



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

USO DE LA TÉCNICA DE SUPERPOSICIÓN ESPECTRAL DE REJILLAS
BRAGG EN FIBRA ÓPTICA PARA MEDIR PARÁMETROS DE MOVIMIENTOS
OSCILATORIOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
M. I. ABRAHAM PÉREZ ALONZO

TUTOR PRINCIPAL
DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO, ICAT-UNAM

COMITÉ TUTOR
DR. AUGUSTO GARCÍA VALENZUELA, ICAT-UNAM
DR. DANIEL ENRIQUE CEBALLOS HERRERA, II-UNAM

CUIDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., ENERO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: DR. ALVAREZ ICAZA LONGORIA LUIS A.
Secretario: DR. CEBALLOS HERRERA DANIEL ENRIQUE
1er. Vocal: DR. SANDOVAL ROMERO GABRIEL EDUARDO
2do. Vocal: DR. GARCIA VALENZUELA AUGUSTO
3er. Vocal DR. QURESHI NASER

Lugar donde se realizó la tesis: LABORATORIO DE SENSORES EN FIBRA ÓPTICA, INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:
DR. SANDOVAL ROMERO GABRIEL EDUARDO

FIRMA

Agradecimientos

A los coordinadores del programa de posgrado de Maestría y Doctorado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad que me brindaron de continuar con mi preparación académica y profesional.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología, por el apoyo económico brindado para dedicarme de tiempo completo al doctorado.

A la DGAPA-UNAM, por el apoyo brindado a través del financiamiento del proyecto PAPIIT IT101019 y PAPIIT IT104123.

A mi director de tesis, el Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero por su orientación y apoyo continuo en la elaboración de este trabajo, así como también por su amistad.

A los sinodales, por su tiempo y dedicación para revisar este trabajo y por sus valiosas aportaciones para culminarlo de la mejor manera.

Doy gracias a Dios por su ayuda incondicional, a mis padres por su confianza en mí, y a mi esposa por su apoyo emocional, paciencia y respaldo durante todo el tiempo del doctorado.

Resumen

Los acelerómetros son muy utilizados para medir la respuesta de las estructuras a los movimientos del suelo, principalmente en el campo denominado “Monitoreo de la Salud Estructural” (Structural Health Monitoring, SHM - por sus siglas en inglés), ya que el desplazamiento del terreno puede ocasionar daños a una estructura. En general, el movimiento de un elemento físico tiene parámetros de desplazamiento, velocidad y aceleración. En este trabajo de tesis se presenta el diseño y análisis de las características de un acelerómetro triaxial basado en rejillas de Bragg en fibra óptica y su implementación. Las rejillas de Bragg en fibra óptica se caracterizan por una alta sensibilidad a la deformación, misma que se puede traducir proporcionalmente a la aceleración del objeto al que está unido, así como una alta inmunidad a las interferencias electromagnéticas. Esta investigación se basó en el diseño anterior de un acelerómetro biaxial en el que se utiliza un esquema óptico modificado de demodulación de la longitud de Bragg de las rejillas. La principal aportación de este trabajo consiste en la implementación de un esquema óptico triaxial utilizando un menor número de rejillas que lo diferencia de las investigaciones publicadas anteriormente. Este sensor cumple con las características de sensibilidad ($0.31 \text{ V}/(\text{m}/\text{s}^2)$ para el eje X y $0.42 \text{ V}/(\text{m}/\text{s}^2)$ para el eje Y), rango de frecuencia de trabajo (0.5 – 20 Hz) y frecuencia natural del propio sistema (74 Hz para los ejes X e Y, y 102 Hz para el eje Z) para su aplicación en la medición de movimientos de baja intensidad y de bajas frecuencias, principalmente para medir la respuesta de un edificio o estructura civil al movimiento del suelo durante eventos sísmicos. El dispositivo diseñado encuentra su aplicación en lugares con alta actividad sísmica como la Ciudad de México, contribuyendo al desarrollo e implementación de tecnología propia en beneficio de la seguridad de los habitantes.

Abstract

Accelerometers are widely used to measure the response of structures to ground motions, mainly in the field of Structural Health Monitoring (SHM) since ground displacement can cause damage to a structure. In general, the motion of a physical element has parameters of displacement, velocity, and acceleration. In this thesis work, the design and analysis of the characteristics of a triaxial accelerometer based on fiber Bragg gratings and its implementation are presented. Fiber Bragg gratings are characterized by a high sensitivity to deformation, which can be translated proportionally to the acceleration of the object to which it is attached, as well as a high immunity to electromagnetic interference. This research was based on the previous design of a biaxial accelerometer where a modified optical scheme of demodulation of the Bragg length of the gratings is used. The main contribution of this work consists in the implementation of a triaxial optical scheme using a smaller number of gratings which makes it different from previous published research. This sensor meets the characteristics of sensitivity ($0.31 \text{ V}/(\text{m}/\text{s}^2)$ for the X axis and $0.42 \text{ V}/(\text{m}/\text{s}^2)$ for the Y axis), working frequency range (0.5 - 20 Hz) and natural frequency of the system itself (74 Hz for the X and Y axes, and 102 Hz for the Z axis) for its application in the measurement of low intensity and low frequency movements, mainly to measure the response of a building or civil structure to ground motion during seismic events. The designed device finds its application in places with high seismic activity such as Mexico City, contributing to the development and implementation of proprietary technology for the benefit of the safety of the inhabitants.

Contenido

Índice de figuras	XV
Símbolos y abreviaturas	XIX
1. Introducción.....	23
1.1. Planteamiento del problema	23
1.2. Justificación.....	24
1.3. Hipótesis.....	25
1.4. Objetivos	25
2. Fundamentos y antecedentes	27
2.1. Dispositivo acelerómetro.....	27
2.1.1. Rango de trabajo en amplitud.....	28
2.1.2. Rango de trabajo en frecuencia	29
2.1.3. Acelerómetro capacitivo.....	29
2.1.4. Acelerómetro óptico basado en rejillas de Bragg.....	30
2.1.5. Aplicaciones	31
2.2. Rejillas de Bragg en fibra óptica.....	31
2.2.1. Fabricación	31
2.2.2. Funcionamiento	33
2.2.3. Reflectividad y ancho de banda.....	34
2.3. Superposición de rejillas de Bragg en fibra óptica.....	36
2.4. Fuente de luz y fotodetector	38
3. Descripción y desarrollo del dispositivo de sensado - Acelerómetro.....	41
3.1. Mesa de vibración	41
3.1.1. Aceleración y desplazamiento a diferentes frecuencias	42
3.1.2. Diseño de la mesa de vibración	43

3.2.	Acelerómetro de referencia	44
3.3.	Modelado de los acelerómetros ópticos desarrollados	45
3.3.1.	Acelerómetro biaxial	45
3.3.2.	Acelerómetro triaxial.....	47
3.4.	Parámetros que afectan la sensibilidad del acelerómetro óptico.....	48
3.5.	Esquema óptico para la demodulación de la longitud Bragg de las rejillas..	48
3.5.1.	Acelerómetro biaxial	48
3.5.2.	Acelerómetro triaxial.....	49
3.6.	Caracterización de los principales elementos in situ.....	50
3.6.1.	Rejillas de Bragg	50
3.6.1.1.	Espectros de transmisión y reflexión y ancho de banda.....	50
3.6.1.2.	Sensibilidad a la fuerza y a la deformación.....	51
3.6.2.	Potencia de la luz en el fotodetector en función de la diferencia de longitudes de Bragg ($\lambda_{B_SENS}-\lambda_{B_REF}$).....	53
3.6.3.	Calibración del sensor de temperatura	56
3.6.4.	Módulo de Young de barra de Nylon.....	56
3.7.	Etapa electrónica	58
3.7.1.	Convertidor analógico digital.....	58
3.7.2.	Raspberry Pi	59
3.8.	Desarrollo de los programas.....	61
4.	Resultados.....	65
4.1.	Acelerómetro biaxial.....	65
4.1.1.	Estructura.....	65
4.1.2.	Simulación.....	66
4.1.3.	Sensibilidad a la aceleración	67
4.1.4.	Linealidad del acelerómetro	69
4.1.5.	Sensibilidad a la temperatura.....	70
4.1.6.	Frecuencia de resonancia.....	71
4.1.7.	Ruido eléctrico y mínimo detectable.....	72
4.2.	Acelerómetro triaxial.....	73
4.2.1.	Simulaciones (Modelo I y Modelo II)	73
4.2.2.	Estructura.....	77
4.2.3.	Sensibilidad a la aceleración	79

4.2.4. Sensibilidad a la temperatura.....	79
4.2.5. Ruido eléctrico y mínimo detectable.....	81
4.2.6. Registro de movimiento sísmico	82
Conclusiones	85
Referencias.....	89
Anexo 1. Electrónica	95
A.1.1. Tarjeta del arreglo de acelerómetros capacitivos	95
A.1.2. Tarjeta de acondicionamiento.....	96
A.1.3. Tarjeta de los ADC	96
A.1.4. Configuración de la Raspberry Pi.....	97
Anexo 2. Códigos de programas en Matlab y Python.....	99
A.2.1. Simulación del voltaje de salida del acelerómetro	99
A.2.2. Programa para almacenar los datos de los acelerómetros.	100
A.2.3. Programa para graficar en tiempo real	101
A.2.4. Programa para graficar datos históricos	104
Anexo 3. Lista de equipos y materiales.....	107
Anexo 4. Trabajos publicados de la investigación desarrollada.....	109

Índice de figuras

Fig. 2-1 Esquema de un acelerómetro uniaxial.	28
Fig. 2-2 Principio de operación del acelerómetro capacitivo MMA1260D. (a) Modelo físico, (b) circuito equivalente.	30
Fig. 2-3 Esquema mecánico de la fibra óptica que contiene a la rejilla de Bragg, d es el diámetro de la fibra óptica.....	31
Fig. 2-4 Principales técnicas de fabricación de rejillas de Bragg en fibra óptica: (a) método holográfico (b) máscara de fase [30].	32
Fig. 2-5 Espectros de transmisión y de reflexión de una rejilla de Bragg. Λ es el periodo espacial de la rejilla, Δn es la profundidad de modulación del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, n_0 es el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, w_1 indica el punto de inicio de la rejilla y w_2 es el final de la rejilla.....	34
Fig. 2-6 Espectros de reflexión de una FBG de periodo uniforme: (a) Longitud L variable con $\nu=1$ y $\delta n_{\text{eff}}=2 \times 10^{-4}$, (b) modulación del índice de refracción δn_{eff} variable con $L=10$ mm y $\nu=1$ [33]......	35
Fig. 2-7 Espectro de reflexión de una rejilla: (a) Débil, con visibilidad de franjas ν variable cuando $L=10$ mm y $\delta n_{\text{eff}}=2 \times 10^{-5}$, (b) fuerte, con ν variable cuando $L=10$ mm y $\delta n_{\text{eff}}=2 \times 10^{-4}$ [33]......	36
Fig. 2-8 Esquema óptico de demodulación de la longitud de Bragg de la FBG_{SEN} . SFS: Fuente de luz superluminiscente en fibra óptica (SFS, por sus siglas en inglés). DAQ: Sistema de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés).	37
Fig. 2-9 Configuraciones de la estructura de un LED: (a) Emisor de superficie, (b) emisor de borde.....	38
Fig. 3-1 Relación entre la frecuencia de un movimiento descrito por una función senoidal y el desplazamiento correspondiente del objeto o mesa de vibración.	42
Fig. 3-2 Conjunto de poleas que permiten de movimiento de la mesa en un rango desde 0.1 Hz hasta 50 Hz.	43
Fig. 3-3 Mesa de vibración en un eje con un desplazamiento máximo de 21 cm y un rango de frecuencias de movimiento de 0.1 – 50 Hz. Las dimensiones de la mesa son 29×32 cm.....	44
Fig. 3-4 Arreglo de tres acelerómetros uniaxiales capacitivos para la calibración de los acelerómetros en desarrollo. (a) Placa electrónica, (b) caja de protección de los acelerómetros.	45

Fig. 3-5 Estructura del acelerómetro biaxial.....	45
Fig. 3-6 (a) Esquema de la estructura de un eje del acelerómetro óptico, (b) modelo equivalente. k_f es la rigidez de la fibra óptica, k_s es la rigidez de la barra de nylon a la flexión, b representa el coeficiente de amortiguamiento del sistema y a es la aceleración en la dirección mostrada por las flechas.	46
Fig. 3-7 Esquema y diagrama equivalente de un eje del sensor triaxial. (a) Esquema, (b) diagrama correspondiente que representa a la fibra óptica como un resorte, (c) reducción del diagrama, (d) rigidez equivalente de la fibra óptica.....	47
Fig. 3-8 Esquema propuesto para medir los cambios de la longitud Bragg de las rejillas de sensado en el acelerómetro biaxial.....	49
Fig. 3-9 Esquema propuesto para medir los cambios de la longitud Bragg de las rejillas de sensado en el acelerómetro triaxial.	49
Fig. 3-10 Espectros de transmisión y de reflexión experimentales de las rejillas utilizadas en los sensores: (a) Espectros de transmisión, (b) espectros de reflexión.....	51
Fig. 3-11 Esquema experimental para determinar la sensibilidad de la FBG a la deformación.	51
Fig. 3-12 Sensibilidad de la FBG a la deformación S_d : (a) Rejilla pegada por su recubrimiento $S_d = 0.56 \text{ pm}/\mu\epsilon$, (b) Rejilla pegada por su revestimiento $S_d = 1.23 \text{ pm}/\mu\epsilon$	52
Fig. 3-13 Montaje para determinar la sensibilidad de la FBG a la fuerza S_{If} . Una pinza sujeta a la fibra óptica en la parte superior mientras que en la parte inferior se agregan arandelas de metal.	52
Fig. 3-14 Sensibilidad experimental de la FBG a la fuerza. $S_{If}=1.372 \text{ nm}/\text{N}$	53
Fig. 3-15 Espectros ópticos de dos rejillas de Bragg en la técnica de superposición espectral. Las figuras del lado izquierdo corresponden a resultados simulados y las del lado derecho son resultados experimentales.	54
Fig. 3-16 Potencia P_D recibida por los fotodetectores de los ejes X e Y en función del desplazamiento de la longitud Bragg de la rejilla de referencia.	55
Fig. 3-17 Comparación de las mediciones temperatura entre los sensores DHT22 y RHT10. La diferencia máxima de las lecturas es de $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$	56
Fig. 3-18 Experimento para determinar el módulo de Young de la barra de nylon a partir de su rigidez a la flexión: (a) Configuración experimental, (b) resultado con rigidez igual a $(776.5\pm 16.5) \text{ N}/\text{m}$	57
Fig. 3-19 Dispositivos utilizados en el sistema de adquisición de datos: (a) Convertidor analógico-digital, (b) Raspberry Pi 3 B+.	59
Fig. 3-20 Esquema del sistema de adquisición de datos para el acelerómetro óptico triaxial, el acelerómetro de referencia y dos sensores de temperatura. RTC: Reloj en tiempo real (Real-time clock, RTC, por sus siglas en inglés) modelo DS3231. GPIO: Pines de propósito general de entrada-salida (General purpose Input/Output, GPIO, por sus siglas en inglés).	60
Fig. 3-21 Configuración experimental del acelerómetro óptico triaxial incluyendo la fuente de luz SFS, el acelerómetro óptico, el circuito óptico/electrónico, los ADCs modelo ADS1115 y la Raspberry Pi.	61

Fig. 3-22 Diagramas de flujo de: (a) Programa para almacenar datos, (b) programa para visualizar los datos en tiempo real y (c) programa para visualizar el histórico de los datos.	62
Fig. 3-23 Captura de pantalla de las gráficas generadas en tiempo real correspondiente de los ejes X, Y y Z (de arriba hacia abajo) del acelerómetro óptico.....	63
Fig. 3-24 Captura de las gráficas generadas para datos históricos del acelerómetro óptico...	64
Fig. 4-1 Implementación del acelerómetro biaxial con una barra flexible cilíndrica de nylon sobre la que se sostiene su masa inercial (esquema mostrado en la Fig. 3-5).....	66
Fig. 4-2 Forma del primer modo de resonancia del acelerómetro, los desplazamientos se muestran normalizados, (a) eje X, (b) eje Y.	67
Fig. 4-3 Sensibilidad del prototipo de sensor óptico como función de la frecuencia. En los insertos se muestra una amplificación de la sensibilidad en el rango de interés, de 0.5 – 20 Hz.	68
Fig. 4-4 Amplitud de salida en tiempo y en frecuencia del acelerómetro óptico y del acelerómetro capacitivo para una aceleración pico de entrada de 0.25 m/s ² a 1.6 Hz: (a) Eje X, (b) eje Y.	69
Fig. 4-5 Amplitud de salida del sensor contra aceleración aplicada para señales de excitación a 2 Hz, 5 Hz y 10 Hz. (a) Eje X, (b) eje Y.....	70
Fig. 4-6 Respuesta al impulso para determinar experimentalmente la frecuencia de resonancia del sensor en el eje X. (a) Dominio del tiempo, (b) Espectro en frecuencia.	71
Fig. 4-7 Respuesta al impulso para determinar experimentalmente la frecuencia de resonancia del sensor en el eje Y. (a) Dominio del tiempo, (b) Espectro en frecuencia.	72
Fig. 4-8 Ruido en el dominio del tiempo del acelerómetro biaxial (inserto) y la densidad espectral de ruido equivalente: (a) eje X, (b) eje Y.	73
Fig. 4-9 Simulación del sistema masa-resorte de un acelerómetro en tres ejes para dos diferentes formas de masa inercial. (a) Esfera soportada con cuatro fibras, (b) cubo soportado por cuatro fibras, (c) esfera soportada por seis fibras (simulaciones realizadas en ANSYS versión de estudiante el 24 de agosto 2023).....	74
Fig. 4-10 Forma de los primeros seis modos del prototipo triaxial con seis soportes ortogonales en cada eje. (a), (b) y (c) Modos rotacionales, (d), (e) y (f) modos traslacionales (simulaciones realizadas en ANSYS versión de estudiante el 25 de julio 2023).	75
Fig. 4-11 Simulación de: (a) Marco del acelerómetro triaxial y (b) pinza que sujeta a la fibra óptica de la rejilla de referencia (simulaciones realizadas en ANSYS versión de estudiante el 24 de agosto 2023).	77
Fig. 4-12 Simulación de la caja que protege al acelerómetro triaxial (simulaciones realizadas en ANSYS versión de estudiante el 24 de agosto 2023).....	77
Fig. 4-13 Esquema de la estructura del acelerómetro triaxial. Se utiliza una sola rejilla de medición en cada eje.	78
Fig. 4-14 Fotografía del acelerómetro triaxial.	79

Fig. 4-15 Señales de ejemplo a 1 Hz inducidas al acelerómetro por una mesa de vibración para calcular la sensibilidad de cada eje. Los datos de salida del acelerómetro óptico se comparan con los del arreglo de acelerómetros capacitivos.....	80
Fig. 4-16 Variación de la señal de salida del acelerómetro óptico con respecto a la variación de la temperatura. Se puede ver que la salida del acelerómetro está correlacionada con la temperatura de forma inversa.....	81
Fig. 4-17 Ruido base presente en las lecturas del acelerómetro triaxial.....	81
Fig. 4-18 Registro de un sismo débil de magnitud 3.0 ocurrido en la Ciudad de México el 10 de mayo del 2023 a las 22:20 horas.	82
Fig. 4-19 Registros sísmicos del evento del día 10 de mayo de 2023, M 3.0 en diferentes estaciones MHVM, BJVM y ENP8 [62].....	83

Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Dimensión	Descripción
A	m^2	Área de las placas de los capacitores
A_f	m^2	Área de la sección transversal de la fibra óptica con recubrimiento de acrilato
A_m	m	Amplitud del desplazamiento de la mesa de vibración
ADC	-	Convertidor analógico digital (Analog-to-Digital Converter, ADC, por sus siglas en inglés)
a	m/s^2	Aceleración
b	-	Coefficiente de amortiguamiento
C	F	Capacitancia
C_1	-	Circulador del eje X
C_2	-	Circulador del eje Y
C_3	-	Circulador del eje Z
D	m	Distancia entre las placas del capacitor
DAQ	-	Sistema de Adquisición de Datos (Data Acquisition System, DAQ, por sus siglas en inglés)
d	m	Diámetro de la fibra óptica con recubrimiento de acrilato
d_b	m	Diámetro de la barra de nylon
E_{Al}	Pa	Módulo de Young del aluminio
E_f	Pa	Módulo de Young de la fibra óptica
E_{Pb}	Pa	Módulo de Young del Plomo
E_s	Pa	Módulo de Young de la barra de nylon
F	N	Fuerza ejercida por la masa inercial en el resorte
FBG	-	Rejilla de Bragg en fibra óptica (Fiber Bragg Grating, FBG, por sus siglas en inglés)
FBG_{REF}	-	FBG de referencia
FBG_{SEN}	-	FBG de sensado
FBG_{SEN_X}	-	FBG de sensado del eje X
FBG_{SEN_Y}	-	FBG de sensado del eje Y
FBG_{SEN_Z}	-	FBG de sensado del eje Z
$F_s(\lambda)$	W	Espectro de emisión de la fuente de luz
f	Hz	Frecuencia
f_0	Hz	Frecuencia natural del acelerómetro

f_d	Hz	Frecuencia amortiguada del sistema masa-resorte
<i>GPIO</i>	-	Pines de propósito general de entrada/salida de la Raspberry Pi (General Purpose Input/Output, GPIO, por sus siglas en inglés)
<i>HDMI</i>	-	Interfaz multimedia de alta definición (High-Definition Multimedia Interface, HDMI, por sus siglas en inglés)
I	m^4	Segundo momento de inercia de una barra circular
I_F	-	Distribución espectral reflejada por la rejilla de sensado en el esquema de interrogación mediante rejillas superpuestas
I_s	m^4	Segundo momento de inercia
<i>I2C</i>	-	Protocolo de comunicación de circuito inter-integrado (Inter-Integrated Circuit Protocol, I2C, por sus siglas en inglés)
k	N/m	Constante del resorte, en general
k_f	N/m	Rigidez de la fibra óptica
k_s	N/m	Rigidez a la flexión de la barra de nylon en el acelerómetro biaxial
k_v	N/m	Rigidez a la flexión de la barra de nylon en el experimento para determinar su módulo de Young
L	m	Longitud de la rejilla de Bragg
L_b	m	Longitud de la barra de nylon en el experimento para determinar su módulo de Young
L_f	m	Distancia entre los puntos de fijación de la fibra óptica, acelerómetro biaxial
L_s	m	Longitud de la barra flexible de nylon en el acelerómetro biaxial
L_t	m	Longitud de la fibra óptica desde la masa inercial al marco del sensor
L_x	m	Distancia entre los puntos de fijación de la fibra del eje X, acelerómetro biaxial
L_y	m	Distancia entre los puntos de fijación de la fibra del eje Y, acelerómetro biaxial
l_{pb}	m	Lado de la masa inercial cúbica
<i>MEMS</i>	-	Sistemas Microelectromecánicos (Microelectromechanical Systems, MEMS, por sus siglas en inglés)
m	Kg	Masa inercial del acelerómetro
n_0	u.a	Índice de refracción del núcleo de la fibra óptica
n_{eff}	u.a	Índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica
n_{uv}	u.a	Índice de refracción efectivo de la sílice para la luz UV
P_0	W	Potencia total de la fuente de luz
P_D	W	Potencia total que llega al fotodetector, proveniente de la superposición de las FBGs
PD_1	-	Fotodetector del eje X
PD_2	-	Fotodetector del eje Y
PD_3	-	Fotodetector del eje Z
<i>PGA</i>	-	Amplificador de ganancia programable (Programmable-Gain Amplifier, PGA, por sus siglas en inglés)
R^2	u.a	Coefficiente de correlación
R_0	u.a	Pico de reflectividad

$R(\lambda)$	u.a	Espectro de reflexión de la FBG de sensado
R_{\max}	u.a	Pico de reflexión de una rejilla de Bragg
RTC	-	Reloj en tiempo real (Real-Time Clock, RTC, por sus siglas en inglés)
S	s^{-2}	Sensibilidad del acelerómetro, de forma general
S_d	m	Sensibilidad de la FBG a la deformación
S_{la}	$m/(m/s^2)$	Sensibilidad del acelerómetro óptico a la aceleración
S_{lf}	m/N	Sensibilidad de la FBG a la fuerza
SBC	-	Computadora de placa simple (Single-Board Computer, SBC, por sus siglas en inglés)
SFS	-	Fuente superluminiscente en fibra óptica (Superluminescent Fiber Source, SFS, por sus siglas en inglés)
SNR	u. a.	Relación señal a ruido (Signal-to-Noise Ratio, SNR, por sus siglas en inglés)
SPS	-	Muestras por segundo (Samples per Second, SPS, por sus siglas en inglés)
$T(\lambda)$	-	Espectro de transmisión de la FBG de referencia
v	u.a	Visibilidad de franjas del cambio de índice de refracción
v_m	m/s	Velocidad de la mesa de vibración
w	m	Eje de la fibra óptica
x	m	Desplazamiento de la mesa de vibración
Z_1	m	Movimiento de entrada en el eje vertical del acelerómetro
Z_2	m	Movimiento de respuesta de la masa inercial del acelerómetro
z	m	Desplazamiento relativo de la masa inercial con respecto a la carcasa del acelerómetro
α	$^{\circ}C^{-1}$	Coefficiente de expansión térmica de una fibra óptica de sílice
Δn	u.a	Profundidad de modulación del índice de refracción
ΔT	$^{\circ}C$	Cambio de temperatura en la rejilla de Bragg
$\Delta \lambda_0$	m	Ancho de banda de la fuente de luz
$\Delta \lambda_B$	m	Variación de la longitud Bragg de la FBG
δn_{eff}	u.a	Variación inducida del cambio del índice de refracción efectivo
$\delta \lambda_B$	m	Ancho de banda de la FBG
ε	u. a.	Deformación
ε_d	u. a	Constante dieléctrica
ε_{FBG}	u. a.	Deformación en la rejilla de Bragg
ζ	u. a	Taza de amortiguamiento del sistema masa-resorte
η	$^{\circ}C^{-1}$	Coefficiente termoóptico de la rejilla de Bragg
θ	rad	Ángulo mutuo entre los haces en el método holográfico
θ_m	rad	Ángulo de difracción del primer modo en el método de máscara de fase
κ	u. a	Coefficiente de acoplamiento en la FBG
Λ	m	Periodo espacial de la rejilla de Bragg
Λ_{pm}	m	Periodo espacial de la máscara de fase
λ	m	Longitud de onda en el vacío
λ_0	m	Longitud de onda central de la fuente de luz
λ_B	m	Longitud de Bragg de la FBG

λ_{\max}	m	Longitud de onda al pico de reflexión de la FBG
λ_{uv}	m	Longitud de onda de la luz láser UV
μ	u. a	Razón de Poisson de la barra flexible en el acelerómetro biaxial
μ_f	u. a	Razón de Poisson de la fibra óptica
μ_{Pb}	u. a	Razón de Poisson de la masa inercial
ρ_e	u. a.	Constante foto-elástica para una fibra óptica de sílice
ρ_f	kg/m ³	Densidad de la fibra óptica
ρ_{Pb}	kg/m ³	Densidad del plomo
ϕ	m	Variación del periodo de la rejilla
φ	rad	Fase de la posición de la masa de prueba al momento del inicio del movimiento
ω	rad/s	Frecuencia angular del desplazamiento
ω_0	rad/s	Frecuencia angular natural del acelerómetro

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Los movimientos oscilatorios son caracterizados, entre otros parámetros, por su frecuencia, desplazamiento, velocidad y aceleración. La aceleración es un parámetro muy utilizado para estimar la respuesta de una estructura ante un determinado movimiento ya que constituye una medida de la fuerza de inercia que ofrece la estructura al movimiento y en consecuencia de su capacidad de daño [1-2]. El acelerómetro es el dispositivo que permite medir la aceleración del movimiento del objeto al que va unido.

Las aplicaciones de los acelerómetros son diversas, pero los que tienen mayor sensibilidad son utilizados para la medición de vibraciones sísmicas de baja escala (en frecuencia y amplitud) en disciplinas científicas y técnicas tales como la sismología y el control de vibración estructural [3-4]. La importancia de estos dispositivos en estas disciplinas radica en ser parte de un sistema de alerta temprana diseñada para proteger la vida humana y ayudar en la conservación de las estructuras [5]. Como ejemplo, la Ciudad de México es un lugar sísmico en la que se necesita incrementar el número de sensores instalados en tres dimensiones para entender de forma completa la influencia de los eventos sísmicos en las estructuras. Otra motivación para llevar a cabo esta investigación es la fabricación de estos dispositivos de manera local y así iniciar con la independencia tecnológica.

Los tipos más comunes de acelerómetros son los ópticos, capacitivos, piezoeléctricos, piezoresistivos y los térmicos. Dentro de éstos, los acelerómetros basados en fibras ópticas se caracterizan por un amplio rango dinámico, alta sensibilidad, capacidad de multiplexado e inmunidad a la interferencia electromagnética [6]. Esta última es una ventaja importante porque permite la recolección de datos aún en ambientes con ruido eléctrico. Los sensores ópticos basados en rejillas de Bragg en fibra óptica (Fiber Bragg Grating, FBG, por sus siglas en inglés) son dispositivos que tienen una alta sensibilidad porque las FBGs pueden monitorear deformaciones con muy alta resolución [7], por esto, existen múltiples configuraciones de acelerómetros basados en ellas y actualmente diversos grupos de investigación están trabajando en la optimización de sus características tales como la sensibilidad [8] o el rango de frecuencias de los movimientos o vibraciones que el dispositivo puede medir [9].

Ejemplos de configuraciones de acelerómetros basados en FBGs se muestran en [10] donde se presenta un acelerómetro uniaxial para medir vibración y temperatura simultáneamente en un rango de 0.5 – 10 Hz y usa filtros electrónicos y fotodetectores para demodular la longitud de Bragg de la rejilla, en [11] se muestra un sensor de vibración en dos dimensiones con sensibilidad ajustable para hacerla igual en ambos ejes en un rango de medición de 0 – 180 Hz, sin embargo, no se reportaron mediciones por debajo de 20 Hz y además se necesita de un instrumento llamado interrogador de rejillas de Bragg. En [12] se muestra un acelerómetro biaxial que usa solo dos rejillas de Bragg dispuestas en un eje y que utiliza las fuerzas axiales y transversales, tiene una frecuencia de resonancia de 34.42 Hz y necesita de un interrogador para demodular el cambio de la longitud de Bragg, por último, en [13] se presenta un sensor de vibración biaxial basado en una especie de bisagra multi-ejes, con un rango de medición de 5 – 170 Hz y la misma sensibilidad en ambos ejes. Sin embargo, para la aplicación que se le pretende dar a nuestro dispositivo, este rango de frecuencias no es lo suficientemente bajo y además requiere el uso de un interrogador.

De las distintas configuraciones de acelerómetros basados en rejillas de Bragg, incluyendo las mostradas anteriormente, la mayoría de ellos son uniaxiales [14-16], unos cuantos biaxiales [17-19], y pocos triaxiales [20-21]. La medición de vibración en tres ejes se logra por medio de tres acelerómetros uniaxiales en disposición ortogonal o con un solo acelerómetro triaxial, la ventaja de un sensor triaxial con respecto a los uniaxiales es que es posible optimizar los materiales necesarios para su elaboración, tal como el número de FBGs. Por eso la necesidad de diseñar e implementar un dispositivo que mida en tres direcciones.

El dispositivo que se presenta en este trabajo es un acelerómetro basado en fibra óptica que usa la técnica de superposición espectral de rejillas de Bragg en fibra óptica para demodular los cambios en la longitud Bragg de las rejillas, se utiliza una menor cantidad de FBGs, no necesita de un equipo interrogador, y este esquema óptico también permite compensación por cambios de temperatura.

1.2. Justificación

Existen diferentes configuraciones de acelerómetros uniaxiales y multiaxiales en fibra óptica que utilizan rejillas de Bragg, pero la mayoría de éstos utilizan un equipo interrogador muy complejo que los convierte en un sistema de sensores de alto costo. Aquí se utiliza un método para sustituir el uso del equipo interrogador, este método consiste en utilizar una segunda rejilla de Bragg en fibra óptica para convertir el cambio de la longitud Bragg de las FBGs de sensado a variaciones en potencia y medir estos cambios con fotodetectores; este método se puede mejorar para aplicarlos en acelerómetros multiaxiales y reducir el número de FBGs utilizadas. Se busca medir amplitudes de aceleración en un rango de $\pm 5 \text{ m/s}^2$ y frecuencias entre 0.5 – 20 Hz para la aplicación sísmica. Con la implementación de este acelerómetro óptico triaxial, se caracteriza de forma completa el movimiento en el espacio, además de que se innova en el ahorro de los componentes necesarios para su fabricación comparado con el uso de tres acelerómetros individuales de un eje. Por otro lado, pensando en el desarrollo del país, se puede tener una fabricación local de estos dispositivos y contribuir con la independencia tecnológica.

1.3. Hipótesis

Implementar un acelerómetro triaxial, utilizando una FBG para cada eje del acelerómetro, reduciendo en dos elementos el sistema, cuando se usa el método de interrogación por rejillas de Bragg superpuestas.

1.4. Objetivos

El propósito de esta tesis es utilizar la técnica de superposición espectral de rejillas Bragg en fibra óptica para medir la aceleración de movimientos oscilatorios en edificios y grandes estructuras mediante un acelerómetro. Partiendo de la implementación de un acelerómetro biaxial desarrollado en un trabajo previo [22], se implementa otro acelerómetro biaxial con nuevas rejillas de Bragg y se estudian sus características para tener un mejor conocimiento de su funcionamiento, de forma paralela se realiza su simulación. Posteriormente se realiza el diseño, simulación e implementación de un acelerómetro triaxial utilizando el mismo principio de funcionamiento.

Los objetivos específicos de esta investigación son:

- Analizar las características y realizar la simulación del acelerómetro biaxial previamente desarrollado y optimizarlo.
- Elaboración de una mesa de vibración en una dimensión para caracterizar el acelerómetro.
- Diseño, simulación y optimización de un acelerómetro triaxial basado en rejillas de Bragg en fibra óptica con el mismo principio de demodulación que en el caso del sensor biaxial.
- Implementación del sensor óptico triaxial.
- Estudiar las características de funcionamiento del sensor óptico triaxial y calibrarlo en una mesa de vibración.

2. Fundamentos y antecedentes

En este capítulo se describen las ecuaciones que modelan el funcionamiento de un acelerómetro en general, y de un acelerómetro óptico basado en rejillas de Bragg, también se muestra el diagrama básico de un sensor capacitivo construido con tecnología MEMS (Microelectromechanical Systems, MEMS, por sus siglas en inglés) que se utiliza en este trabajo para comparar y proponer una calibración del prototipo de sensor desarrollado, y se enuncian algunas de las muchas aplicaciones de los acelerómetros. También se describe brevemente el principio de funcionamiento de las rejillas de Bragg en fibra óptica y del método de superposición de los espectros ópticos de dos FBGs. Posteriormente se describen las características de la fuente de luz superluminiscente aquí utilizada para la alimentación del acelerómetro y las características principales del fotodetector.

2.1. Dispositivo acelerómetro

Las vibraciones se caracterizan por su desplazamiento, velocidad, aceleración y frecuencia, dependiendo del parámetro que se requiere medir es el dispositivo sensor que se necesita. Para la medición de los efectos de un movimiento en una estructura, la aceleración es el parámetro que proporciona una magnitud del daño que puede ocasionar, por tanto, los acelerómetros son los sensores más utilizados para la medir los efectos de las vibraciones en las estructuras. Un acelerómetro uniaxial se modela como un sistema masa-resorte mediante una ecuación de segundo orden que toma en cuenta todas las fuerzas que actúan en su masa tanto en condiciones estáticas como en condiciones dinámicas [23]:

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + b \frac{dz}{dt} + kz = -ma = -F, \quad (2.1)$$

donde m es la masa inercial o de prueba, z es el desplazamiento relativo de la masa de prueba, b es el coeficiente de amortiguamiento del sistema, k es la rigidez del resorte, a es la aceleración de la estructura en la que se fija el acelerómetro, y F es la fuerza correspondiente en el sistema debido a la aceleración de entrada. En la Fig. 2-1 se muestran las partes principales de un acelerómetro, en este caso en un eje. Para un acelerómetro de dos o tres ejes, las partes principales se mantienen, aunque las ecuaciones de modelado cambian dependiendo de la estructura utilizada.

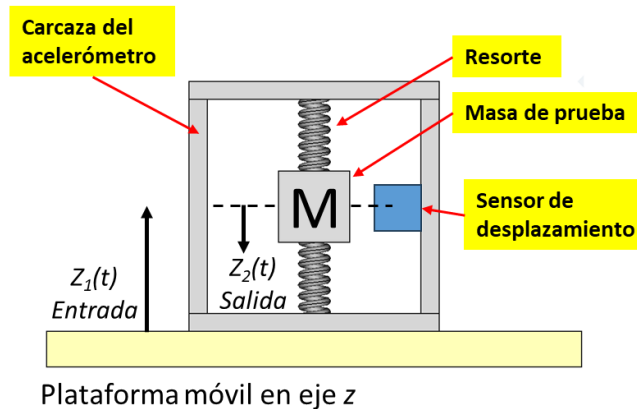


Fig. 2-1 Esquema de un acelerómetro uniaxial.

Cuando la plataforma en la que se sujeta el acelerómetro se desplaza en dirección vertical con $Z_1(t)$, toda la estructura del acelerómetro se desplaza junto con la plataforma, pero la masa inercial se opone al movimiento con una fuerza $F=ma$, el desplazamiento de la masa depende de la constante equivalente del resorte k y siempre hay un elemento que mide el desplazamiento relativo de la masa inercial con respecto a la carcasa. De la Ec. (2.1), se obtiene la aceleración como:

$$a = \frac{F}{m}, \quad (2.2)$$

Además, de acuerdo con la ley de Hooke, la fuerza F es proporcional al desplazamiento de la masa y a la constante del resorte con lo que llegamos a la Ec. (2.3):

$$a = \frac{k(Z_2 - Z_1)}{m} = \frac{kz}{m}, \quad (2.3)$$

con $z = Z_2 - Z_1$.

2.1.1. Rango de trabajo en amplitud

El rango de trabajo de un sensor indica los valores de la magnitud a medir en donde es capaz de trabajar adecuadamente. En el caso de un acelerómetro el rango de trabajo en amplitud es el rango de aceleraciones que es capaz de medir con una respuesta lineal con respecto a la aceleración de entrada.

La sensibilidad estática de un acelerómetro S en unidades de s^{-2} está dada por:

$$S = \frac{m}{k} = \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2}, \quad (2.4)$$

donde ω_0 es la frecuencia angular natural (resonante) en rad/s del acelerómetro y f_0 es su frecuencia natural en Hz. Para incrementar la sensibilidad del acelerómetro hay que aumentar la masa inercial o disminuir la rigidez del resorte, pero ello conlleva una disminución en la frecuencia natural del acelerómetro. Hay un compromiso entre la frecuencia natural del acelerómetro y la sensibilidad. La sensibilidad típicamente se mide a una frecuencia de referencia especificada de una onda con forma senoidal [23].

