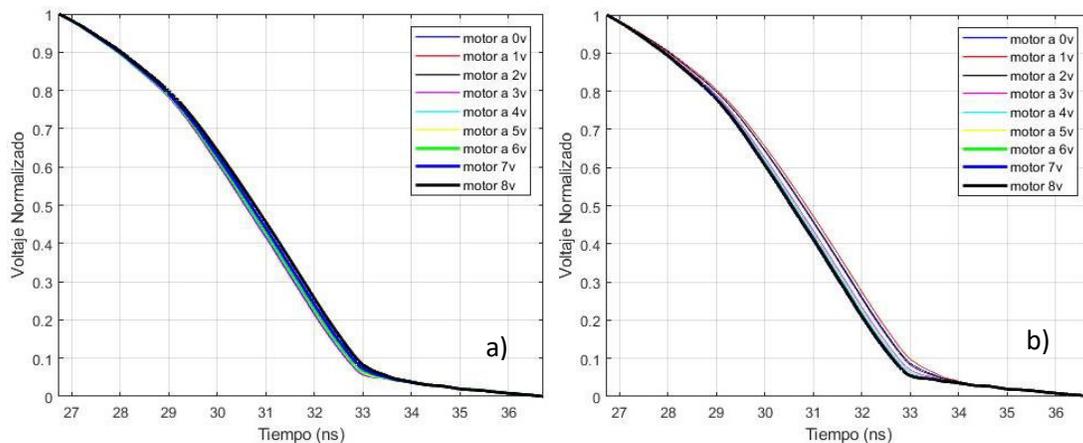


Fig.4.42. a) Respuesta al pulso de la señal de la salida del incrementando el voltaje de 0 a 8 Volts b) Respuesta al pulso de la señal de la salida del dispositivo

decrementando el voltaje de 8 a 0 Volts.

Al momento de linealizar ambas respuestas de la Figura 4.42, se descartaron los voltajes de 0 a 3 Volts, debido a que arrojaban un sobre pico en la señal de respuesta, tomando así solo el rango de 2 a 8 Volts para ambos casos.

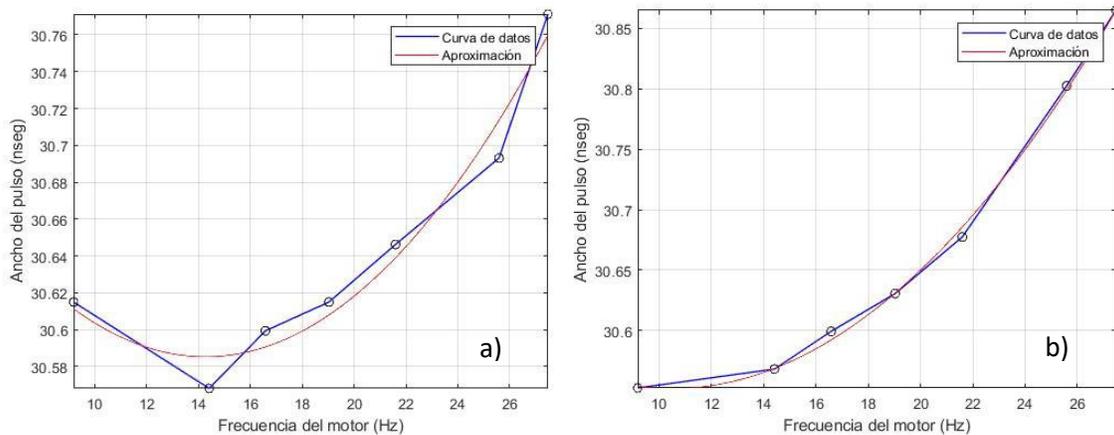


Fig.4.43. a) Respuesta de la salida del dispositivo con voltaje de 2 a 8 Volts b) Respuesta decrementando el voltaje de 8 a 2 Volts.

Para la Figura 4.43 a) se tiene una función $f(x) = 0.001002x^2 - 0.02862x + 30.79$ y de manera descendente se tiene una función de $f(x) = 0.001083x^2 - 0.02272x + 30.67$, esto tomando 7 puntos de la zona.

Tabla 4.16. Resultado de análisis con respuesta de decremento y aumento en voltaje, con respecto a la Figura 4.42.

Parámetros	Aumentando voltaje	Decrementando voltaje
Función de transferencia	$f(x) = 0.001002x^2 - 0.02862x + 30.79$	$f(x) = 0.001083x^2 - 0.02272x + 30.67$
Rango	Rango en x [8.8 a 27.3679] Hz Rango en y [30.615 a 30.7712] ns	Rango en x [8.8 a 27.3679] Hz Rango en y [30.5526 a 30.8636] ns

Alcance	Alcance en y [18.5679] Hz Alcance en x [0.1562] ns	Alcance en y [18.5679] Hz Alcance en x [0.311] ns
Exactitud	Con valor medio de 30.6440143 Ex= 99.5849574%	Con valor medio de 30.6708857 Ex=99.570882%
Precisión	P=±0.05192335	P=±0.07867528
Sensibilidad	0.02645 [ns/Hz]	0.036802 [ns/Hz]
Resolución	3.1133 Hz	3.1133 Hz
Histéresis	37.0219966%	37.0219966%

Para este último caso, podemos notar que la resolución aumentó considerablemente en comparación a los casos anteriores, así mismo para este caso la histéresis no es favorable, aunque posee mayor margen de precisión.