2 Fundamentos y antecedentes

2.1.2. Rango de trabajo en frecuencia

El rango de trabajo en frecuencia indica el valor de las frecuencias en el que el sensor puede trabajar, por dos motivos: el primero de esos motivos es que, en ese rango de trabajo, la sensibilidad del dispositivo se debe de mantener lo más constante posible, aunque la frecuencia del movimiento que se mida varíe. El segundo aspecto es que el rango de operación del sensor debe estar fuera de la frecuencia de resonancia del sensor. La estructura de un sensor tiene varias frecuencias de resonancia y para cada frecuencia de resonancia tiene una forma específica en que la estructura se deforma, en el diseño de un acelerómetro debemos de asegurarnos de que dicha frecuencia se encuentre por encima o por debajo del rango de trabajo del dispositivo. En el caso específico de un sensor para bajas frecuencias, debemos de asegurarnos de que la frecuencia de resonancia de su estructura esté por lo menos 2.5 veces por encima del valor máximo de la aceleración que se pretende medir [23].

La solución de Ec. (2.1) para $z(t)$ es

$$z(t) = B e^{-\zeta \sqrt{\frac{k}{m}} t} \sin(2\pi f_d t + \varphi) - Sa, \quad (2.5)$$

donde el factor B y la fase φ dependen de la posición de la masa de prueba al momento del inicio de la aceleración, ζ es un parámetro llamado tasa de amortiguamiento, y f_d es la frecuencia amortiguada que es diferente a la frecuencia natural f_0 definida como:

$$f_d = f_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \text{ solo para } \zeta < 1. \quad (2.6)$$

De la solución de las Ecs. (2.5) y (2.6) podemos ver que el desplazamiento $z(t)$ tiene una naturaleza oscilatoria decreciente que depende del factor ζ . También podemos ver que la frecuencia f_d es menor en cuanto mayor sea la tasa de amortiguamiento. El valor ideal es 1 para que el sistema tenga una respuesta críticamente amortiguada y así una respuesta más cercana a la aceleración verdadera de entrada. En muchos acelerómetros se utiliza un amortiguamiento viscoso para mejorar el rango útil en frecuencia al limitar los efectos de la resonancia. Este amortiguamiento es importante en sensores donde la frecuencia de operación es cercana a la frecuencia natural, sin embargo, cuando la frecuencia natural es mucho mayor que el ancho de banda operativo, el amortiguamiento mecánico se puede reemplazar por un filtro paso bajas en el proceso de acondicionamiento de la señal [23].

2.1.3. Acelerómetro capacitivo

El acelerómetro capacitivo es confiable y permite la microminiaturización, alta exactitud y bajo costo, aunque hay que mencionar que son sensibles a la interferencia electromagnética. Este tipo de sensor comúnmente se implementa en tecnología MEMS.

Un ejemplo de acelerómetro capacitivo es el MM1260D de Freescale Semiconductor fabricado con tecnología MEMS, este dispositivo consiste en una célula de sensado capacitiva sellada herméticamente a nivel de oblea [24]. La célula es una estructura mecánica formada a partir de materiales semiconductores (silicio policristalino) mediante un proceso de enmascaramiento y grabado. Se puede modelar como dos placas estacionarias con una placa móvil en medio, Fig. 2-2(a). La placa central puede desviarse de su posición de reposo

cuando el sistema se somete a aceleración. Cuando la placa central se desvía, la distancia entre ella y una de las placas fijas aumenta en la misma medida que disminuye en la otra placa. El cambio en la distancia es una medida de la aceleración. Las placas de la célula de sensado forman dos capacitores. A medida que la placa central se mueve con la aceleración, la distancia entre las placas cambia y el valor del capacitor cambia:

$$C = \frac{A\epsilon_d}{D}, \tag{2.7}$$

donde A es el área de la placa, ϵ_d es la constante dieléctrica y D es la distancia entre las placas.

Posteriormente, se utilizan técnicas de capacitor conmutado y acondicionamiento de la señal para medir los capacitores y extraer la información de la diferencia entre los dos capacitores. El acondicionador de señal proporciona una salida en voltaje proporcional a la aceleración [24].

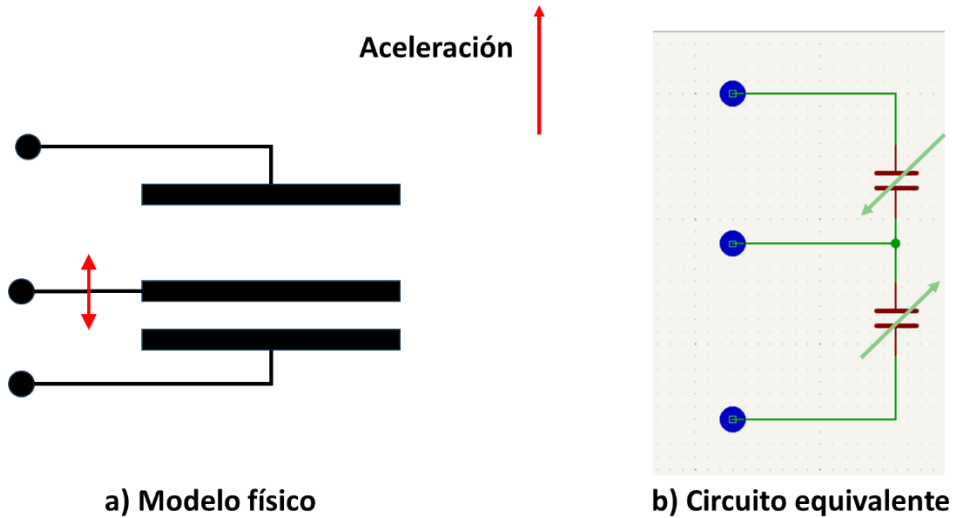


Fig. 2-2 Principio de operación del acelerómetro capacitivo MMA1260D. (a) Modelo físico, (b) circuito equivalente.

2.1.4. Acelerómetro óptico basado en rejillas de Bragg

En un acelerómetro que utiliza rejillas de Bragg, el resorte de la Fig. 2-1 se sustituye por una fibra óptica que sostiene a la masa inercial en un extremo, y en el otro extremo se fija al marco del sensor. La rejilla de Bragg es el elemento que mide el desplazamiento relativo de la masa inercial. En la Fig. 2-3 se muestra el modelo mecánico de una fibra óptica para determinar su rigidez.

La rigidez de la fibra óptica k_f está dada por

$$k_f = \frac{E_f A_f}{L_f}, \tag{2.8}$$

donde E_f es el módulo de Young de la fibra óptica, A_f es la sección transversal de la fibra óptica y L_f es la distancia entre el marco del sensor y la masa inercial.

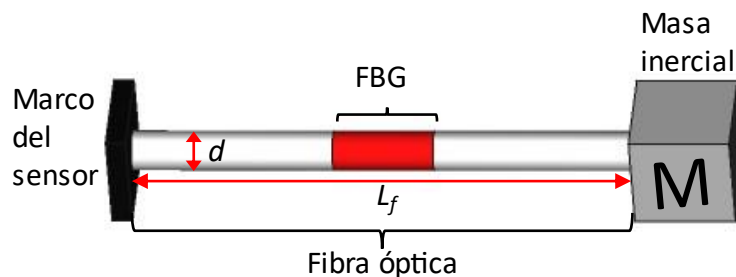


Fig. 2-3 Esquema mecánico de la fibra óptica que contiene a la rejilla de Bragg, d es el diámetro de la fibra óptica.

2.1.5. Aplicaciones

Los acelerómetros son utilizados en una gran variedad de aplicaciones entre las que se encuentran: el sector automotriz en las bolsas de aire donde éste detecta un pico de aceleración generado por una colisión, en dispositivos móviles para la detección de su orientación, en las personas para la evaluación de comportamientos físicos tales como la actividad física y el sedentarismo [25]. El uso de los acelerómetros en aplicaciones relacionadas con la sismología ha crecido exponencialmente, los campos en los que son usados son: 1) la observación de sismos y en estudios sismológicos, 2) estudios e imágenes sísmicas (en la exploración de petróleo y gas), y 3) en el monitoreo de vibraciones en estructuras y evaluación estructural. Los factores de estrés que actúan en las estructuras se pueden deber a factores naturales o antropogénicos tales como eventos sísmicos, agentes atmosféricos (vientos, ciclos térmicos), vibraciones debidas al flujo de tráfico, y cargas aplicadas. Todas ellas contribuyen a disminuir las propiedades de resistencia de las estructuras [5]. Las características de funcionamiento que un acelerómetro debe cumplir dependen de la aplicación para la que se diseña.

2.2. Rejillas de Bragg en fibra óptica

Las rejillas de Bragg en fibra óptica forman parte del grupo de elementos modulados en longitud de onda [26]. Dicho cambio es un efecto directo de la perturbación asociada y es independiente de la intensidad de la fuente de luz, por tanto, las mediciones no se ven afectadas por las variaciones en la fuente de luz.

2.2.1. Fabricación

Las rejillas de Bragg son dispositivos que se crean al inducir variaciones periódicas del índice de refracción del núcleo en una sección de una fibra óptica. Esta variación se crea aprovechando una característica de las fibras ópticas llamada fotosensibilidad que consiste en inducir un cambio permanente del índice de refracción al hacer incidir luz ultravioleta intensa en el núcleo [27-28]. También existen varias técnicas para mejorar la fotosensibilidad en las fibras ópticas tales como: aumentar la concentración de dopaje de Germanio, hidrogenación en frío a alta presión, cambio del índice de refracción inducido por calor, entre otras. El efecto de grabar una rejilla de Bragg se puede ver como un aumento en la intensidad de la luz a una longitud de onda específica que se refleja en cada periodo de la rejilla. Las múltiples reflexiones interfieren constructivamente y al final de la rejilla de Bragg hay una alta

reflexión a una longitud de onda llamada longitud de onda de Bragg con un ancho de banda muy pequeño. Las rejillas de Bragg se fabrican por medio de técnicas que se dividen en dos grupos: holográfico y máscara de fase [7, 29]. La primera técnica consiste en dividir un haz de luz ultravioleta de entrada en dos que interfieren en el núcleo de la fibra, esta técnica también se conoce como interferómetro de volumen, Fig. 2-4(a). Este interferómetro es ideal para la inscripción de rejillas cortas de un solo pulso, tiene varias desventajas tales como el tener extremo cuidado en el diseño del montaje óptico; las vibraciones mecánicas y el camino óptico largo pueden hacer que la interferencia cambie con el tiempo limitando su aplicación a exposiciones cortas. La longitud de Bragg λ_B es independiente de la longitud de onda de la luz UV dada por:

$$\lambda_B = \frac{n_{\text{eff}} \lambda_{\text{UV}}}{n_{\text{UV}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}, \quad (2.9)$$

donde n_{UV} es el índice de refracción de la sílice para la luz UV, λ_{UV} es longitud de onda de la luz UV, n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y θ es el ángulo mutuo de los haces UV.

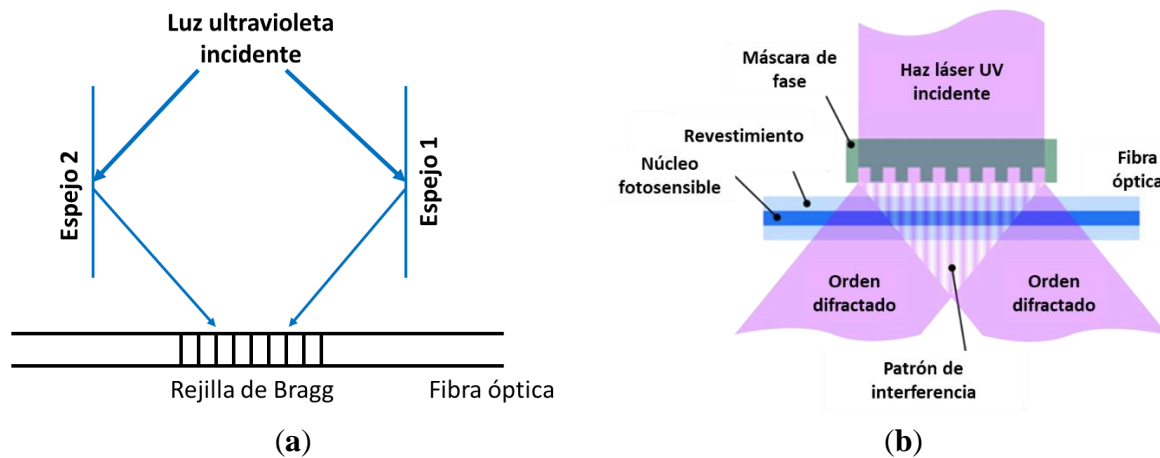


Fig. 2-4 Principales técnicas de fabricación de rejillas de Bragg en fibra óptica: (a) método holográfico (b) máscara de fase [30].

La segunda técnica presenta una mejora con respecto al método holográfico ya que permite grabar las rejillas de forma más fácil, consiste en la exposición de la fibra a través de una máscara espacialmente periódica que difracta la luz incidente en varios órdenes que se superponen e interfieren ópticamente, Fig. 2-4(b). Una máscara de fase es una rejilla de relieve grabada en una placa de sílice [7, 29]. Las partes importantes de la máscara de fase son las ranuras grabadas en la placa de sílice que transmite la luz UV con una relación marca-espacio y profundidad de grabado cuidadosamente controlados. Cuando el haz láser es perpendicular al plano de la fibra óptica la radiación difractada se divide en los modos $m = 0$ y $m = \pm 1$ y el periodo de la rejilla depende el ángulo de difracción y de la longitud de onda de la luz UV:

2 Fundamentos y antecedentes

$$\Lambda = \frac{\lambda_{uv}}{2 \sin(\frac{\theta_m}{2})} = \frac{\Lambda_{pm}}{2}, \quad (2.10)$$

donde θ_m es el ángulo de difracción del primer modo y Λ_{pm} es el periodo de la máscara de fase.

Existen varios tipos de rejillas de Bragg y se clasifican dependiendo del perfil de variación del índice de refracción, posicionadas a lo largo de la fibra óptica. Los principales tipos son:

- De perfil o periodo uniforme: El periodo espacial de la rejilla grabada permanece constante a lo largo del eje de la fibra óptica.
- De periodo variable (“chirped”, en inglés): El periodo espacial de la rejilla grabada varía a lo largo del eje de la fibra óptica.
- De perfil inclinado: En este tipo de rejilla grabada, las secciones tienen un ángulo diferente a 90° con respecto al eje de la fibra.

Cada tipo de rejilla de Bragg tiene un uso específico en el área de las telecomunicaciones, así como en su uso en el desarrollo de sensores [7].

2.2.2. Funcionamiento

En la Fig. 2-5 se muestra de forma simplificada el funcionamiento de una rejilla de Bragg: la luz proveniente de una fuente generalmente de ancho espectral amplio se hace pasar por la FBG, al atravesar la FBG, una parte muy pequeña de la luz se refleja con pico de reflexión máxima a la longitud de Bragg, y el restante de la luz pasa sin cambios. La longitud de Bragg de la FBG se puede determinar al momento de su fabricación como se muestra en las Ecs. (2.9) y (2.10).

Una vez que la rejilla está grabada, su longitud de Bragg λ_B está determinada por:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (2.11)$$

donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo en el núcleo de la fibra y Λ es el periodo espacial de la rejilla.

Una deformación longitudinal, debida a una fuerza externa, puede cambiar tanto a Λ como a n_{eff} , el primero por el incremento en el periodo espacial de la rejilla y el último por el efecto fotoelástico, y por tanto λ_B cambiará. Igualmente, una variación en la temperatura cambiará a ambos parámetros, vía dilatación térmica y por el coeficiente termoóptico, respectivamente [31-32]. El efecto fotoelástico representa la variación del índice de refracción debida a la deformación y el coeficiente termoóptico representa la dependencia del índice de refracción a la temperatura. El cambio en la longitud Bragg de la rejilla $\Delta\lambda_B$ se logra combinando los efectos de la deformación de la rejilla ε_{FBG} y cambios de la temperatura ΔT :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T + (1 - \rho_e)\varepsilon_{\text{FBG}}, \quad (2.12)$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica del sílice, η es coeficiente termoóptico, ρ_e es la constante foto-elástica y ϵ_{FBG} es la deformación que sufre la rejilla. Los cambios en la rejilla de Bragg se pueden medir a partir de su espectro de reflexión o del espectro de transmisión.

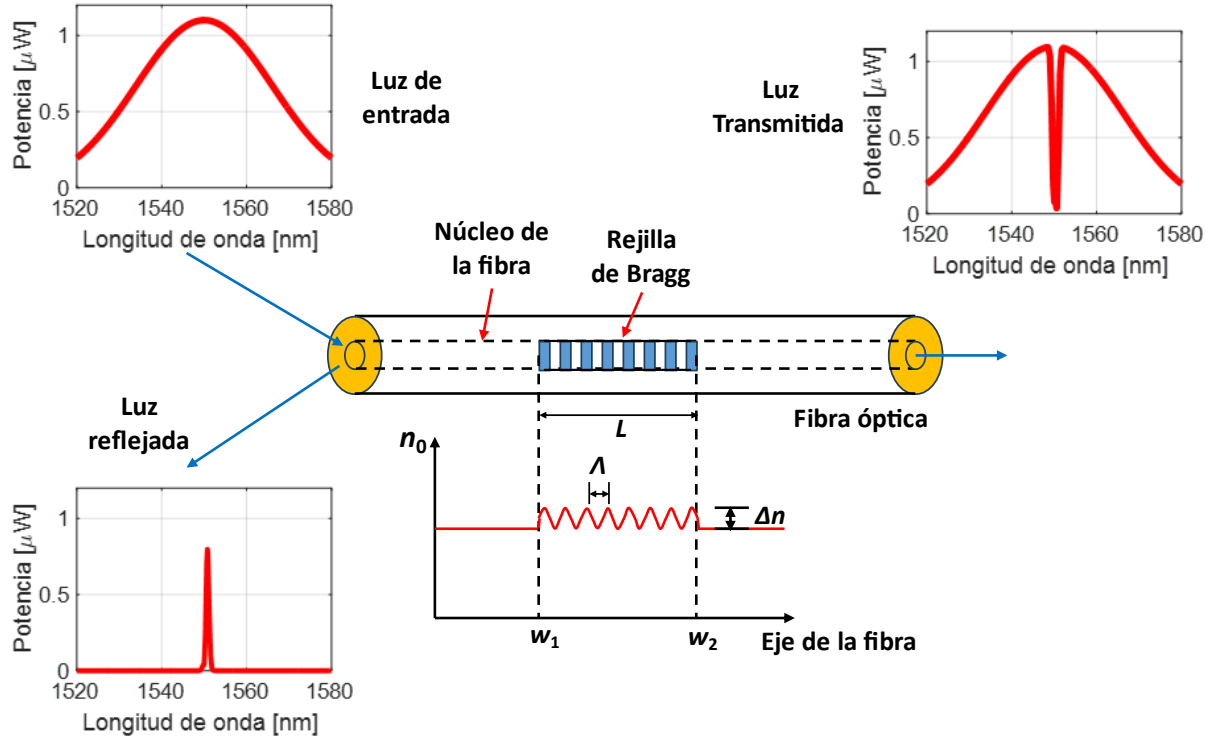


Fig. 2-5 Espectros de transmisión y de reflexión de una rejilla de Bragg. Λ es el periodo espacial de la rejilla, Δn es la profundidad de modulación del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, n_0 es el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, w_1 indica el punto de inicio de la rejilla y w_2 es el final de la rejilla.

2.2.3. Reflectividad y ancho de banda

La reflectividad y el ancho de banda son dos parámetros importantes que definen el comportamiento de una FBG. La reflectividad de la rejilla está dada como la relación de la potencia de la luz reflejada a la potencia de la luz incidente a una longitud de onda y depende de la profundidad de modulación del índice de refracción y de la longitud de la rejilla [33-34].

Por simplicidad se asume que el resultado de la perturbación del índice de refracción efectivo del modo guiado en la sección de la rejilla está descrito por [34]:

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(w) = \delta n_{\text{eff}} \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} w + \phi(w) \right] \right\}, \quad (2.13)$$

donde δn_{eff} es la variación inducida del cambio de índice efectivo, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ es el cambio de índice espacialmente promediado sobre un periodo de la rejilla, v es la visibilidad de franjas del cambio de índice de refracción, Λ es el periodo nominal, w es el eje de propagación de la luz a lo largo de la fibra óptica y $\phi(w)$ describe la variación del periodo de la rejilla en el

2 Fundamentos y antecedentes

caso de una rejilla de periodo variable. Si la rejilla es de periodo uniforme a lo largo de w , entonces $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ es una constante y $d\phi/dw=0$.

El pico de reflectividad R_{max} y la longitud de onda correspondiente λ_{max} están dadas por:

$$R_{\text{max}} = \tanh^2 \kappa L, \quad (2.14)$$

$$\lambda_{\text{max}} = \left(1 + \frac{\overline{\delta n_{\text{eff}}}}{n_{\text{eff}}} \right) \lambda_{\text{B}}, \quad (2.15)$$

donde κ es el coeficiente de acoplamiento, constante para rejillas uniformes, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ es el promedio del cambio de índice de refracción de la rejilla y L es la longitud de la FBG. De la Ec. (2.14) se obtiene que la reflectividad de la rejilla aumenta con el aumento de su longitud, ver Fig. 2-6(a), pero hay un límite donde ya no tiene caso seguir aumentando su longitud. De acuerdo con las Ecs. (2.14) y (2.15), el centro de la longitud de onda crece de forma monótona, a medida que δn_{eff} también aumenta, ver Fig. 2-6(b).

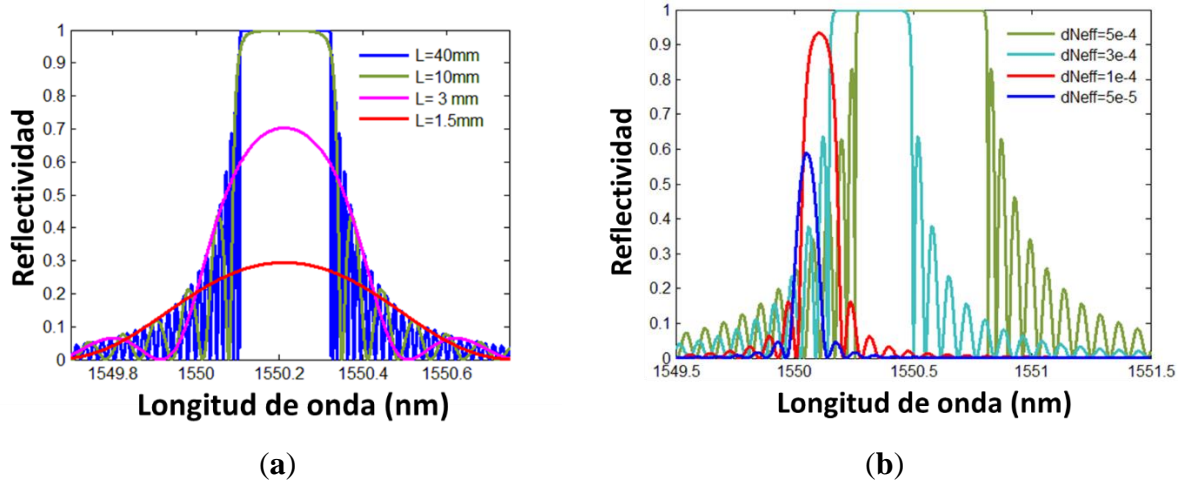


Fig. 2-6 Espectros de reflexión de una FBG de periodo uniforme: (a) Longitud L variable con $v=1$ y $\delta n_{\text{eff}}=2 \times 10^{-4}$, (b) modulación del índice de refracción δn_{eff} variable con $L=10$ mm y $v=1$ [33].

El ancho de banda $\delta\lambda_{\text{B}}$ para una rejilla “débil”, de baja reflectividad, está dada por:

$$\delta\lambda_{\text{B}} = \frac{2\Lambda\lambda_{\text{B}}}{L}, \quad (2.16)$$

De la Ec. (2.16), el ancho de banda es inversamente proporcional a la longitud de la rejilla, proporcional al periodo espacial de la rejilla e independiente de la modulación del índice de refracción y de la visibilidad de franjas, ver Fig. 2-7(a). Para el caso de rejillas “fuertes”, de alta reflectividad, el ancho de banda está dado por:

$$\delta\lambda_{\text{B}} = \frac{v\overline{\delta n_{\text{eff}}}}{n_{\text{eff}}}, \quad (2.17)$$

Dado que toda la luz en el ancho de banda se refleja antes de la longitud completa de la rejilla, el ancho de banda es independiente de la longitud de la rejilla, pero es proporcional

al cambio del índice de refracción que está afectada por la visibilidad de franjas, ver Fig. 2-7(b).

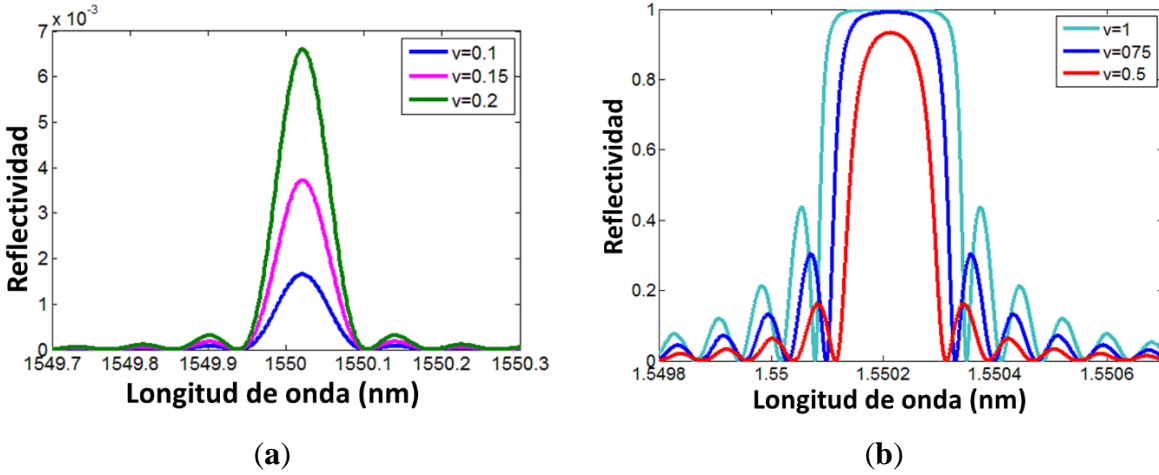


Fig. 2-7 Espectro de reflexión de una rejilla: (a) Débil, con visibilidad de franjas v variable cuando $L=10$ mm y $\delta n_{\text{eff}}=2 \times 10^{-5}$, (b) fuerte, con v variable cuando $L=10$ mm y $\delta n_{\text{eff}}=2 \times 10^{-4}$ [33].

2.3. Superposición de rejillas de Bragg en fibra óptica

El acelerómetro que se desarrolló se basa en la superposición espectral de rejillas de Bragg en fibra óptica que ya ha sido estudiado [35-37]. Este método utiliza dos rejillas que nominalmente tienen la misma longitud Bragg. La primera rejilla actúa como un filtro óptico rechaza-banda (en modo transmisión) y la segunda rejilla es la de sensado que recibe la luz filtrada y la regresa hacia un fotodetector. El cambio de longitud Bragg de la rejilla de sensado se transduce en un cambio en potencia óptica, esta potencia se mide con un fotodetector y ya no es necesario medir directamente la longitud Bragg con un interrogador. La fuente de luz tiene que ser de ancho espectral amplio con un perfil espectral de emisión suave (homogéneo) para que el cambio en la potencia de la luz que incide en el fotodetector se deba únicamente a deformaciones o cambios de temperatura que sufra la rejilla. Se prefiere el uso de una fuente de luz superluminescente en este esquema de demodulación.

En la Fig. 2-8 se muestra el esquema óptico para demodular la longitud Bragg de la rejilla de sensado FBG_{SEN} , una fuente de luz de ancho espectral amplio emite luz hacia la rejilla de referencia FBG_{REF} , esta rejilla actúa como un filtro óptico rechaza-banda, después la luz es dirigida hacia el circulador C_1 que a su vez dirige el haz de luz hacia la rejilla FBG_{SEN} , la reflexión de la rejilla de sensado regresa hacia el circulador que ahora dirige la luz hacia el fotodetector PD_1 . Este proceso se puede modelar teóricamente considerando que el espectro de emisión de la fuente de luz $F_s(\lambda)$ está dado por el modelo Gaussiano [35]:

$$F_s(\lambda) = I_p e^{\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta \lambda_0}\right)^2\right]}, \quad (2.18)$$

donde λ es la longitud de onda en el vacío, $\Delta \lambda_0$ es el ancho de banda de la fuente de luz, λ_0 es su longitud de onda central e I_p es:

2 Fundamentos y antecedentes

$$I_p = \frac{P_0}{\lambda_0} \sqrt{4 \ln \frac{2}{\pi}}, \quad (2.19)$$

donde P_0 la potencia total de la fuente.

Para modelar el espectro de la rejilla de Bragg también se puede suponer que el espectro de reflexión $R(\lambda)$ de la rejilla de sensado tiene un perfil Gaussiano:

$$R(\lambda) = R_0 e^{\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\delta \lambda_B} \right)^2 \right]}, \quad (2.20)$$

donde R_0 es el pico de reflectividad de la rejilla, λ_B es su longitud de Bragg y $\delta \lambda_B$ es su ancho de banda. El espectro de transmisión $T(\lambda)$ de la rejilla de referencia está dado por $(1-R(\lambda))$.

Finalmente, el espectro de la luz $I_F(\lambda)$ que llega al fotodetector está dado por:

$$I_F(\lambda) = F_s(\lambda) T(\lambda) R(\lambda). \quad (2.21)$$

Debido a que el ancho de banda de la fuente de luz es mucho más grande que el ancho de banda de la rejilla, la emisión de la fuente de luz a λ_B se puede considerar constante, y entonces la Ec. (2.21) se simplifica a:

$$I_F(\lambda) = F_s(\lambda_B) T(\lambda) R(\lambda), \quad (2.22)$$

con $F_s(\lambda_B)$ constante. Pero como el fotodetector integra toda la luz que le llega, la potencia óptica total P_D está dada por

$$P_D = \int_{-\infty}^{+\infty} F_s(\lambda_B) T(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (2.23)$$

sin considerar las pérdidas en la fibra óptica.

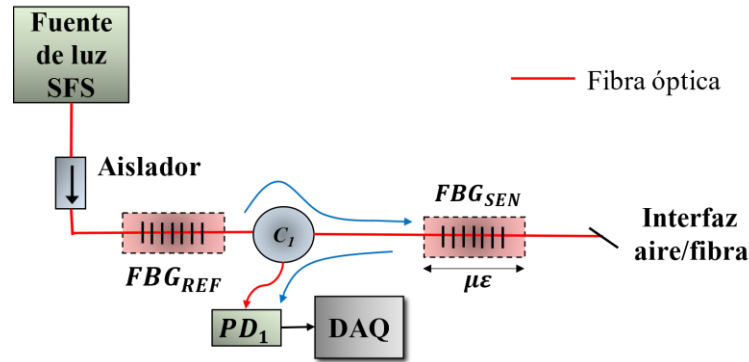


Fig. 2-8 Esquema óptico de demodulación de la longitud de Bragg de la FBG_{SEN} . SFS: Fuente de luz superluminescente en fibra óptica (SFS, por sus siglas en inglés). DAQ: Sistema de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés).

Cuando se integra el método de superposición a un acelerómetro, la sensibilidad de éste S_{la} , dada como el cambio de la longitud Bragg de la rejilla $\Delta \lambda_B$ con respecto a la aceleración a , $\Delta \lambda_B/a$, y su frecuencia de resonancia se pueden determinar relacionando las

Ecs. (2.12), (2.3) y (2.8), considerando temperatura constante en la Ec. (2.12). La deformación ε está dada como z/L_f .

$$S_{la} = \frac{\Delta\lambda_B}{a} = \frac{\lambda_B(1 - \rho_e)\varepsilon}{\frac{k}{m}z} = \frac{\lambda_B(1 - \rho_e)\frac{z}{L_f}}{\frac{E_f A_f}{mL_f}z} = \frac{m(1 - \rho_e)\lambda_B}{E_f A_f}. \quad (2.24)$$

El cambio de la longitud Bragg con respecto a la deformación para una rejilla en fibra óptica de sílice a una longitud de onda de 1550 nm es de 1.24 pm/ $\mu\varepsilon$, sustituyendo este valor en la Ec. (2.24), la sensibilidad se expresa como $1.24m/(E_f A_f)$.

Analizando la Ec. (2.24), se puede concluir que la sensibilidad del acelerómetro en unidades de $\Delta\lambda_B/a$ para una fibra con características determinadas solo depende de la masa inercial y no depende de la distancia entre los puntos que sujetan a la fibra óptica L_f . Dado que la frecuencia de resonancia f_0 del sensor es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la sensibilidad S , Ec. (2.4), se tiene que lograr un equilibrio entre ambos parámetros.

2.4. Fuente de luz y fotodetector

De manera general un sensor en fibra óptica se compone de una fuente de luz, un elemento de sensado que modula alguna propiedad de la luz y de un detector de luz que convierte la señal óptica en señal eléctrica [38].

Un diodo emisor de luz (Light-emitting diode, LED, por sus siglas en inglés) es una unión p-n fabricada de un material semiconductor de brecha-directa que emite luz vía electroluminiscencia por inyección. Si el voltaje en la unión se aumenta más allá de cierto nivel, el número de electrones y huecos puede llegar a ser suficientemente grande de tal forma que se logra la inversión de población tras lo cual, la emisión estimulada se vuelve más prevalente que la absorción y la unión se puede usar como un diodo láser. Los LEDs se pueden construir en dos configuraciones: emisor de superficie y emisor de borde, Fig. 2-9. En el LED emisor de superficie, la luz sale de una de las caras del dispositivo que es paralela al plano de la unión mientras que en un LED emisor de borde la luz sale por el borde de la región de la unión, esta última configuración también se usa en los diodos láser [39].

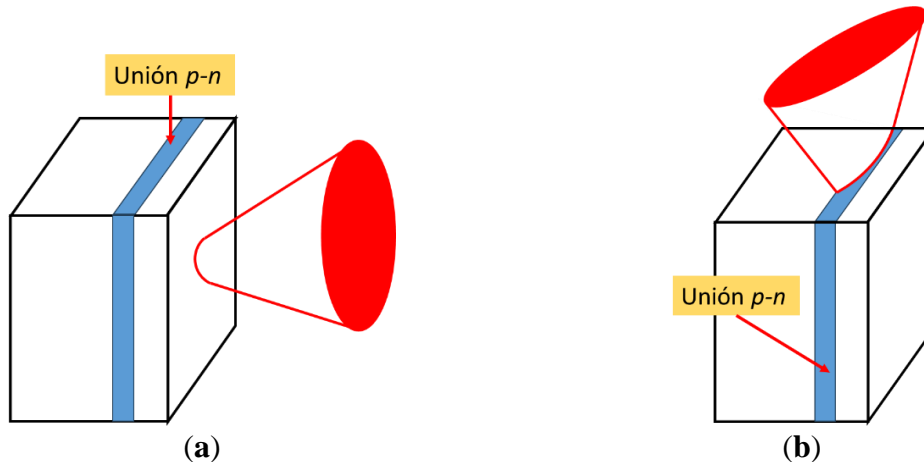


Fig. 2-9 Configuraciones de la estructura de un LED: (a) Emisor de superficie, (b) emisor de borde.

2 Fundamentos y antecedentes

Los LEDs producen luz por emisión espontánea de radiación, por lo que éstos tienen baja coherencia espacial y temporal, mientras que los láseres producen luz por emisión estimulada de radiación y con retroalimentación de la luz de salida a la entrada y así la luz emitida tiene alta coherencia espacial y temporal. Existe otra fuente de luz conocida como LED superluminiscente que emite luz amplificada como en un láser, pero por emisión espontánea y sin retroalimentación, este tipo de luz tiene un ancho espectral grande y es muy utilizada en situaciones que requieren una alta intensidad como en un láser y ancho espectral amplio y suave como en un LED. Puede tener alta coherencia espacial como para ser acopladas eficientemente a fibras ópticas monomodales.

El detector de luz es el elemento que permite una conversión de potencia óptica en corriente eléctrica. Para detectar luz de intensidad extremadamente baja generalmente se utiliza un fotomultiplicador, mientras que para aplicaciones menos demandantes hay tres tipos de fotosensores: el fotodiodo, el fototransistor y el fotorresistor. Los tres tipos de detectores utilizan el efecto fotoeléctrico. Éstos son denominados detectores cuánticos porque de acuerdo con la teoría cuántica, la luz consiste en fotones que tienen cierta cantidad de energía a los que se les denomina “cuantos”, entonces un fotodetector absorbe cuantos de luz y produce una respuesta eléctrica. Cuando la unión p-n del fotodetector está sujeta a energía radiante, el fotón transfiere su energía a un electrón y, si la energía es lo suficientemente alta, el electrón se puede mover, lo que resulta en una corriente eléctrica. Si la energía no es suficiente para liberar un electrón, entonces la energía del fotón se convierte en calor.

Un fotodiodo se puede usar en modo fotovoltaico (circuito abierto) o en modo fotoconductor (polarización inversa). El modo fotovoltaico significa que el sensor genera una salida en voltaje en respuesta a la luz incidente. El modo fotoconductor se puede ver como una resistencia eléctrica que varía en función de la luz incidente, esto se debe a que la luz causa transiciones de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción y se generan pares electrón-hueco en el semiconductor, esto contribuye a la concentración de portadores de carga móviles y aumenta la conductividad del material proporcional al flujo de fotones. En el modo fotoconductor, el fotodiodo se puede alimentar con un voltaje constante o poner sus terminales en cortocircuito. Este último modo es el más popular que además es útil en aplicaciones donde se requiere una respuesta rápida.

3. Descripción y desarrollo del dispositivo de sensado - Acelerómetro

En esta sección se describe el diseño y construcción de una mesa de vibración en un eje para caracterizar los sensores a desarrollar. Se describen las características de un arreglo de sensores capacitivos que junto con la mesa de vibración se utiliza para la calibración de los dispositivos. Se propone un modelo de un acelerómetro biaxial basado en un trabajo previamente desarrollado en el laboratorio con algunas modificaciones para aumentar su frecuencia de resonancia y lograr una sensibilidad similar en ambos ejes, se realiza el análisis teórico de su sensibilidad y frecuencia de resonancia y se analiza la relación que existe entre la sensibilidad del dispositivo y su frecuencia natural. Posteriormente se propone una configuración para el acelerómetro triaxial basado en el funcionamiento del prototipo biaxial para mantener la misma ventaja que es el uso de una menor cantidad de rejillas de Bragg en su implementación y se describe el funcionamiento de los esquemas ópticos de demodulación del cambio de la longitud Bragg de las rejillas para cada modelo de acelerómetro. Se realiza la caracterización de las rejillas de Bragg utilizadas en este trabajo con el uso de la técnica de superposición espectral de tres rejillas, del sensor de temperatura que se utiliza como testigo y se determina experimentalmente el módulo de Young de una barra de Nylon utilizada en el sensor biaxial. Finalmente se muestran los esquemas generales de la etapa electrónica que complementa el funcionamiento de los acelerómetros ópticos y los diagramas de flujo de los programas para la visualización y almacenamiento de los datos adquiridos por el sensor triaxial.