Actualmente se han reportado sensores elaborados de fibra óptica que son capaces de detectar vibraciones físicas (ya sea mecánicas o estructurales), no obstante, estos dispositivos emplean la Rejilla de Fibra Bragg (FBG) [6,7], dispersión Rayleigh [8], Fabry-Perot [9], Mach-Zehnder [10] o incluso con fibras especiales como de alta [6] y baja [11] birrefringencia, lo cual resulta en una fabricación más compleja, por este motivo es más fácil y económico elaborar un dispositivo interferómetro Sagnac.

Se tiene registro de la elaboración de un sensor de vibración por medio de un interferómetro Sagnac, que emplea fibra mantenedora de polarización y un acoplador de 980/1550 nm y un control de polarización, en su esquema también posee una fuente de bombeo de 980 nm, un filtro WDM y fibra dopada de erbio. El arreglo es montado en una base rodamientos para inducir vibración al dispositivo; analizando su respuesta en dominio espectral [12], el voltaje empleado para las pruebas fue del orden de milivolts, donde las frecuencias de medición van desde 8.20 hasta 33.33 Hz. Lo que resalta nuestro estudio ya que podemos detectar diversos rangos de frecuencia con una sola fuente de bombeo.

Otro dispositivo ya realizado es el estrechamiento de una fibra cónica de núcleo hueco entre

dos fibras SMF-28, basándose en un interferómetro Mach-Zehnder, empleando una fuente de bombeo de 1550 nm, una plataforma vibratoria y analizando la señal con un OSA, donde se obtiene un sensor de vibración de baja frecuencia, teniendo una sensibilidad de 13.5765 dB/W con un rango de frecuencia de 10 a 200 Hz [13]. Mientras tanto en nuestro dispositivo fabricado se realizó el análisis de las señales y caracterización del dispositivo.

Con todos los resultados expuestos se tuvieron muy buenos avances, logrando diseñar un sensor sensible a vibraciones, no obstante, al tener una base elaborada de manera somera y con un motor impreciso, se presentaban rangos donde teníamos que ser cuidadosos para que nuestros resultados fueran viables.

Con la elaboración y caracterización del dispositivo fabricado fueron logrados diversos objetivos específicos como el estudio y análisis de los sensores comerciales para fallas en motores, así como los métodos actuales con los que se desarrollan los implantes cocleares para pacientes con deficiencias auditivas y como la fibra óptica ha desarrollado nuevas vertientes para estas áreas. De igual forma fue desarrollado un programa que puede aportar un estudio teórico-numérico del esquema propuesto.

También logramos desarrollar experimentalmente un interferómetro con fibra óptica de comunicaciones, realizando la caracterización y estudio de señales vibratorias y acústicas detectadas por el interferómetro desarrollado, pudiendo discretizar los resultados más importantes de todas las pruebas realizadas. Llegando a la búsqueda de posibles ideas de optimización del prototipo desarrollado, basándose en mejoras estructurales, de adquisición, filtrado, etc., permitiéndonos plantear de esta manera trabajos a futuro.

4.3. REFERENCIAS

- [1] J. Hernández, Estudio teórico-experimental de un láser de figura ocho y su aplicación en la generación de supercontinuo en fibras ópticas; estudio de la generación de supercontinuo en fibras micro-estructuradas a partir de pulsos de nanosegundos, Centro de Investigaciones en óptica, A.C, pp. 48-50, pp. 78-83, 2012.
- [2] N. Becue, F. Madruga, C. Galíndez, J. Lazaro, J. Lopez, Control del periodo espectral de interferencias en tapers de fibras monomodo, Ingeniería Fotónica, 2013.
- [3] A. Kuznetsov, Fiber-optic sensors for complex monitoring of traction motors, IOPScience, Journal of Physics: Conference Series, 2019, [doi:10.1088/1742-6596/1327/1/012034](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1327/1/012034).
- [4] M. Damian, Detección de falla de desbalance mecánico en motores de inducción por medio de sonido, Jóvenes en la Ciencia, Vol. 2, N°1, 2016.
- [5] H. Jelínková y J. Sulk, Laser characteristics, 2013, [doi: 10.1533/9780857097545.1.17](https://doi.org/10.1533/9780857097545.1.17)
- [6] LUNA, Distributed vibration monitoring using fiber optic accelerometers.
- [7] F. Navarro, Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes, Tecnología en Marcha Vol. 27, N° 4, pp. 11-13, 2014, <https://doi.org/10.18845/tm.v27i4.2080>.
- [8] Hertzino, Sensor de vibración de fibra óptica FS-5100, S/F.
- [9] Y. Zhao, M. Chen, F. Xia, R. Lv, Small in-fiber Fabry-Perot low-frequency acoustic pressure sensor with PDMS diaphragm embedded in hollow-core fiber, ELSEVIER, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 270, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.12.057>.