3.1. Mesa de vibración

Para realizar la calibración dinámica del acelerómetro se necesita de una mesa de vibración. Para este propósito, inicialmente se utilizó una máquina de control numérico computarizado (Computer numerical control, CNC, por sus siglas en inglés) y se crearon códigos para que realizara movimientos oscilatorios en una dirección a la vez, pero, al momento de hacer la caracterización del acelerómetro, las vibraciones causadas por el propio movimiento de la mesa eran mayores que las vibraciones que se pretendían medir. Al hacer

un análisis espectral de las señales registradas, fue posible identificar las amplitudes de las frecuencias del movimiento que se necesitan medir, pero en las señales en tiempo no era posible, por lo anterior, se decidió diseñar y fabricar una mesa de vibración con movimiento en un eje. El requerimiento para el diseño de la mesa fue la posibilidad de variar la frecuencia del movimiento desde 0.1 Hz hasta 50 Hz, la amplitud del desplazamiento estaba limitada por el espacio físico del laboratorio.

3.1.1. Aceleración y desplazamiento a diferentes frecuencias

Para determinar el desplazamiento necesario de la mesa de vibración y lograr una aceleración deseada se analiza la relación que existe entre la aceleración y el desplazamiento a diferentes frecuencias.

Si se supone un movimiento oscilatorio de la mesa de vibración cuyo desplazamiento x con respecto al tiempo se puede modelar mediante una función senoidal de la forma:

$$x = A_m \sin \omega t, \quad (3.1)$$

donde A_m es la amplitud del desplazamiento, ω es la velocidad angular y t el tiempo. La velocidad v_m del movimiento estará dada por:

$$v_m = A_m \omega \cos(\omega t). \quad (3.2)$$

Finalmente, la aceleración del movimiento estará dada por:

$$a = -A_m \omega^2 \sin(\omega t). \quad (3.3)$$

Si se toma solo amplitud de a , v_m y de x se tienen las siguientes relaciones:

$$|x| = A_m = \frac{|v_m|}{\omega} = \frac{|a|}{\omega^2}. \quad (3.4)$$

De la Ec. (3.4) se obtiene la gráfica de la Fig. 3-1 donde se observa que a menor frecuencia se requiere de un desplazamiento mucho mayor para mantener la misma amplitud o pico de aceleración.

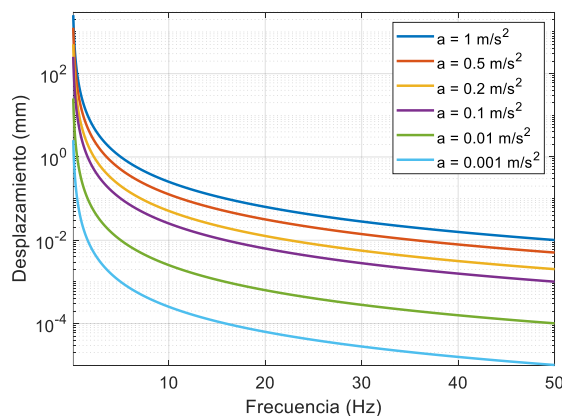


Fig. 3-1 Relación entre la frecuencia de un movimiento descrito por una función senoidal y el desplazamiento correspondiente del objeto o mesa de vibración.

3 Descripción y desarrollo del dispositivo de sensado - Acelerómetro

Dado que el acelerómetro desarrollado en este trabajo está diseñado para medir aceleraciones bajas a bajas frecuencias se requiere de un desplazamiento grande. Por ejemplo, para lograr una amplitud de aceleración de 0.01 m/s^2 a una frecuencia de 0.1 Hz se requiere de un desplazamiento pico de 24.85 mm mientras que para lograr la misma aceleración a 20 Hz se requiere de un desplazamiento de solo 0.00062 mm .

3.1.2. Diseño de la mesa de vibración

De acuerdo con la Ec. (3.4) para lograr una aceleración de 5 m/s^2 a 0.5 Hz se requiere de un desplazamiento de 50.6 cm , dicho desplazamiento es bastante grande y las dimensiones de la mesa serían considerables, por lo que se decidió que el desplazamiento máximo de la mesa de vibración sea de solo 21 cm . Para su construcción se consiguieron dos correderas extensibles con un deslizamiento máximo de 35 cm , como actuador se utilizó un motor universal marca Anysew de 150 W a 110 V y 8000 revoluciones por minuto máximo, y una fuente de alimentación de DC con voltaje de salida en un rango de $0-100 \text{ V}$ para controlar la velocidad del motor. Para la base fija de la mesa, la superficie móvil, las poleas y algunos soportes se utilizaron tablas pino.

En cuanto a la elección del rango de frecuencias del movimiento de la mesa, el objetivo fue obtener frecuencias de $0.1 \text{ Hz} - 50 \text{ Hz}$, para ello se utilizó una serie de ejes unidos por poleas que reducen la velocidad de cada eje subsecuente. Cada eje tiene un sub-rango de frecuencias como se muestra en la Fig. 3-2, dependiendo de la frecuencia del movimiento deseada se agrega una biela de longitud ajustable al eje respectivo. Para cambiar la amplitud del desplazamiento, se ajusta la excentricidad de la biela, el movimiento se transmite a la plataforma móvil de la mesa por medio de otra biela de longitud fija.

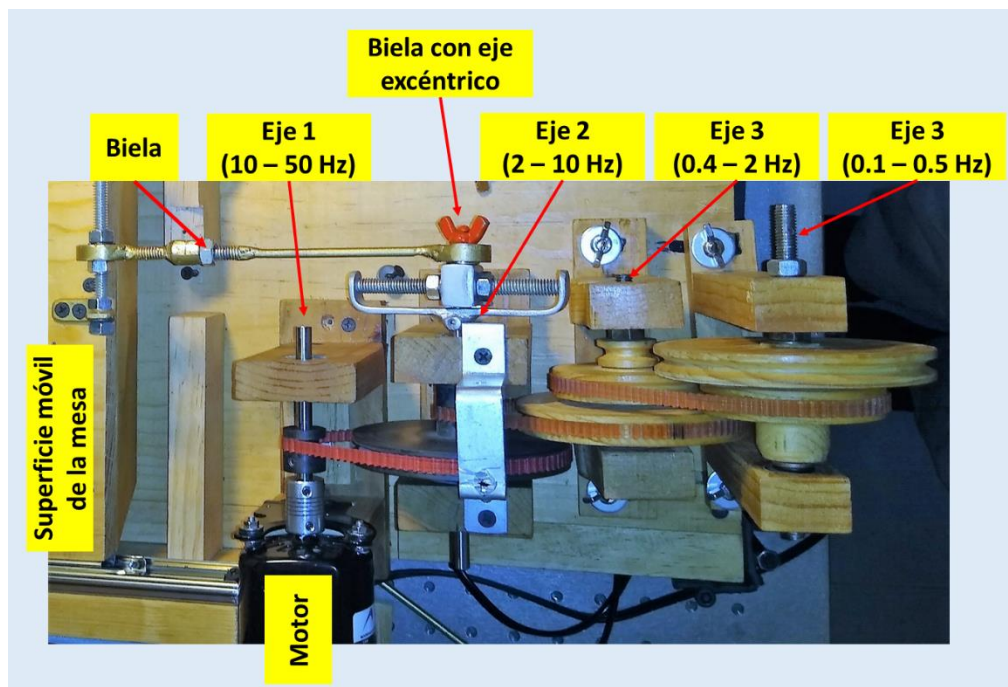


Fig. 3-2 Conjunto de poleas que permiten de movimiento de la mesa en un rango desde 0.1 Hz hasta 50 Hz .

En la Fig. 3-3 se muestra la mesa de vibración terminada con movimiento de un eje, desplazamiento máximo de 21 cm y un rango de frecuencias ajustable de 0.1 Hz – 50 Hz. La superficie móvil de la mesa tiene dimensiones de 29 × 32 cm.

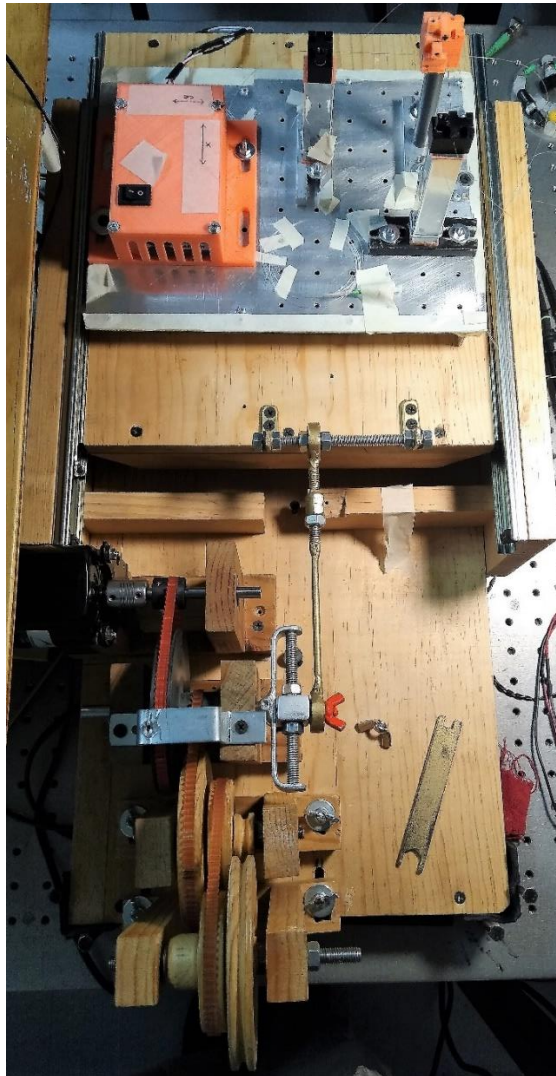


Fig. 3-3 Mesa de vibración en un eje con un desplazamiento máximo de 21 cm y un rango de frecuencias de movimiento de 0.1 – 50 Hz. Las dimensiones de la mesa son 29×32 cm.

3.2. Acelerómetro de referencia

El acelerómetro de referencia para calibración consiste en un arreglo de tres acelerómetros capacitivos MEMS uniaxiales dispuestos ortogonalmente: dos acelerómetros horizontales MMA2260D y un acelerómetro para el eje vertical MMA1260D. Las características de estos acelerómetros son [24, 40]:

- Rango de medición en amplitud de aceleración: $\pm 15 \text{ m/s}^2$
- Filtro electrónico paso-bajas de segundo orden con ancho de banda de 50 Hz
- Sensibilidad: $0.12 \text{ V}/(\text{m/s}^2)$
- Ruido RMS nominal: 5 mV (MA1260), 3.5 mV (MMA2260)

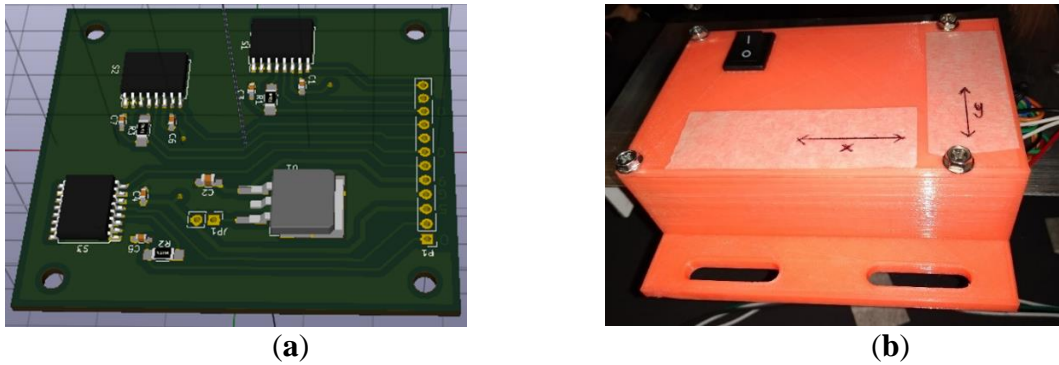


Fig. 3-4 Arreglo de tres acelerómetros uniaxiales capacitivos para la calibración de los acelerómetros en desarrollo. (a) Placa electrónica, (b) caja de protección de los acelerómetros.

3.3. Modelado de los acelerómetros ópticos desarrollados

El modelado general de un acelerómetro y las ecuaciones para determinar su sensibilidad y frecuencia de resonancia se mostraron en la sección 2.1. El modelado específico para los acelerómetros que se desarrollaron en este trabajo depende de cada estructura.

3.3.1. Acelerómetro biaxial

La estructura del prototipo biaxial se muestra en la Fig. 3-5, los postes fijos junto con la base forman el marco del sensor. El material de la base, de los postes fijos y de las pinzas que sujetan una sola fibra óptica son de aluminio, la barra flexible es de nylon. La distancia vertical desde la base hasta la altura de la fibra óptica es de 91 mm, la distancia entre los puntos de fijación de la fibra óptica del eje X es de 56 mm y la distancia correspondiente para el eje Y también es de 56 mm.

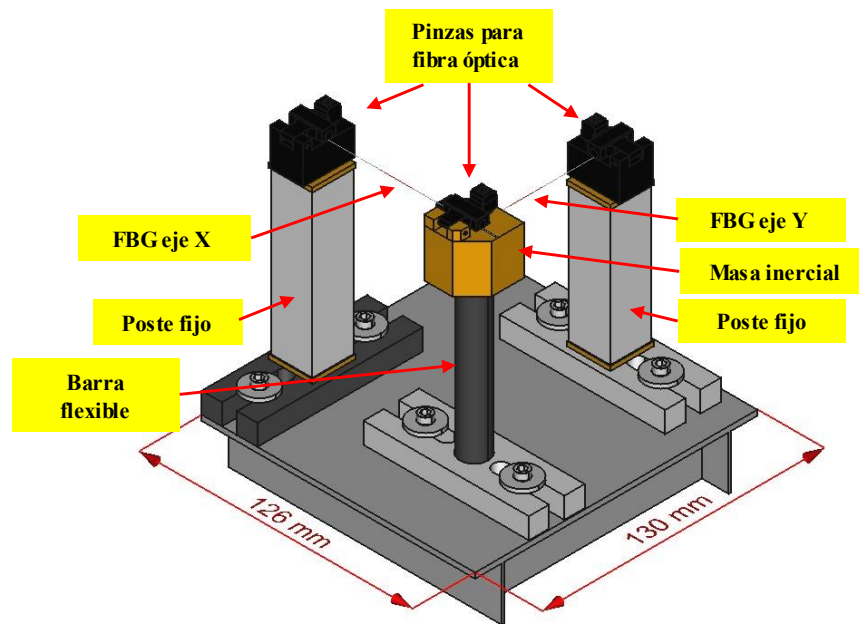


Fig. 3-5 Estructura del acelerómetro biaxial.

3.3 Modelado de los acelerómetros ópticos desarrollados

Para determinar la frecuencia de resonancia de la estructura analizamos cada eje por separado, Fig. 3-6(a). Para ello se calcula una rigidez equivalente que incluye la rigidez a la flexión de la barra de nylon y la rigidez de la fibra óptica. El esquema de la Fig. 3-6(b) muestra el modelo para un eje del sensor. La rigidez de la fibra óptica k_f y la rigidez de la barra a la flexión k_s se colocan en paralelo. La rigidez de la fibra óptica está dada por la Ec. (2.8), el valor de k_s se puede obtener como:

$$k_s = \frac{3E_s I_s}{L_s^3}, \quad (3.5)$$

donde E_s y L_s son el módulo de Young y la longitud de la barra flexible, respectivamente. I_s es el segundo momento de inercia, que es el mismo en todas direcciones dada por $I_s = (\pi/4)r^4$, donde r es su radio.

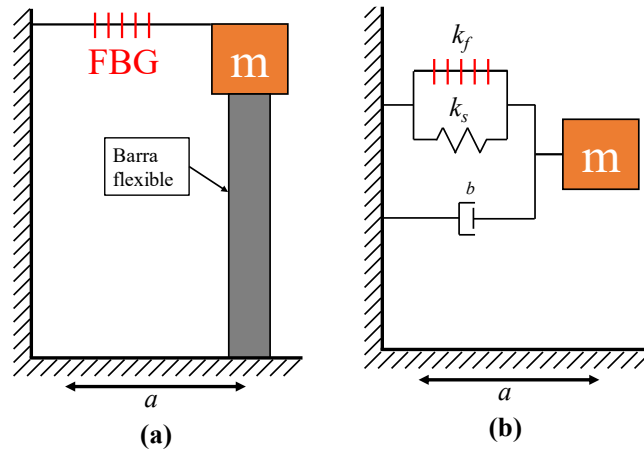


Fig. 3-6 (a) Esquema de la estructura de un eje del acelerómetro óptico, **(b)** modelo equivalente. k_f es la rigidez de la fibra óptica, k_s es la rigidez de la barra de nylon a la flexión, b representa el coeficiente de amortiguamiento del sistema y a es la aceleración en la dirección mostrada por las flechas.

La rigidez equivalente del sistema es $k_s + k_f$. Cuando la frecuencia de excitación es mucho menor que la frecuencia natural del sensor, su sensibilidad S_{1a} , expresada como el cambio de la longitud de Bragg de la rejilla con respecto a la aceleración se puede expresar como [41]:

$$S_{1a} = \frac{\Delta\lambda_B}{a} = \frac{m(1 - \rho_e)\lambda_B}{k_s L_f + E_f A_f}. \quad (3.6)$$

Y la primera frecuencia de resonancia f_0 se pueden expresar como:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s L_f + E_f A_f}{m L_f}}. \quad (3.7)$$

Las Ecs. (3.6) y (3.7) se usan para calcular la sensibilidad S_{1a} y f_0 para cada eje del acelerómetro.

3.3.2. Acelerómetro triaxial

El acelerómetro triaxial consiste en tres ejes dispuestos ortogonalmente construido a partir de una masa inercial en el centro del marco del sensor suspendida por seis secciones de fibra óptica, por lo tanto, se puede analizar uno de sus ejes y las ecuaciones obtenidas se pueden aplicar para los otros dos ejes. En la Fig. 3-7(a) se muestra el diagrama simplificado de un eje del sensor, la masa inercial se encuentra sujeta en ambos extremos por la fibra óptica, en uno de sus lados hay una rejilla de Bragg y del otro lado no hay rejilla, el otro extremo de la fibra óptica se sujeta al marco del sensor. En la Fig. 3-7(b) se muestra el diagrama para determinar la rigidez equivalente de la fibra misma que se representa con el símbolo de un resorte. En la Fig. 3-7(c) se muestra el diagrama equivalente del resorte que es el equivalente a dos resortes en paralelo, y finalmente, en la Fig. 3-7(d) se muestra el diagrama con la rigidez equivalente de la fibra óptica. La rigidez k_f de la fibra óptica se determina con la Ec. (2.8).

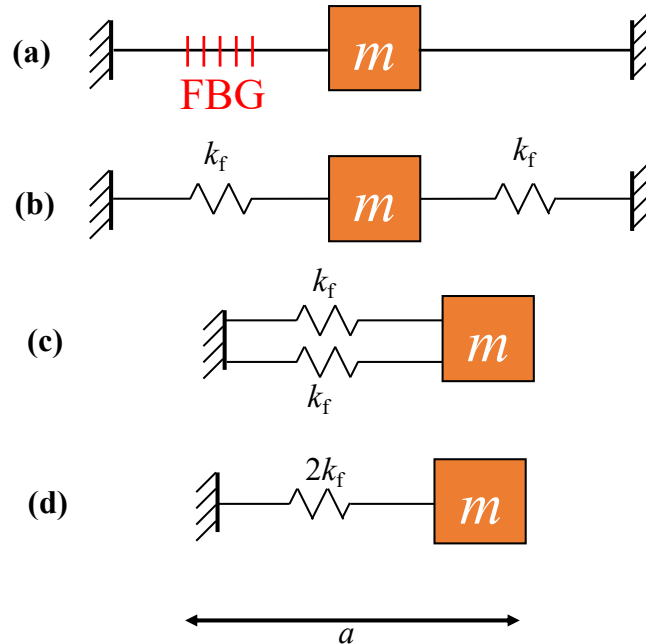


Fig. 3-7 Esquema y diagrama equivalente de un eje del sensor triaxial. (a) Esquema, (b) diagrama correspondiente que representa a la fibra óptica como un resorte, (c) reducción del diagrama, (d) rigidez equivalente de la fibra óptica.

Tomando como base las Ecs. (2.4) y (2.24) y la rigidez equivalente de la fibra $2k_f$, la sensibilidad del acelerómetro en unidades de $\Delta\lambda_B/a$ se expresa como:

$$S_{1a} = \frac{\Delta\lambda_B}{a} = \frac{m(1 - \rho_e)\lambda_B}{2E_f A_f}, \quad (3.8)$$

y la primera frecuencia de resonancia f_0 se pueden expresar como:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2E_f A_f}{mL_f}}, \quad (3.9)$$

3.4. Parámetros que afectan la sensibilidad del acelerómetro óptico

En este trabajo, la sensibilidad del acelerómetro desarrollado se expresa de tres formas diferentes. La primera es la sensibilidad S en unidades de s^{-2} que es la forma general de expresar la sensibilidad de cualquier tipo de acelerómetro. La segunda aplica para los acelerómetros ópticos basados en FBGs que se expresa como la relación del cambio de la longitud de Bragg de la rejilla con respecto a la aceleración $S_{la} = \Delta\lambda_B/a$ y es la forma en que se deriva la sensibilidad en la sección 3.3. La tercera forma en que se expresa la sensibilidad es en unidades de voltaje de la señal de salida con respecto a la aceleración $S_v = V_{out}/a$, en estas unidades se expresa la sensibilidad final del dispositivo que se desarrolla en este trabajo y es proporcional al cambio de la longitud de Bragg de las rejillas de sensado.

Utilizando las expresiones derivadas en términos de $\Delta\lambda_B/a$, Ecs. (3.8) y (3.9), se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al aumentar la masa inercial, la sensibilidad aumenta, pero disminuye la frecuencia natural.
- Al aumentar la longitud l_f de la fibra óptica, la sensibilidad no se ve afectada pero la frecuencia natural disminuye.

3.5. Esquema óptico para la demodulación de la longitud Bragg de las rejillas

Basado en el funcionamiento del esquema óptico de demodulación de la sección 2.3 se proponen los esquemas que a continuación se detallan. Como anteriormente se indicó, la fuente de luz utilizada es de tipo superluminiscente, ya que este tipo de luz permite inducir en la señal de salida del sensor, una alta correlación entre el desplazamiento de la longitud Bragg y la potencia de la luz que recibe el fotodetector. En contraparte, cuando se usa una fuente láser no hay correlación entre las cantidades antes mencionadas.

3.5.1. Acelerómetro biaxial

El esquema óptico propuesto para el sensor biaxial se muestra en la Fig. 3-8, este esquema se puede dividir en una rama superior y otra inferior correspondiente a los ejes X e Y, respectivamente. Este esquema óptico nos permite demodular la longitud Bragg de ambas rejillas de sensado superponiendo los espectros de cada rejilla con la misma rejilla de referencia FBG_{REF} . La rejilla FBG_{REF} está sujeta a la misma aceleración que las rejillas de sensado, pero esta se adhiere en ambos extremos con pinzas para fibras ópticas fijas, por tanto, se puede decir que la rejilla de referencia solo está sometida a cambios de temperatura. La variación de la temperatura produce cambios en la longitud Bragg tanto de las rejillas de sensado como de la rejilla de referencia. Este desplazamiento de la longitud Bragg es en la misma dirección en todas las rejillas, por tanto, al superponer los espectros se realiza una compensación intrínseca de la temperatura.

3.5.2. Acelerómetro triaxial

El esquema óptico propuesto para el sensor triaxial se muestra en la Fig. 3-9, a diferencia del esquema de demodulación tradicional, en este esquema se superpone el espectro de la rejilla de referencia con cada uno de los espectros de las rejillas de sensado, el mismo principio de funcionamiento que en el caso del acelerómetro biaxial previamente descrito donde se reutiliza la rejilla de referencia.

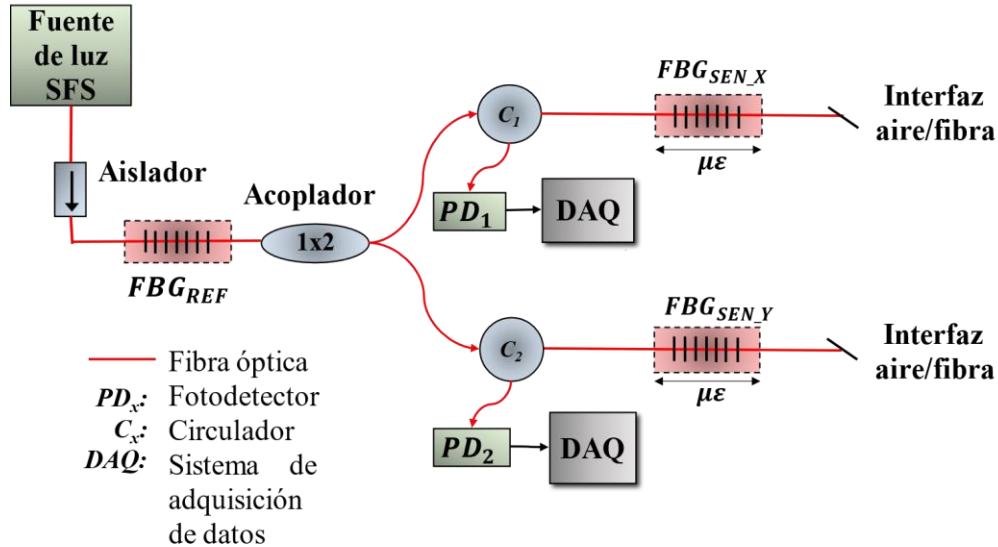


Fig. 3-8 Esquema propuesto para medir los cambios de la longitud Bragg de las rejillas de sensado en el acelerómetro biaxial.

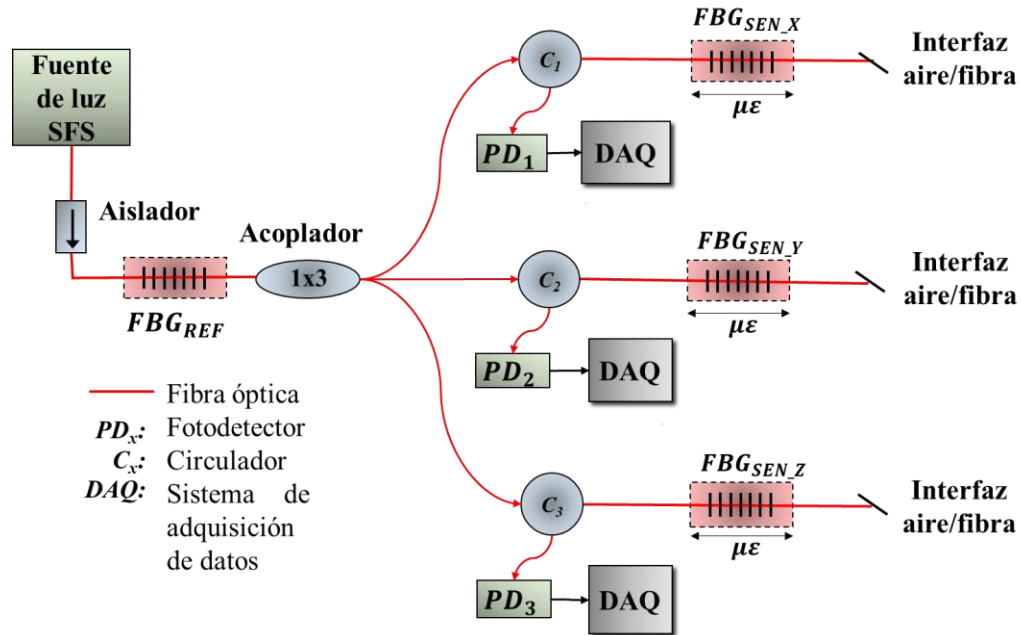


Fig. 3-9 Esquema propuesto para medir los cambios de la longitud Bragg de las rejillas de sensado en el acelerómetro triaxial.

El análisis del funcionamiento de este esquema óptico se realiza de la misma forma que la mostrada en la sección 2.3, se analiza cada eje por separado, se utiliza la misma rejilla de referencia en cada uno de los tres ejes. Este cambio en el esquema óptico supone el ahorro en el número de rejillas de Bragg que se utilizan, en la literatura existen reportados trabajos que normalmente utilizan dos rejillas de Bragg para cada eje [20, 42], para un dispositivo triaxial se requieren seis rejillas de Bragg en total, en nuestro caso solo se utiliza una rejilla para cada eje más la de referencia, cuatro rejillas en total, no seis.

3.6. Caracterización de los principales elementos in situ

3.6.1. Rejillas de Bragg

En esta sección se obtienen de forma experimental el espectro de reflexión y de transmisión de las rejillas, así como también su ancho de banda y sensibilidad a la fuerza y a la deformación.

3.6.1.1. Espectros de transmisión y reflexión y ancho de banda

El fabricante de las rejillas de Bragg proporciona la hoja de datos de sus rejillas, pero las características específicas de cada elemento pueden variar, por eso se realizó la caracterización de las rejillas de Bragg utilizadas en la implementación de los acelerómetros ópticos. Con la ayuda de un analizador de espectros ópticos (Optical spectrum analyzer, OSA, por sus siglas en inglés) modelo Q8381 de Advantest se obtuvieron las características mostradas en la Tabla 3-1 donde se comparan los parámetros nominales con los experimentales. Es de recalcar que la reflectividad obtenida experimentalmente fue de entre un 54.2% a un 55.4%, este valor está muy por debajo de los valores nominales. En cuanto al ancho de banda, este se encuentra entre 0.331 nm y 0.340 nm.

Tabla 3-1 Valores nominales y experimentales de las FBGs utilizadas en el sensor biaxial.

	# de serie	200714-102 (Referencia)	200714-100 (Eje X)	200714-101 (Eje Y)
Nominal	λ_B [nm]	1550	1550	1550
	$\Delta\lambda_B$ [nm]	0.2	0.2	0.2
	R [%]	>95	>95	>95
Experimental	λ_B [nm]	1549.556	1549.611	1549.566
	$\Delta\lambda_B$ [nm]	0.335	0.340	0.331
	R [%]	54.2	55.4	54.5

En la Fig. 3-10 se muestran los espectros de transmisión y de reflexión de las rejillas, los tres espectros son muy similares y los lóbulos laterales están suprimidos casi en su totalidad.

3.6.1.2. *Sensibilidad a la fuerza y a la deformación*

La sensibilidad teórica de una rejilla de Bragg a la deformación S_d , utilizando la Ec. (2.12), inscrita en fibra óptica de sílice con coeficiente fotoelástico $\rho_e = 0.22$ y coeficiente de expansión térmica $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ a 1550 nm es de $1.20 \text{ pm}/\mu\epsilon$ [32]. Esta sensibilidad teórica se ve disminuida si la fibra óptica se fija a la estructura del acelerómetro por medio de su recubrimiento, esto también se reportó en [22]. Para evitar la disminución de la sensibilidad de la FBG, lo que se tiene que hacer es quitar el recubrimiento de acrilato de las fibras ópticas y pegar la fibra directamente por su revestimiento, con esto se logra la sensibilidad teórica de la rejilla de Bragg.

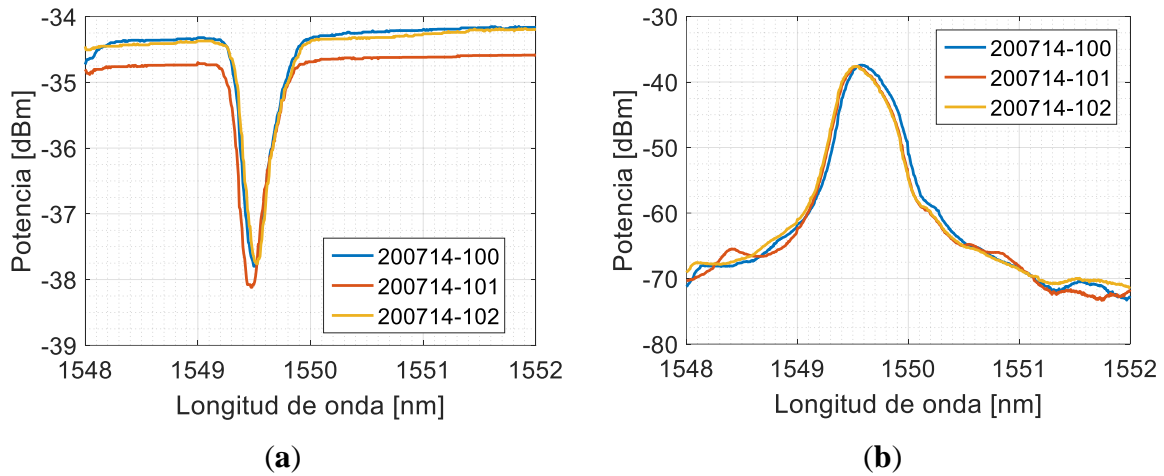


Fig. 3-10 Espectros de transmisión y de reflexión experimentales de las rejillas utilizadas en los sensores: (a) Espectros de transmisión, (b) espectros de reflexión.

Se realizó un experimento para determinar la sensibilidad de la FBG a la deformación cuando ésta se fija por su recubrimiento y comparar los resultados con los de la rejilla cuando se fija directamente por su revestimiento. El esquema del experimento utilizado para determinar la sensibilidad de la rejilla se muestra en la Fig. 3-11. Consiste en colocar la fibra óptica sobre dos postes, uno fijo y otro móvil. El poste móvil se desplaza con la ayuda de una platina de desplazamiento micrométrico para aplicar tensión controlada a la rejilla de Bragg, los cambios de la longitud Bragg de las rejillas se miden con un analizador de espectros ópticos.

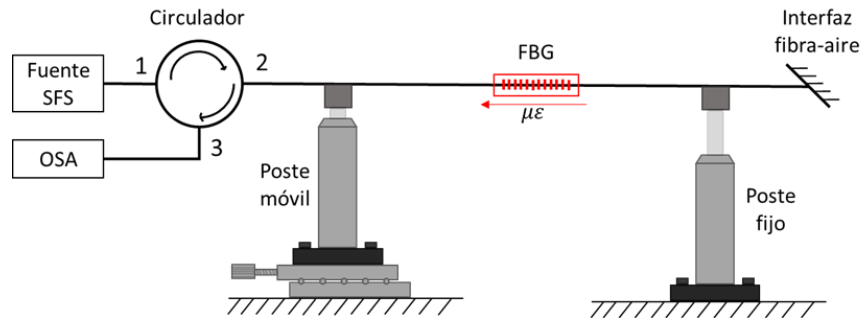


Fig. 3-11 Esquema experimental para determinar la sensibilidad de la FBG a la deformación.

3.6 Caracterización de los principales elementos in situ

Los resultados de este experimento se muestran en la Fig. 3-12, la sensibilidad de la rejilla a la deformación cuando está pegada directamente por su revestimiento es casi igual a la sensibilidad teórica, de 1.20 pm/ $\mu\epsilon$, comparado con 1.23 pm/ $\mu\epsilon$ experimental, Fig. 3-12(b). Cuando la fibra óptica solo se pega por su recubrimiento la sensibilidad disminuye en un 54% cayendo hasta 0.56 pm/ $\mu\epsilon$, Fig. 3-12(a). Durante el desarrollo de los sensores, se utilizará la fibra sujeta solo por su recubrimiento para poder reutilizar las FBGs, para la implementación final se buscará la forma más adecuada de quitar el recubrimiento de las fibras sin debilitarlas.

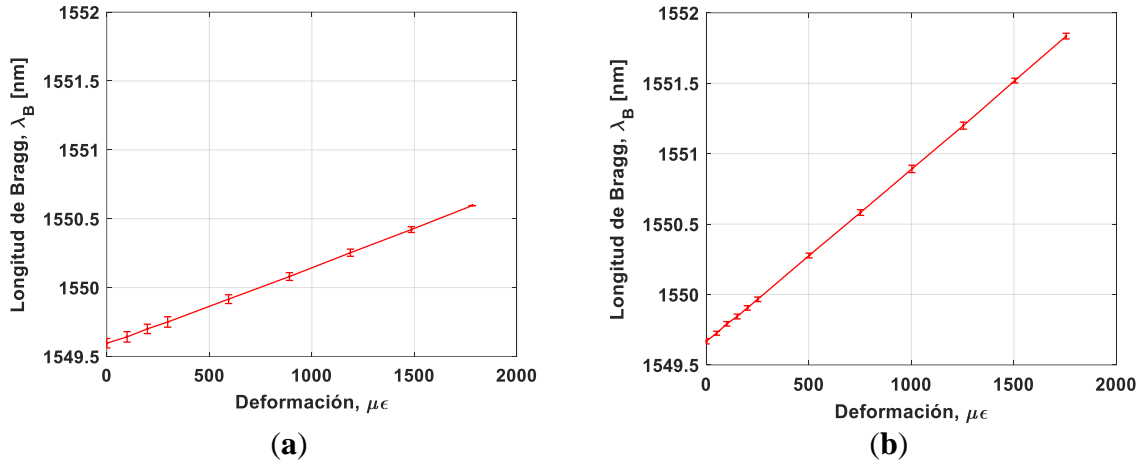


Fig. 3-12 Sensibilidad de la FBG a la deformación S_d : (a) Rejilla pegada por su recubrimiento $S_d = 0.56$ pm/ $\mu\epsilon$, (b) Rejilla pegada por su revestimiento $S_d = 1.23$ pm/ $\mu\epsilon$.

Por otro lado, también se determinó experimentalmente la sensibilidad de la FBG a la fuerza S_{if} , para ello se llevó a cabo un arreglo experimental cuyo diagrama se muestra en la Fig. 3-13.

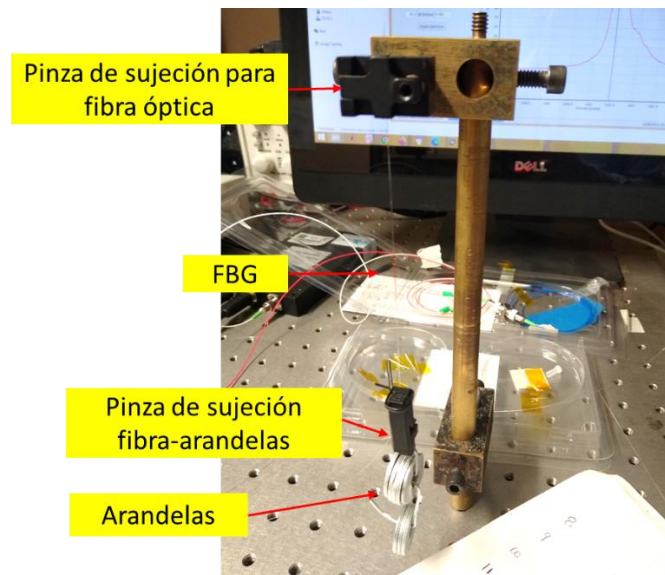


Fig. 3-13 Montaje para determinar la sensibilidad de la FBG a la fuerza S_{if} . Una pinza sujeta a la fibra óptica en la parte superior mientras que en la parte inferior se agregan arandelas de metal.

3 Descripción y desarrollo del dispositivo de sensado - Acelerómetro

La fibra óptica se fija en la parte superior utilizando una pinza para fibra óptica [43], en la parte inferior otra pinza diseñada e impresa en el laboratorio en material PLA se sujeta de la fibra óptica, la FBG queda en la parte media entre las dos pinzas de sujeción. A la pinza inferior se le agregan arandelas con masa conocida y se mide el cambio en la longitud Bragg de la rejilla bajo caracterización con un analizador de espectros ópticos. Las arandelas se agregan de una en una hasta llegar a un máximo de 61.58 gramos que considerando la aceleración de la gravedad como 9.81 m/s^2 equivale a una fuerza de 0.60 N.