- [10] Q. Chen, C. Jin, Y. Bao, Z. Li, J. Li, C. Lu, L. Yang y G. Li, A distributed fiber vibration sensor utilizing dispersion induced walk-off effect in a unidirectional Mach-Zehnder interferometer, Optics Express, 2014, [doi: 10.1364/OE.22.002167](https://doi.org/10.1364/OE.22.002167).
- [11] H. Hernández, A. Beltrán, A. Mora, B. Medina, O. Pottiez, Sagnac with Double-Sense Twisted Low-Birefringence Standard Fiber as Vibration Sensor, Optics Express, 2022, [doi: 10.3390/s22218557](https://doi.org/10.3390/s22218557).
- [12] X. Yang, X. Li, J. Shi y C. Miao, Optical fiber vibration sensor for bearing fault detection based on Sagnac interferometer, Laser Physics, 2023, [doi:10.1088/1555-6611/acca04](https://doi.org/10.1088/1555-6611/acca04).
- [13] Y. Zhao, F. Xia, M. Chen y R. Lv, Optical fiber low-frequency vibration sensor based on Butterfly-Shape Mach-Zehnder Interferometer, ELSEIVER, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 273, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.051>.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos a futuro

La elaboración de esta tesis se dividió en dos partes principales; la simulación y el desarrollo experimental, teniendo más peso la segunda parte, en la cual se elaboraron variedades de prototipos con características diferentes demostrando que el sensor en anillo es susceptible a cambios de vibración. Se comprobó que entre mayor cantidad de puntos la sensibilidad y precisión aumentan, sin embargo, la histéresis empeora.

A pesar de que tener problemas de histéresis, debido a que el motor con el que se trabajó no poseía una variación en velocidad constante, ocasionando pequeños saltos en intervalos definidos, dando como resultado errores en la señal de respuesta; el dispositivo desarrollado en este trabajo fue sensible en un amplio rango de frecuencias.

Una de las mayores ventajas que se tiene en el sensor de anillo desarrollado es su fuente de bombeo, debido a que con una fuente de amplio espectro dependiente de la polarización podemos estudiar múltiples regiones donde el sensor presente diferentes respuestas, no obstante, es importante mencionar que es crucial tener un dominio preciso en el control de los parámetros de los pulsos de entrada para que la región de manejo del dispositivo sea más estable.

Otra de las ventajas presentadas en el trabajo es la caracterización del sensor de manera temporal lo cual reduce considerablemente los gastos, pues no se requiere de un analizador de espectros con rango infrarrojo para monitorear los cambios.

5.1. Trabajos a futuro

Con los resultados obtenidos hasta el momento se espera que para futuros trabajos referentes a este tema se implemente en aplicaciones de detección de vocales básicas, así como de sonidos sencillos sonidos específicos, como el de la pronunciación de

vocales básicas u otros sonidos sencillos para posteriormente ser caracterizado.

5.2. Aplicaciones

El desarrollo de este trabajo nos permite ver una amplia gama de aplicaciones, debido a sus múltiples respuestas de entrada, teniendo aplicaciones como son:

- Mejoras sobre sistemas de implantes cocleares, estudios actuales han fomentado la implementación de fibras ópticas para emplearlos en estos aparatos, debido a que su respuesta es más rápida en comparación a los implantes electrónicos.

Por ejemplo, se tiene registrada una patente en 2010 por la corporación EarLens [1], donde se pretende estimular el tejido del oído medio por medio de luz, multiplexando por división de tiempo la señal óptica por medio de una guía de onda a través de pulsos de luz y realizando una demultiplexación con un circuito de conmutación y un temporizador [1]. Otro caso de que la implementación de dispositivos ópticos en implantes cocleares es de gran ayuda se destaca en un trabajo donde se empleó un láser pulsado infrarrojo para estimular las células ganglionares espirales lo cual llevo a respuestas acústicas de tonos de 20 kHz, destacando que al tener un láser infrarrojo la dispersión de la luz es menor [2].

Teniendo trabajos como los mencionados anteriormente podemos ver que la implementación de láseres de fibra óptica pulsados posee buena respuesta en la estimulación del oído, es por ello, que nuestro dispositivo puede entrar en esta aplicación ya que pruebas realizadas demuestran que detecta vibraciones en diferentes regiones de sensibilidad.

- Acelerómetros, se tiene registrado un dispositivo de este tipo por la empresa SERCALO, siendo un acelerómetro de fibra óptica (FOA) Rev. 90-1194-2, el cual maneja un acelerómetro Michelson de fibra óptica [3], teniendo un dispositivo con alta precisión, nivel de ruido bajo y un amplio

ancho de banda, sin embargo, para los dispositivos ya comerciales se tienen especificaciones detalladas, las cuales cambian según el modelo que se maneje, pero como se logró ver en los resultados de nuestro dispositivo podemos lograr el comportamiento de un acelerómetro óptico con diferentes características con solo mover la región de operación por medio de polarización en nuestro dispositivo en anillo.

5.3. Artículos y participaciones en congresos

- S. G. Hernández-García, M. R. Tapia-García, F. A. Gómez-Rodríguez, D. A. Razo-Medina, J. C. Hernández-García, “Estudio, análisis y caracterización de láseres pulsados de fibra óptica para eficientizar modos de operación”, XXVII Verano de la Ciencia Vol. 16 (ISSN: 2395-9797)
- M. R. Tapia-García, S. G. Hernández-García, J. C. Hernández-García, et al, “Estudio temporal y espectral de F8L mediante el uso de un sistema de ajuste automatizado de placas controladoras de polarización”, LXV CNF 2022, Zacatecas, Zacatecas.
- M. R. Tapia-García, S. G. Hernández-García, J. C. Hernández-García, D. A. Razo-Medina, O. Pottiez, J. D. Filoteo-Razo, R. Rojas-Laguna, J. M. Estudillo-Ayala, “Improvements in the study of F8L through automatized adjust system based on polarization control plates”, SPIE Photonics West 2023.
- M. R. Tapia-García, J. C. Hernández-García, S. G. Hernández-García, et al, “Uso de inteligencia artificial en láseres pulsados de fibra óptica”, LXVI CNF 2023, Morelia, Michoacán.
- Manríquez Cobián Natalia, Guevara Hernández Sergio David, Hernández García Juan Carlos, Hernández García Stephanie Guadalupe, Tapia García Maximino Roberto, “Estudio y desarrollo de láseres pulsados altamente energéticos operando a 1,064 nm capaces de generar el fenómeno de explosión de pulsos”, Convocatoria Institucional de Investigación Científica CIIC 003/2023.

- M. R. Tapia-García, J. C. Hernández-García, S. G. Hernández-García, J. D. Filoteo-Razo, J. M. Estudillo-Ayala, R. Rojas-Laguna, O. Pottiez, J. P. Lauterio- Cruz, “Sistema de control automático para el estudio experimental de láseres pulsados”, Congreso de Ciencia Tecnología e Innovación FASBIT-UABJO, Oaxaca, Oaxaca, 2023.
- S. G. Hernández-García, M. R. Tapia-García, J. C. Hernández-García, J.D. Filoteo-Razo, J. M. Estudillo-Ayala, O. Pottiez, J.P. Lauterio- Cruz, Rojas-Laguna “Estudio de un interferómetro de fibra óptica en modo de anillo para el desarrollo de un sensor de vibración”, Congreso de Ciencia Tecnología e Innovación FASBIT-UABJO, Oaxaca, Oaxaca, 2023.
- S. G. Hernandez-García, J. C. Hernández-García, M. R. Tapia-García, J. M. Estudillo-Ayala, O. Pottiez, J.D. Filoteo-Razo, J. M. Sierra-Hernández y R. Rojas-Laguna, “Desarrollo de sensor de vibración mediante interferómetro toda fibra”, LXVII CNF 2024, Chihuahua, Chihuahua.
- M. R. Tapia-García, J. C. Hernández-García, S. G. Hernández-García, et al. “Uso de redes neuronales predictivas en láseres de amarre de modos pasivo”, LXVII CNF 2024, Chihuahua, Chihuahua.
- Sergio D. Guevara-Hernández, Juan C. Hernández-García, José D. Filoteo-Razo, Julián M. Estudillo-Ayala, Stephanie G. Hernández-García, Maximino R. Tapia-García, O. Potiezz, Daniel Jauregui-Vázquez, Daniel A. Razo-Medina, Roberto Rojas-Laguna. Desing and study of fiber optic interferometric devices applied to vibration detection systems, SPIE 2024.
- S.G. Hernandez-Garcia, M. R. Tapia-García, J. C. Hernandez-García, J. M. Estudillo-Ayala, O. Pottiez, J. D. Filoteo-Razo, J. P. Lauterio-Cruz, R. Rojas-Laguna “Study and development of a compact fiber optic ring interferometer for implementation of vibration sensor using noise-like pulses”, Photonics North 2024, Vancouver Canada.

- Juan C. Hernandez-García, Stephanie G. Hernandez-Garcia, Julian M. Estudillo-Ayala, Maximino R. Tapia-Garcia, José D. Filoteo-Razo³, Olivier Pottiez, Juan M. Sierra-Hernandez, Roberto Rojas-Laguna, “Use of Noise-Like pulses in Fiber optic interferometric devices to improve sensitivity of vibration sensor”, Photonics West, San Francisco 2025.

5.4. REFERENCIAS

- [1] Corporation EarLens, Optical cochlear stimulation devices and methods, 2010.
- [2] A. Izzo, E. Suh, J. Pathria, J. Walsh, D. Whitlon y C. Richter, Selectivity of neural stimulation in the auditory system: a comparison of optic and electric stimuli, SPIE, Journal of Biomedical Optics, Vol. 12, N° 2, 2007, <https://doi.org/10.1117/1.2714296>.
- [3] SERCALO, Optical accelerometer FOA, <https://www.sercalo.com/products/fiber-optical-accelerometer>, S/F.
- [4] V. Sepúlveda y J. Osorio, Implantes cocleares ópticos: una herramienta promisorio de tratamiento para la hipoacusia, Revista de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello, 2023, [doi:10.4067/s0718-48162023000300317](https://doi.org/10.4067/s0718-48162023000300317).