Los resultados de esta prueba se muestran en la Fig. 3-14, la razón entre el cambio de la longitud Bragg y la fuerza aplicada a la rejilla $S_{if} = \Delta\lambda_B / F$ obtenida es de 1.372 nm/N. La sensibilidad S_{if} también se puede calcular de forma teórica a partir de la Ec. (2.24) que dividiendo entre la masa m da como resultado:

$$S_{if} = \frac{\Delta\lambda_B}{ma} = \frac{m(1 - \rho_e)\lambda_B}{mE_f A_f} = \frac{(1 - \rho_e)\lambda_B}{E_f A_f}, \quad (3.10)$$

La sensibilidad teórica S_{if} calculada a partir de la Ec. (3.10), con $\rho_e = 0.22$, $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$, $E_f = 16.56 \text{ GPa}$, y $A_f = 4.91 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ da como resultado 1.487 nm/N. La diferencia entre el resultado teórico y el experimental es del 7.7% que es un resultado aceptable. Este resultado se utiliza más adelante para calcular la masa inercial adecuada en el diseño del acelerómetro triaxial.

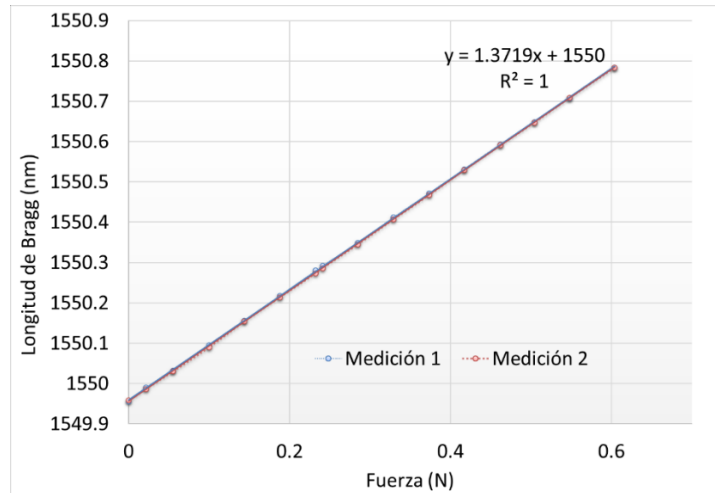


Fig. 3-14 Sensibilidad experimental de la FBG a la fuerza. $S_{if}=1.372 \text{ nm/N}$.

3.6.2. Potencia de la luz en el fotodetector en función de la diferencia de longitudes de Bragg ($\lambda_{B_SENS} - \lambda_{B_REF}$)

Como parte de la caracterización de cada elemento de los acelerómetros, en esta sección se presentan los resultados prácticos de la superposición de los espectros de las rejillas utilizando el esquema óptico mostrado en la Fig. 3-8 que corresponde al esquema del acelerómetro biaxial. Para este experimento se utilizaron tres rejillas de las cuales son dos de sensado FBG_{SEN} y la de referencia FBG_{REF} . Las rejillas utilizadas en este experimento son las mismas que se utilizaron en la implementación del acelerómetro biaxial y posteriormente se reutilizaron en el acelerómetro triaxial.

3.6 Caracterización de los principales elementos in situ

En la Fig. 3-15 se muestran los espectros de dos rejillas, la de referencia y una de sensado con la intención de hacer notar el cambio en la potencia óptica ES-FD que recibe el fotodetector a medida que la longitud de Bragg de una de las rejillas se desplaza. En el esquema de superposición de la Fig. 3-8, la rejilla de referencia hace la función de un filtro óptico rechaza banda porque trabaja en modo transmisión, mientras que la rejilla de sensado opera en modo reflexión. En la Fig. 3-15(a-b), se muestra el caso en que la longitud de Bragg de ambas rejillas es igual y la potencia ES-FD es mínima, en la Fig. 3-15(c-d) se muestra el caso en el que las longitudes de Bragg están separadas en un nivel intermedio y la potencia ES-FD es media y finalmente en la Fig. 3-15(e-f) se muestra en el caso en el que las longitudes de Bragg de las rejillas están en el nivel máximo de separación y la potencia ES-FD es máxima.

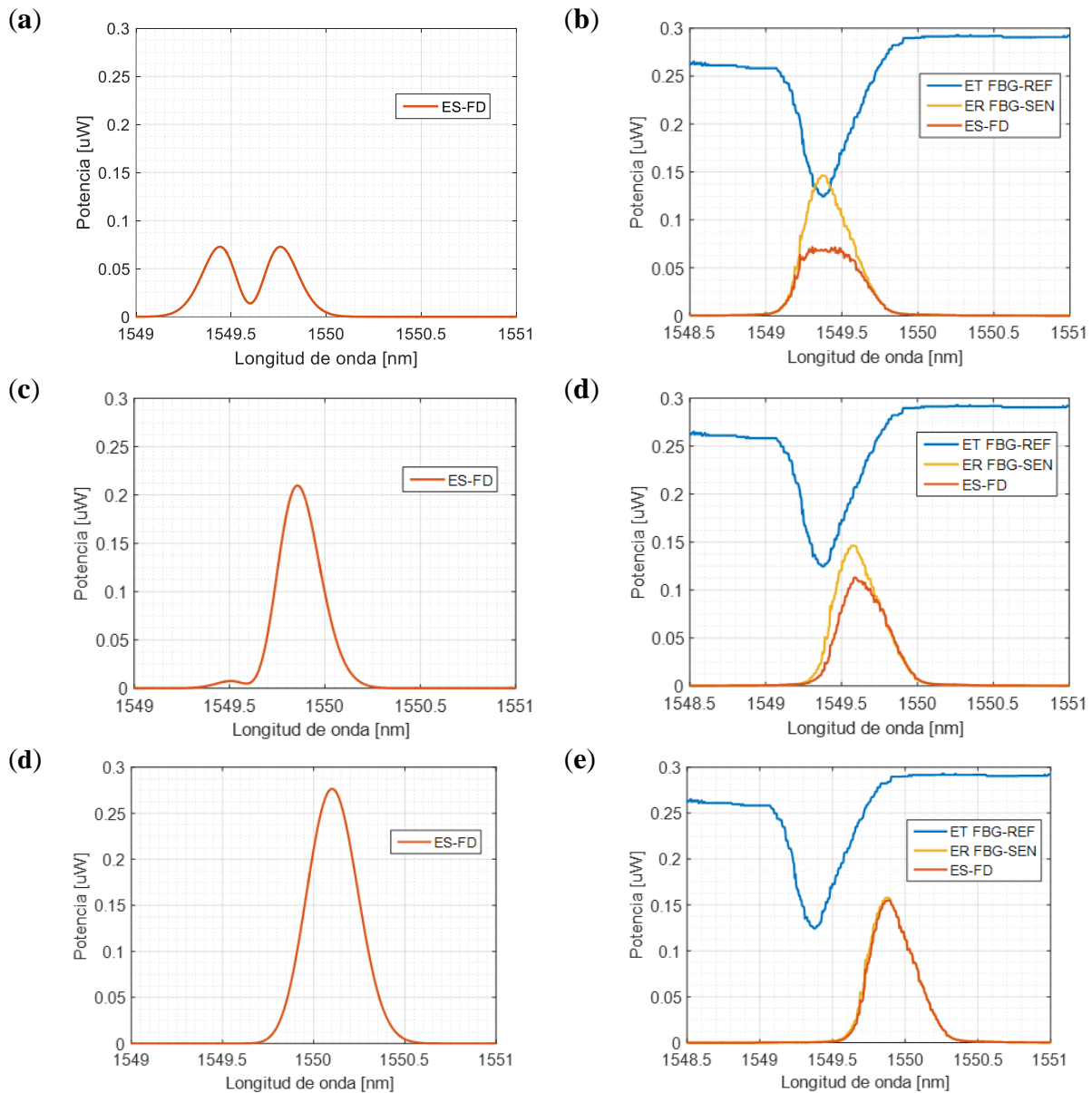


Fig. 3-15 Espectros ópticos de dos rejillas de Bragg en la técnica de superposición espectral. Las figuras del lado izquierdo corresponden a resultados simulados y las del lado derecho son resultados experimentales.

3 Descripción y desarrollo del dispositivo de sensado - Acelerómetro

En la Fig. 3-16 se muestran resultados experimentales para la técnica de superposición espectral de FBGs, para este experimento se utilizaron las tres rejillas del acelerómetro biaxial: FBG_{REF} , FBG_{SEN_X} y FBG_{SEN_Y} , ver Fig. 3-8.

Para la realización de este experimento se mantuvo fija la longitud Bragg de las rejillas de sensado y se desplazó la longitud Bragg de la rejilla de referencia por medio de tensión. En contraste, cuando las rejillas están montadas en el acelerómetro, la longitud Bragg de la FBG_{REF} se mantiene fija mientras que la longitud Bragg de las FBGs de sensado es la que se desplaza, pero el efecto de la superposición es el mismo sin importar cuál de las rejillas es la que se desplace, lo importante es el desplazamiento relativo. El eje horizontal de la Fig. 3-16 representa la longitud de Bragg de la rejilla de referencia. La Fig. 3-16(a-b) corresponde a la superposición de las rejillas FBG_{REF} y FBG_{SEN_X} , la Fig. 3-16(c-d) corresponde a la superposición de las rejillas FBG_{REF} y FBG_{SEN_Y} . El eje vertical de las gráficas es la potencia de la luz que recibe el fotodetector P_D como función de la longitud Bragg de la rejilla de referencia.

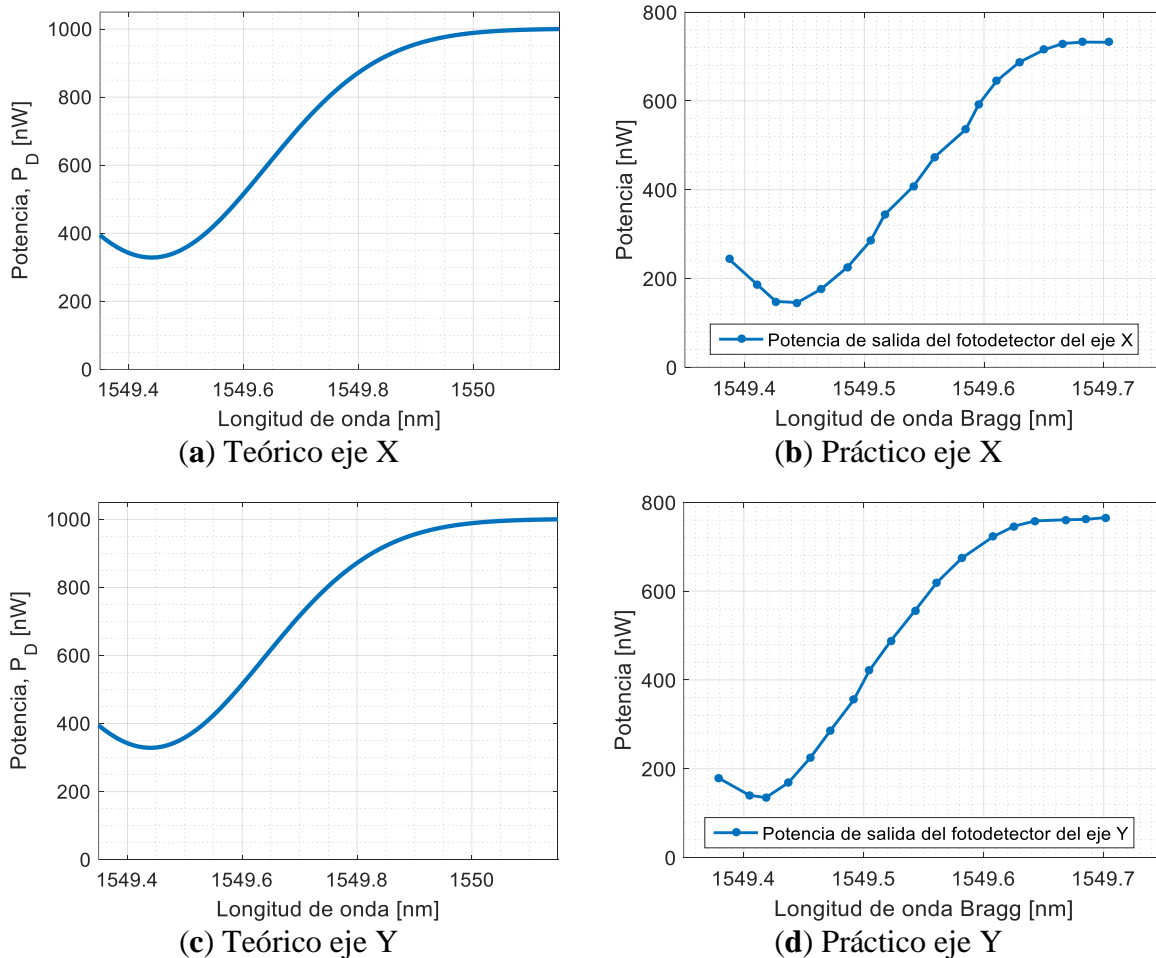


Fig. 3-16 Potencia P_D recibida por los fotodetectores de los ejes X e Y en función del desplazamiento de la longitud Bragg de la rejilla de referencia.

3.6 Caracterización de los principales elementos in situ

Hay un rango para el cual la potencia óptica recibida por el fotodetector es proporcional a la variación de la longitud Bragg, este es el rango en el que nos interesa trabajar, para el caso de la FBG_{SEN_X} es de 185 pm y para el caso de la FBG_{SEN_Y} es de 165 pm. Los resultados de esta sección y los de la sección 3.6.1.2 se utilizan a continuación para calcular la masa inercial del acelerómetro. El rango de medición deseado es de $\pm 5 \text{ m/s}^2$, la sensibilidad de la FBG a la fuerza resultó en 1.372 nm/N y el desplazamiento máximo de la longitud Bragg de la rejilla de referencia, considerando el peor caso, es de 165 pm. Para lograr un desplazamiento de 165 pm se necesita una fuerza de $(165 \text{ pm}) / (1372 \text{ pm/N}) = 0.12 \text{ N}$. La masa inercial necesaria sería de $(0.12 \text{ N}) / (10 \text{ m/s}^2) = 0.012 \text{ Kg}$.

3.6.3. Calibración del sensor de temperatura

La temperatura es uno de los parámetros que afectan las mediciones de cualquier dispositivo, por eso en la configuración experimental de nuestro trabajo se monitorea la temperatura utilizando dos sensores digitales DHT22. Las características de estos sensores son [44]:

- Rango de medición de temperatura: -40 a 80 °C
- Precisión: $\pm 0.5 \text{ °C}$
- Resolución: 0.1 °C
- Repetibilidad: $\pm 0.2 \text{ °C}$

Las mediciones de estos sensores se compararon contra los de otro sensor de temperatura modelo RHT10 que tiene un rango de medición de temperatura de -40 a 70 °C, resolución de 0.1 °C, y precisión de $\pm 1.0 \text{ °C}$ [45]. Las lecturas se realizaron durante un periodo de 20 horas con intervalos de una hora. Los resultados se muestran en la Fig. 3-17. Ambos sensores midieron prácticamente lo mismo, con una diferencia máxima de 0.1 °C en algunos puntos de medición, por lo anterior se puede decir que las mediciones de los sensores DHT22 son confiables.

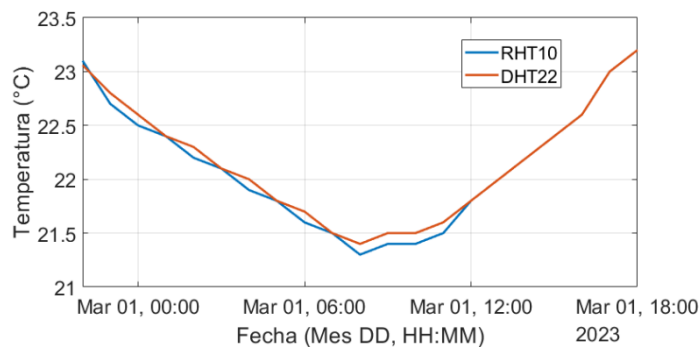


Fig. 3-17 Comparación de las mediciones temperatura entre los sensores DHT22 y RHT10. La diferencia máxima de las lecturas es de 0.1 °C.

3.6.4. Módulo de Young de barra de Nylon

En la implementación del acelerómetro biaxial se utilizó una barra de Nylon que sostiene a la masa inercial. Como esta barra forma parte de la estructura, se necesita conocer su módulo de Young para determinar de forma teórica y en la simulación la respuesta del

3 Descripción y desarrollo del dispositivo de sensado - Acelerómetro

sensor. Se realizó un experimento cuya configuración se muestra en la Fig. 3-18(a) y los resultados se muestran en la Fig. 3-18(b).

Una barra de nylon de 260 mm de largo y 13 mm de diámetro se fija firmemente a una base de metal, a la barra se le hace un agujero transversal a una altura de 255 mm por donde se pasa un alambre de metal que se conecta a una báscula digital marca Rhino con capacidad de 20 kg y una resolución de 1×10^{-2} kg. Las lecturas de la báscula se convierten a unidades de fuerza en Newtons aplicando el factor 9.81. Por el otro lado de la báscula se conecta un alambre hacia un tornillo espárrago que pasa a través de un poste vertical rígido fijo y se agrega una tuerca que al girarla ejerce tensión en la barra de nylon ocasionando una flexión en la misma. El desplazamiento de la barra en el extremo superior se mide con una regla graduada con una escala mínima de 1 mm. La barra se flexiona desde un milímetro hasta diez milímetros con pasos de un milímetro y para cada desplazamiento se toma la lectura de la báscula, el experimento se repite cinco veces.

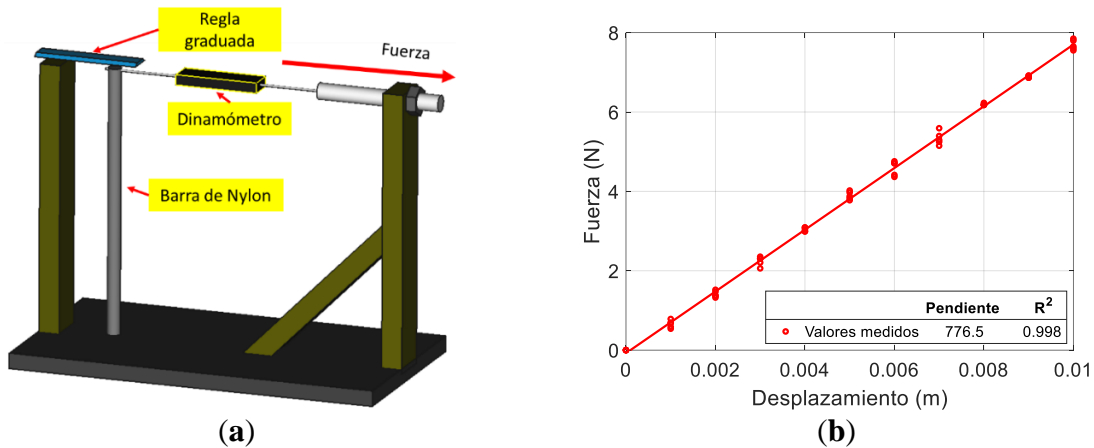


Fig. 3-18 Experimento para determinar el módulo de Young de la barra de nylon a partir de su rigidez a la flexión: (a) Configuración experimental, (b) resultado con rigidez igual a (776.5 ± 16.5) N/m.