Anexos

Anexo 1. Simulación de un interferómetro Sagnac (Análisis y modelado)

```
clear all
close all
clc

Vectores=load('REF2.csv'); %la referencia del supercontinuo
VectorX=Vectores(:,1);
VectorY=Vectores(:,2);
z=length(VectorX);
DeltaX=abs(VectorX(2,1)-VectorX(1,1));
LongitudOndalIni=VectorX(1,1);
LongitudOndaFin=VectorX(z,1);

% Longitud de onda en nm
wavelength=VectorX; % Señal de entrada al sistema interferometrico

A=1;
alpha=0;
k1=0.5;
L_1=205; % cm
L1=L_1*0.01;
L_2=201; % cm
L2=L_2*0.01;
n=1.46;
psi=pi/2; %Ángulo de polarizacion (entrada)

figure(1)

q1=[0:1:10];
for ii=1:1:length(q1)

    %q=11 %torsion
    q=q1(ii);

    for i=1:length(wavelength)

        B=(0.05*0.073*q)*((2*pi)/((wavelength(i)*1e-9)));
        delta_phi=B*n*(L1-L2);

        % Matrices de Jones
        % Entrada Ein
        % Ein=[A*cos(alpha); 0];
        Ein=[exp(i*psi); exp(-i*psi)];

        % Acoplador 1
        C1=[sqrt(1-k1) 1i*sqrt(k1);1i*sqrt(k1) sqrt(1-k1)];

        % Fibra en el brazo 1 y 2
        F=[exp(-1i*n*B*L1) 0;0 exp(-1i*B*n*L2)];

        % Salida
        Eout=C1*F;

        T_1(i,1)=(abs(Eout(1,1))^2)/(abs(Ein(1,1))^2+abs(Ein(2,1))^2);

        T_2(i,1)=(abs(Eout(2,1))^2)/(abs(Ein(1,1))^2+abs(Ein(2,1))^2);

        T(i,1)=(1/2)+((1/2)*cos(2*delta_phi));
    end

    A=db(T_1,'power');
```

```

B=db(T_2,'power');
C=db(T,'power');
D=db(VectorY);

subplot(ceil(sqrt(length(q1))),ceil(sqrt(length(q1))),ii)
plot(wavelength,C+D+10,'LineWidth',2.5)

xlim([min(wavelength) max(wavelength)])
ylim([min(-90) max(0)])

xlabel('Longitud de onda (nm)','FontWeight','Bold','color','k')
ylabel('Transmission (dBm)','FontWeight','Bold','color','k')
set(gca,'linewidth',1.5)
titulo=strcat('Patron con torcion q = ',num2str(q));
title(titulo,'FontWeight','Bold','color','k','FontSize',18)
grid on;

end

```

Anexo 2. Simulación de un interferómetro para detección acuto-óptica con potencia aplicada

```

clear all;
close all;
warning off

% -----
% PARAMETROS DEL ARREGLO

Pin=10;    % Potencia de entrada [mW]
L=5;      % cm
C=0.1;    % adimensional
Be=1;     % Coeficiente no lineal para SMF-28 (Lineal)
q=9;      % torsiones
n=1.46;   % Indice de refraccion
L1=205;   % cm de camino torcido en brazo 1
L2=201;   % cm de camino torcido en brazo 2
Psi=pi/2; % Polarizacion

% -----
% DATOS EXPERIMENTALES

Vectores=load('REF2.csv');

VectorXRef=Vectores(:,1); % Amplio espectro de referencia
VectorYRef=Vectores(:,2);

VectorXExp=Vectores(:,5); % Espectro a la salida del interferómetro
VectorYExp=Vectores(:,6);

h1=figure(1);
pos_fig1 = [350 150 800 500];
set(h1,'Position',pos_fig1);
axes1 = axes('Parent',h1);
box(axes1,'on');
set(h1,'ToolBar','none');

plot(VectorXRef,10*log10(VectorYRef),'r','LineWidth',2.5)
hold on
plot(VectorXExp,10*log10(VectorYExp),'m','LineWidth',2.5)
grid on
xlabel('Longitud de onda (nm)','FontWeight','Bold','color','k')
ylabel('Potencia (dBm)','FontWeight','Bold','color','k')

```

```

title('Espectro','FontWeight','Bold','color','k','FontSize',18)

% -----
% MATRICES DE JONES

% Ajuste de unidades a km
wavelength=VectorXRef; % SeÃ±al de entrada al sistema interferomÃ©trico
L=L*(10^-2)*(10^-3);
L1=L1*(10^-2)*(10^-3);
L2=L2*(10^-2)*(10^-3);
wavelength=wavelength*1E-12;
Pin=Pin*10^-3;

% Constante de propagacion dependiente de la torciÃ³n y fases
cte1=25; %25 para la cyan y 55 la magenta
cte2=0.073;
cte3=1.75; %1.75 para la cyan y 5.5 la magenta

B=(cte3*q)*(2*pi./wavelength');
delta_phi=B*n*(L1-L2);

% Entrada Ein
Ein=[exp(1i*Psi);exp(-1i*Psi)];

% Fibra en el brazo 1 y 2
%F=[exp(-i*n*B*L1) 0;0 exp(-i*B*n*L2)];

% Polarizacion inducida
QWRcw=(1/sqrt(2))*[1 -1i;-1i 1];
QWRccw=(1/sqrt(2))*[1 -1i;-1i 1];

% Fibra torcida
Fcw=[exp(1i*3*Be*L*Pin/4) 0;0 exp(1i*3*Be*L*Pin/4)];
Fccw=[exp(1i*Be*(3+sin(2*Psi))*L*(Pin)/4) 0;0 exp(1i*Be*(3-sin(2*Psi))*L*(Pin)/4)];

% -----
% RESPUESTA

% Analisis de matrices
Eoutcw=C*sqrt(Pin)*QWRcw*Fcw*Ein;
Eoutccw=-(1-C)*sqrt(Pin)*Fccw*QWRccw*Ein;

Eout=Eoutcw+Eoutccw;

T=(abs(Eout).^2)/Pin; % Transmision de mi esquema
Respuesta=((abs((T(1)+T(2))/2)))*((1/2)*cos(2*delta_phi));

fx=10*log10(Respuesta)+10*log10(VectorYRef);

plot(VectorXRef,fx,'b','LineWidth',2.5)

% otra respuesta l=l1+l2+2*sqrt(l1*l2)*cos(d)
l1=mean(abs(Eoutcw).^2);
l2=mean(abs(Eoutccw).^2);
lout=l1+l2+2*sqrt(l1*l2)*cos(delta_phi);
Respuesta2=lout;

%alpha=10*log10(max(VectorYExp)/max(VectorYRef));
fx2=10*log10(Respuesta2)+10*log10(VectorYRef');
%plot(VectorXRef,fx2,'m','LineWidth',2.5)
%

legend('Referencia','Experimental','Simulacion','Simulacion 2')
set(gca,'linewidth',1.5)

```

```

f=gcf;
%exportgraphics(f,'bonito1.png','Resolution',1000)

% -----
% MODOS CON FOURIER
% Analizando las características de los modos propagantes

t=wavelength*10^12;
Ts=t(2)-t(1);
Fs=1/Ts;
x1=10*log10(VectorYExp);
x2=fx;

nDatos=length(x2);

% Trabajando con la Transformada rápida de Fourier
Yexp = fft(x1);
Ysim = fft(x2);

P2exp = abs(Yexp/nDatos);
P1exp = P2exp(1:nDatos/2+1);
P1exp(2:end-1) = 2*P1exp(2:end-1);
P2sim = abs(Ysim/nDatos);
P1sim = P2sim(1:nDatos/2+1);
P1sim(2:end-1) = 2*P1sim(2:end-1);

f = Fs*(0:(nDatos/2))/nDatos; % Vector de frecuencia

h2=figure(2);
pos_fig2 = [350 150 800 500];
set(h2,'Position',pos_fig2);
axes2 = axes('Parent',h2);
box(axes2,'on');
set(h2, 'ToolBar', 'none');

subplot(2,1,1)
hold on
%plot(t,x1,'r','LineWidth',1)
plot(t,x2,'b','LineWidth',2.5)
title('Patron de interferencia')
xlabel('Longitud de onda (nm)')
ylabel('Potencia (dBm)')
grid on
set(gca,'linewidth',1.5)
%legend('Experimental','Simulation')

subplot(2,1,2)
hold on
%plot(f,P1exp/max(P1exp),'r','LineWidth',1)
plot(f,P1sim/max(P1sim),'Color',[153/255 0 153/255],'LineWidth',2.5)
title('Transformada de Fourier')
xlabel('Frecuencias (1/nm)')
ylabel('Amplitud')
grid on
set(gca,'linewidth',1.5)
axis([0 4 0 0.5])
%legend('Experimental','Simulation')

f=gcf;

```

Anexo 3. Programa en Arduino para controlar la velocidad del motor y recopilar la información de lectura

```
int motor=3; // pinMOTOR PWM
int potPin=0; // pinAnalogico Pot
int pwm,pot; // Variables

#include <Wire.h>
#include <MPU6050.h>

MPU6050 mpu;

void setup()
{
  pinMode(motor,OUTPUT);

  Serial.begin(115200);

  Serial.println("Initialize MPU6050");

  while(!mpu.begin(MPU6050_SCALE_2000DPS, MPU6050_RANGE_2G))
  {
    Serial.println("Could not find a valid MPU6050 sensor, check wiring!");
    delay(500);
  }

  checkSettings();
}

void loop()
{
  pot=analogRead(potPin);
  pwm=map(pot,0,1025,0,255);
  if (pwm>30)
  {
    analogWrite(motor,pwm);
  }
  else
  {
    analogWrite(motor,255);
    delay(3000);
    analogWrite(motor,0);
    delay(3000);
  }

  Vector normAccel = mpu.readNormalizeAccel();

  Serial.print(pwm);
  Serial.print(" Xnorm = ");
  Serial.println(normAccel.XAxis);

  delay(10);
}

void checkSettings()
{
  Serial.println();

  Serial.print(" * Sleep Mode:      ");
  Serial.println(mpu.getSleepEnabled() ? "Enabled" : "Disabled");

  Serial.print(" * Clock Source:      ");
  switch(mpu.getClockSource())
  {
```

```

case MPU6050_CLOCK_KEEP_RESET: Serial.println("Stops the clock and keeps the timing generator in reset"); break;
case MPU6050_CLOCK_EXTERNAL_19MHZ: Serial.println("PLL with external 19.2MHz reference"); break;
case MPU6050_CLOCK_EXTERNAL_32KHZ: Serial.println("PLL with external 32.768kHz reference"); break;
case MPU6050_CLOCK_PLL_ZGYRO: Serial.println("PLL with Z axis gyroscope reference"); break;
case MPU6050_CLOCK_PLL_YGYRO: Serial.println("PLL with Y axis gyroscope reference"); break;
case MPU6050_CLOCK_PLL_XGYRO: Serial.println("PLL with X axis gyroscope reference"); break;
case MPU6050_CLOCK_INTERNAL_8MHZ: Serial.println("Internal 8MHz oscillator"); break;
}

Serial.print(" * Accelerometer: ");
switch(mpu.getRange())
{
case MPU6050_RANGE_16G: Serial.println("+/- 16 g"); break;
case MPU6050_RANGE_8G: Serial.println("+/- 8 g"); break;
case MPU6050_RANGE_4G: Serial.println("+/- 4 g"); break;
case MPU6050_RANGE_2G: Serial.println("+/- 2 g"); break;
}

Serial.print(" * Accelerometer offsets: ");
Serial.print(mpu.getAccelOffsetX());
Serial.print(" / ");
Serial.print(mpu.getAccelOffsetY());
Serial.print(" / ");
Serial.println(mpu.getAccelOffsetZ());

Serial.println();
}

```

Anexo 4. Programa en Arduino para controlar la velocidad del motor por medio de un acelerómetro

```

/*
MPU6050 Triple Axis Gyroscope & Accelerometer. Simple Accelerometer Example.
Read more: http://www.jarzebski.pl/arduino/czujniki-i-sensory/3-osowy-zyroskop-i-akcelerometr-mpu6050.html
GIT: https://github.com/jarzebski/Arduino-MPU6050
Web: http://www.jarzebski.pl
(c) 2014 by Korneliusz Jarzebski
*/
#include <Wire.h>
#include <MPU6050.h>

MPU6050 mpu;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);

  Serial.println("Initialize MPU6050");

  while(!mpu.begin(MPU6050_SCALE_2000DPS, MPU6050_RANGE_2G))
  {
    Serial.println("Could not find a valid MPU6050 sensor, check wiring!");
    delay(500);
  }

  // If you want, you can set accelerometer offsets
  // mpu.setAccelOffsetX();
  // mpu.setAccelOffsetY();
  // mpu.setAccelOffsetZ();

  checkSettings();
}

void checkSettings()
{
  Serial.println();
}

```

```

Serial.print(" * Sleep Mode:      ");
Serial.println(mpu.getSleepEnabled() ? "Enabled" : "Disabled");

Serial.print(" * Clock Source:    ");
switch(mpu.getClockSource())
{
  case MPU6050_CLOCK_KEEP_RESET:  Serial.println("Stops the clock and keeps the timing generator in reset"); break;
  case MPU6050_CLOCK_EXTERNAL_19MHZ: Serial.println("PLL with external 19.2MHz reference"); break;
  case MPU6050_CLOCK_EXTERNAL_32KHZ: Serial.println("PLL with external 32.768kHz reference"); break;
  case MPU6050_CLOCK_PLL_ZGYRO:   Serial.println("PLL with Z axis gyroscope reference"); break;
  case MPU6050_CLOCK_PLL_YGYRO:   Serial.println("PLL with Y axis gyroscope reference"); break;
  case MPU6050_CLOCK_PLL_XGYRO:   Serial.println("PLL with X axis gyroscope reference"); break;
  case MPU6050_CLOCK_INTERNAL_8MHZ: Serial.println("Internal 8MHz oscillator"); break;
}

Serial.print(" * Accelerometer:  ");
switch(mpu.getRange())
{
  case MPU6050_RANGE_16G:   Serial.println("+/- 16 g"); break;
  case MPU6050_RANGE_8G:    Serial.println("+/- 8 g"); break;
  case MPU6050_RANGE_4G:    Serial.println("+/- 4 g"); break;
  case MPU6050_RANGE_2G:    Serial.println("+/- 2 g"); break;
}

Serial.print(" * Accelerometer offsets: ");
Serial.print(mpu.getAccelOffsetX());
Serial.print(" / ");
Serial.print(mpu.getAccelOffsetY());
Serial.print(" / ");
Serial.println(mpu.getAccelOffsetZ());

Serial.println();
}

void loop()
{
  Vector rawAccel = mpu.readRawAccel();
  Vector normAccel = mpu.readNormalizeAccel();

  //Serial.print(" Xraw = ");
  //Serial.print(rawAccel.XAxis);
  //Serial.print(" Yraw = ");
  //Serial.print(rawAccel.YAxis);
  //Serial.print(" Zraw = ");
  //Serial.println(rawAccel.ZAxis);

  Serial.print(" Xnorm = ");
  Serial.println(normAccel.XAxis);
  //Serial.print(" Ynorm = ");
  //Serial.print(normAccel.YAxis);
  //Serial.print(" Znorm = ");
  //Serial.println(normAccel.ZAxis);

  delay(10);
}

```

Anexo 5. Programa en Matlab para graficar datos del osciloscopio

```

%=====
%Pruebas de sensor de vibración en osciloscopio
%=====

clear all

```

```

%--- Carpeta de archivos ---
carpeta='C:\Users\Stephanie\Desktop\Pruebas\6\';
%-----
%-----
%--- Nombre de los archivos---
archivo1='11.CSV';
archivo2='12.CSV';
archivo3='13.CSV';
archivo4='14.CSV';
archivo5='15.CSV';
%-----

%-----
%---Documentos en excel---
datosOSC=xlsread(strcat(carpeta,archivo1),'A5:B2002');
t1=datosOSC(:,1);
V1=datosOSC(:,2);

datosOSC2=xlsread(strcat(carpeta,archivo2),'A5:B2002');
t2=datosOSC2(:,1);
V2=datosOSC2(:,2);

datosOSC3=xlsread(strcat(carpeta,archivo3),'A5:B2002');
t3=datosOSC3(:,1);
V3=datosOSC3(:,2);

datosOSC4=xlsread(strcat(carpeta,archivo4),'A5:B2002');
t4=datosOSC4(:,1);
V4=datosOSC4(:,2);

datosOSC5=xlsread(strcat(carpeta,archivo5),'A3:B2002');
t5=datosOSC5(:,1);
V5=datosOSC5(:,2);
%-----

%-----
%---Para anchos del pulso---
w(1)=pulsewidth(V1,t1)*10^9; %medir ancho del pulso
w(2)=pulsewidth(V2,t2)*10^9;
w(3)=pulsewidth(V3,t3)*10^9;
w(4)=pulsewidth(V4,t4)*10^9;
w(5)=pulsewidth(V5,t5)*10^9;
%-----

%-----
%---Voltaje del motor---
Vm=[14.41,16.58,18.25,19.75,21.75]; %voltaje para pulsos
% %---Para frecuencia de pulsos---
% F=[0,267,4600,7840,9151]; %frecuencias
%-----

%-----
% % Normalización de pulsos
%-----
V1=V1-min(V1);
V1=V1/max(V1);
t1=t1*10^9;

V2=V2-min(V2);
V2=V2/max(V2);
t2=t2*10^9;

V3=V3-min(V3);
V3=V3/max(V3);
t3=t3*10^9;

V4=V4-min(V4);
V4=V4/max(V4);
t4=t4*10^9;

```

```

V5=V5-min(V5);
V5=V5/max(V5);
t5=t5*10^9;
%-----

%-----
% Graficar
%-----
figure(1)
plot(t1,V1,'b','LineWidth',1);
grid on
hold on

plot(t2,V2,'r','LineWidth',1);
grid on

plot(t3,V3,'k','LineWidth',1);
grid on

plot(t4,V4,'m','LineWidth',1);
grid on

plot(t5,V5,'c','LineWidth',1);
grid on
%-----

%-----
%--- Para graficar pulsos---
xlabel('Tiempo (ns)')
ylabel('Voltaje Normalizado')
axis([min(t4) max(t4) 0 1])

%--- Titulo Para voltaje pulsos ---
legend ('motor 0v','motor a 1.5v','motor a 3v','motor a 5v')
% Grafica de linealizacion para pulsos
% -----
figure (2)
p3=plot(Vm, w,'b','LineWidth',1);
ylabel('Ancho del pulso (seg)')
xlabel('Voltaje del motor (V)')
axis([min(Vm) max(Vm) min(w) max(w)])
grid on
%-----

%-----
[f,gof]=fit(Vm',w','poly3');
xq=linspace(min(Vm),max(Vm),2000);
hold on
scatter(Vm,w,'k')
ylim([min(w),max(w)])
p2=plot(xq,f(xq),'r')
legend([p3 p2],{'Curva de datos',"Aproximación"})

gof=struct2table([gof,RowNames=["f"]])
%-----

%-----
% --- Titulo Para frecuencias ---
% legend ('0 Hz','267 Hz','4600 Hz','7840 Hz','9151 Hz')
% Grafica de linealizacion para frecuencias
% -----
% figure (2)
% plot(F, w,'b','LineWidth',1);
% ylabel('Ancho del pulso (seg)')
% xlabel('Frecuencias (Hz)')
% xlim([min(F) max(F)])
% grid on
%-----

```

Anexo 6. Programa en Matlab para graficar datos del OSA

```
%=====
%Pruebas de sensor de vibración en OSA
%=====

clear all

%--- Carpeta de archivos ---
carpeta='C:\Users\Stephanie\Desktop\Pruebas interferometro\17\OSA\';
%-----

%-----
%--Cargar archivos---
archivo1='22-11-24-SU.CSV';
%-----

%-----
%--Datos del excel---
datosOSC=xlsread(strcat(carpeta,archivo1),'A246:T1246');

La1=datosOSC(:,1);
P1=datosOSC(:,[2,4,6,8,10,12,14,16,18,20]);
p=10*log(P1);
%-----

% -----
%-- Para manejar los colores--
newColorOrder=[0 0 102;
               102 0 0;
               102 51 0;
               102 102 0;
               51 102 0;
               0 102 102;
               32 32 32;
               102 0 51;
               102 0 102;
               51 0 102;
               0 51 102;
               153 51 255;
               255 51 153];

newColorOrder=newColorOrder/255;
% colororder(newColorOrder);
figure;
ax=gca;
ax.ColorOrder=newColorOrder;
% -----

% -----
plot(La1,p(:,6:10),'LineWidth',1);
hold on
grid on
figure(1)

legend ('motor a 3.8v','motor a 4v','motor a 4.2v','motor a 4.4v','motor a 4.6v','motor a 4.8v','motor a 5v','motor a 5.2v','motor a 5.4v','motor a 6v')

xlabel('Longitud de onda (nm)')
ylabel('Potencia (dBm)')
xlim([min(La1) max(La1)])
% -----
```