Posteriormente, los datos se introducen en Matlab para determinar la pendiente de las mediciones, relacionando la fuerza aplicada a la flexión lateral de la barra, y la incertidumbre de la medición, para ello se utilizó un método de Monte Carlo y la implementación del código para el programa Matlab por [46]. Este programa, además de los datos de la variable independiente y dependiente, acepta como entrada las incertidumbres de las mediciones para ambas variables [47]. La incertidumbre para los valores del desplazamiento se considera de 0.5 mm y para la masa es de 5×10^{-3} kg o su equivalente de 0.049 N, en ambos casos es la mitad de la mínima escala de medición de la regla graduada y de la báscula.

Como resultado se obtiene una pendiente, que es la rigidez a la flexión de la barra de nylon, $k_v = (776.5 \pm 16.5)$ N/m. El módulo de Young E_s de la barra se determina con

$$E_s = \frac{k_v L_b^3}{3I}, \quad (3.11)$$

donde L_b es la distancia desde el punto de fijación de la barra en la base hasta el punto donde se aplica la fuerza en la parte superior, $I = \frac{\pi}{64} d_b^4$ es el segundo momento de inercia para una barra cilíndrica, d_b es el diámetro de la barra cilíndrica.

Para calcular E_s primero se calcula I , el diámetro de la barra de nylon se midió con un vernier con resolución de 0.1 mm, por eso la incertidumbre de d_b se considera de 0.05 mm. Después de calcular E_s y su incertidumbre, por medio de las fórmulas de propagación de incertidumbre [48], se determinó $E_s = (3.06 \pm 0.08)$ GPa.

3.7. Etapa electrónica

Siempre que se desarrolla un sensor, éste es parte de un sistema más grande que puede incluir, entre otros, acondicionadores de señal y adquisición de datos [23]. Dado que se requiere que el acelerómetro desarrollado en este trabajo sea capaz de leer datos de forma permanente y que el dispositivo sea portable, para la implementación del acelerómetro triaxial se hizo necesario agregar, aparte de la etapa de acondicionamiento de la señal para visualizar la respuesta del sensor en voltaje, también una etapa de adquisición, visualización y almacenamiento de datos. Para ello se diseñó un sistema que consiste en convertidores analógico-digital y una computadora Raspberry Pi.

Las salidas del acelerómetro que contienen la información de la aceleración en el dispositivo triaxial son tres señales ópticas, una para cada eje del acelerómetro. Derivado de la estructura del acelerómetro y de los esquemas ópticos, la información de la aceleración está codificada en la variación de la potencia óptica, Ec. (2.23), la potencia óptica se convierte en corriente eléctrica por medio de un fotodetector (PD-A-25, oeMarket) con ancho de banda de 2.5 GHz y responsividad de 0.9 A/W a 1550 nm, posteriormente se convierte a voltaje usando un circuito de transimpedancia, ver Fig. A-1, posteriormente las señales se filtran y se amplifican con un circuito integrado AD620, las señales se pasan de nuevo por un filtro pasivo paso-bajas y se envían al convertidor analógico-digital.

3.7.1. Convertidor analógico digital

El modelo de convertidor analógico-digital (Analog-to-digital converter, ADC, por sus siglas en inglés) que se utiliza es el ADS1115 mismo que se muestra en la Fig. 3-19(a), es un convertidor de cuatro canales, 16 bits, con tasa de muestreo programable desde 8 hasta 860 muestras por segundo (Samples per second, SPS, por sus siglas en inglés), comunicación I2C e incluye un amplificador de ganancia programable (Programmable-gain amplifier, PGA, por sus siglas en inglés). El ADC se puede alimentar con 3.3 V o 5 V, aquí se alimenta con 3.3 V porque los pines de entrada digital de la Raspberry trabajan a este nivel de voltaje. El PGA se configuró a un rango de entrada de voltaje de ± 4.096 V, con estos parámetros la resolución del ADC es de 125 μ V. La tasa de muestreo se estableció en 860 SPS. En el sistema completo se utilizan dos ADCs, uno para leer los tres canales del acelerómetro óptico y otro para leer los tres canales del acelerómetro capacitivo.

3.7.2. Raspberry Pi

Existen sistemas de adquisición de datos comerciales que son confiables pero que en ciertos casos tienen un alto costo y no son adecuados para su uso en unidades individuales, por eso, en los últimos años han aumentado las investigaciones por la búsqueda de sistemas más rentables e igual de confiables [49]. Muchos de estos sistemas están basados en computadoras de placa simple (Single-board computer, SBC, por sus siglas en inglés) que son de bajo costo, del tamaño de una tarjeta de crédito, y tiene todas las funciones de una computadora lo que las hace adecuadas para dispositivos portátiles.

Una de las SBC más utilizadas es la Raspberry Pi en proyectos tales como transcodificación de video para transmisión en directo [50], sistemas para el cuidado de la salud [51], sistemas de monitoreo del clima [49], pagos por dispositivos móviles [52], monitoreo de cantidades eléctricas [53], inspección de máquinas eléctricas [54], clasificación de basura [55], entre muchos otros [56]. La Raspberry Pi 3 B+ que se utilizó en este trabajo se muestra en la Fig. 3-19(b), tiene un procesador Broadcom BCM2837B0 de 64 bits, cuatro núcleos a 1.4 GHz, 1 Gb de SDRAM, tarjeta de gráficos integrada que nos permite mostrar gráficas en tiempo real al conectarle un monitor en su puerto HDMI. Posee 40 pines de entrada/salida de propósito general que nos permiten comunicar a los dos ADCs utilizando los pines marcados con “I2C”.

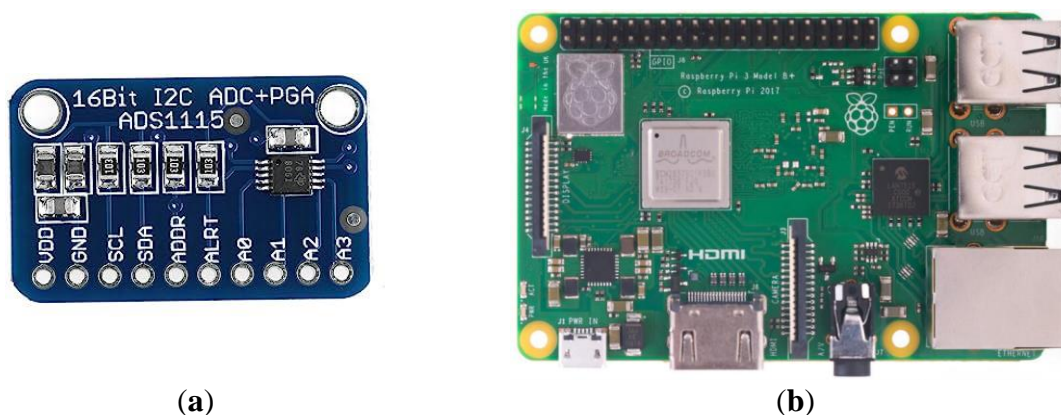


Fig. 3-19 Dispositivos utilizados en el sistema de adquisición de datos: (a) Convertidor analógico-digital, (b) Raspberry Pi 3 B+.

En la Fig. 3-20 se muestra el diagrama general de la etapa electrónica en la que además de la adquisición de los datos del acelerómetro óptico también se adquieren y almacenan los datos del arreglo de acelerómetros capacitivos, de un sensor de temperatura interno, que se encuentra dentro de la caja que protege al acelerómetro, ver Fig. 3-21, y de un sensor de temperatura externo al sensor que mide la temperatura ambiente.

Se elaboró una caja de 13.5 cm × 11.7 cm × 11.5 cm de largo, ancho y alto respectivamente para proteger la estructura del acelerómetro y las fibras ópticas. La base de esta caja está elaborada en aluminio de 3.6 mm de espesor, tres de sus paredes están elaboradas en acrílico de 6 mm de espesor y las otras tres paredes en aluminio de 2.0 mm de espesor. Es una caja sólida que permite que la transmisión de la vibración del objeto hacia el acelerómetro sea lo más directa posible.

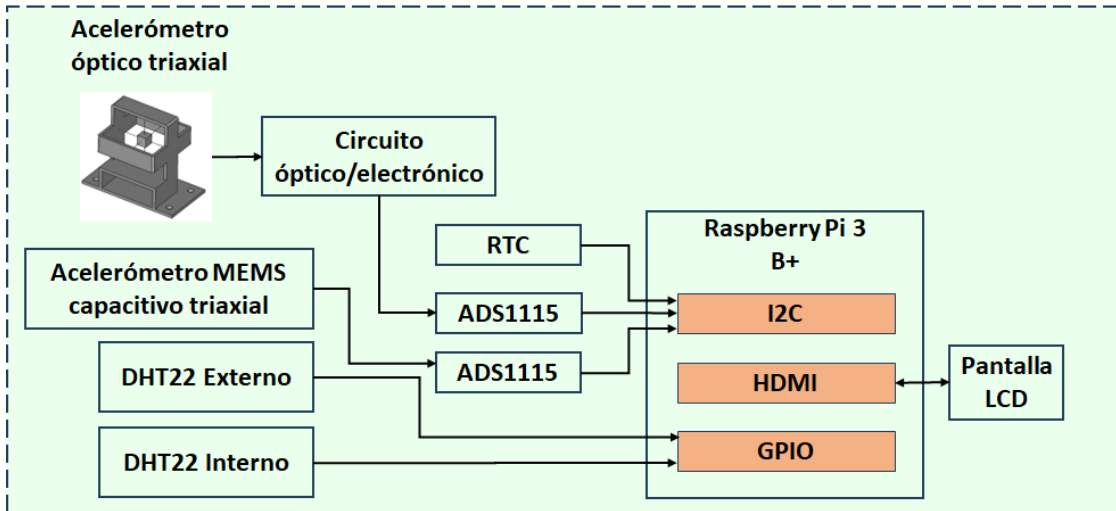


Fig. 3-20 Esquema del sistema de adquisición de datos para el acelerómetro óptico triaxial, el acelerómetro de referencia y dos sensores de temperatura. RTC: Reloj en tiempo real (Real-time clock, RTC, por sus siglas en inglés) modelo DS3231. GPIO: Pines de propósito general de entrada-salida (General purpose Input/Output, GPIO, por sus siglas en inglés).

El sistema completo que incluye el acelerómetro óptico y el sistema de adquisición se muestra en la Fig. 3-21. La fuente de luz superluminiscente a 1550 nm (SLD1005S, Thorlabs) alimenta al acelerómetro óptico, las señales de salida del acelerómetro se transportan por fibras ópticas monomodales al circuito óptico/electrónico que se encuentra dentro de una caja de acrílico. El DS3231 es un reloj de tiempo real que mantiene la fecha en caso de pérdida de energía de la Raspberry. La caja de acrílico se elaboró para proteger a los elementos ópticos utilizados en nuestro sensor, al circuito electrónico, a la tarjeta de los ADCs y a la Raspberry Pi. Además, esta caja permite agregar conectores para todas las señales ópticas y las señales eléctricas, con eso se logra transportar el sistema de forma más fácil y segura para evitar algún daño a las fibras ópticas o a algún cable, se desconectan todos los cables y las fibras ópticas y se transporta cada parte por separado.

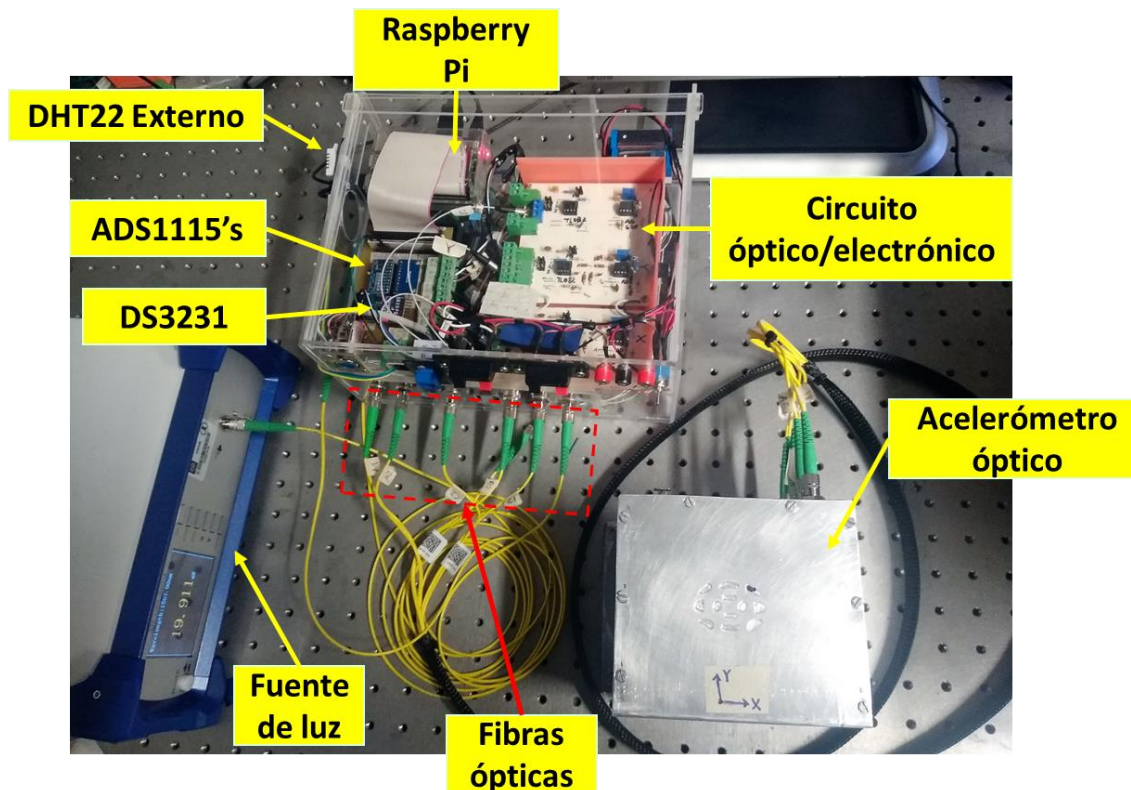


Fig. 3-21 Configuración experimental del acelerómetro óptico triaxial incluyendo la fuente de luz SFS, el acelerómetro óptico, el circuito óptico/electrónico, los ADCs modelo ADS1115 y la Raspberry Pi.

3.8. Desarrollo de los programas

El desarrollo de los programas para leer, almacenar y visualizar los datos se realizó en Python. Se desarrollaron 5 programas en total, uno para leer y almacenar los datos de los acelerómetros con seis canales de lectura, uno para leer y almacenar los datos del sensor de temperatura interno, uno para los datos del sensor de temperatura externo, uno para visualizar los datos en forma de gráficas en tiempo real y el último para visualizar las gráficas de los datos históricos. En la Fig. 3-22 se muestran los diagramas de flujo de los tres programas principales. El diagrama de la Fig. 3-22(a) inicia realizando la conexión a la base de datos, si la conexión falla el programa termina. Si la conexión es exitosa, se leen los datos correspondientes a los ejes X, Y y Z del acelerómetro óptico, posteriormente se leen los datos de los ejes X, Y y Z del arreglo de acelerómetros capacitivos. Se agrega la fecha en formato “datetime” y finalmente los 7 datos se guardan en la tarjeta de memoria de la Raspberry Pi. Los programas para guardar los datos de los sensores en temperatura tienen un flujo similar, solo cambian los datos que en ese caso provienen de los pines G22 y G27 de la Raspberry Pi para el sensor de temperatura externo e interno, respectivamente. La base de datos utilizada es MariaDB de la Fundación MariaDB que tiene una Licencia Pública General (General public licence, GPL, por sus siglas en inglés). El formato para la fecha “datetime” permite manipular la fecha y la hora con una resolución de hasta un microsegundo, esta resolución es más que suficiente para guardar los datos de los acelerómetros.

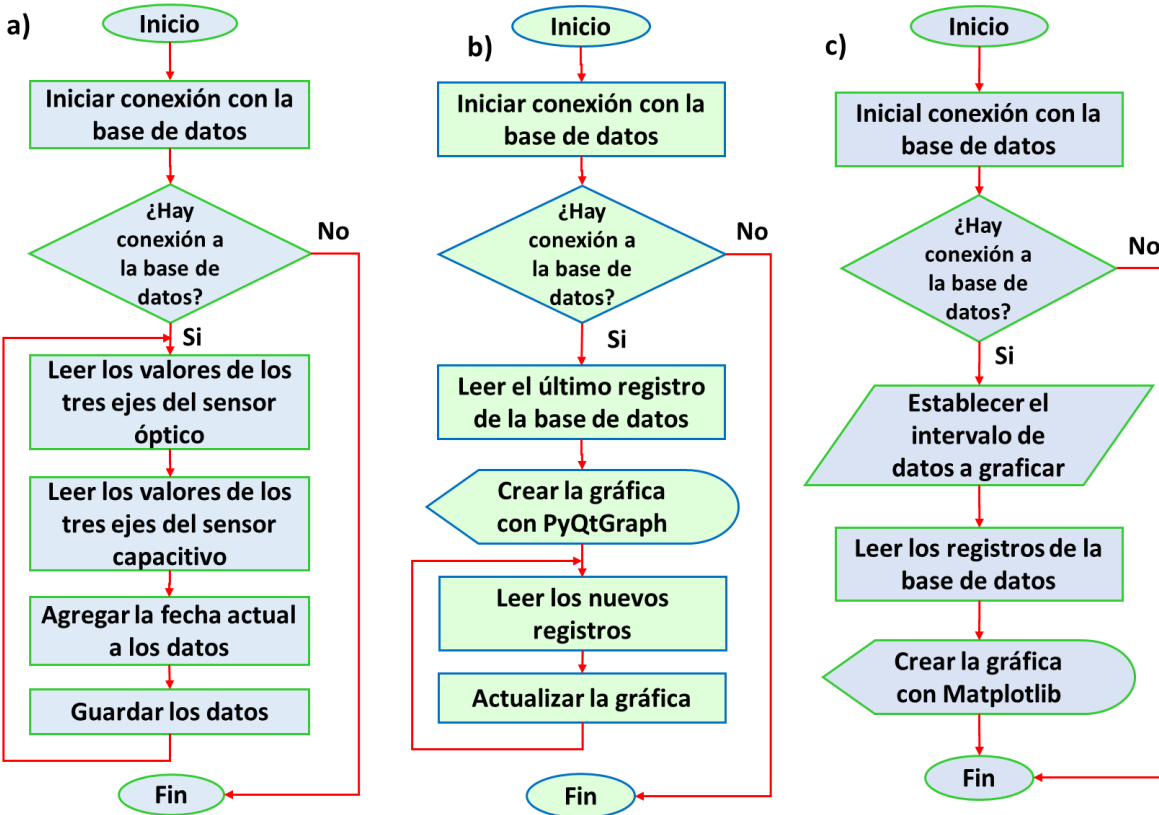


Fig. 3-22 Diagramas de flujo de: (a) Programa para almacenar datos, (b) programa para visualizar los datos en tiempo real y (c) programa para visualizar el histórico de los datos.

El diagrama de flujo de la Fig. 3-22(b) se usa para generar la gráfica en tiempo real, se puede elegir visualizar los datos de los tres ejes de los dos acelerómetros, capacitivo y óptico, o de uno solo. Para este programa se utiliza la librería PyQtgraph que es una librería especializada de Python para actualizar datos en tiempo real sin retraso. Asimismo, se puede configurar el número de los últimos registros a visualizar. El programa de la Fig. 3-22(c) utiliza la librería de Matplotlib que permite crear figuras interactivas a las que se le puede cambiar la escala, tanto vertical como horizontal, etc. En este programa se establece el intervalo de tiempo que se quiere graficar.

Los tres programas para guardar los datos corren permanentemente de forma paralela en la Raspberry y los programas para visualización solo corren cuando se requiere ver las gráficas de los datos. Los datos almacenados en la Raspberry se respaldan de su tarjeta de memoria a un disco de estado sólido (Solid state drive, SSD, por sus siglas en inglés) con capacidad de 2 Tb en intervalos de dos semanas.

3 Descripción y desarrollo del dispositivo de sensado - Acelerómetro

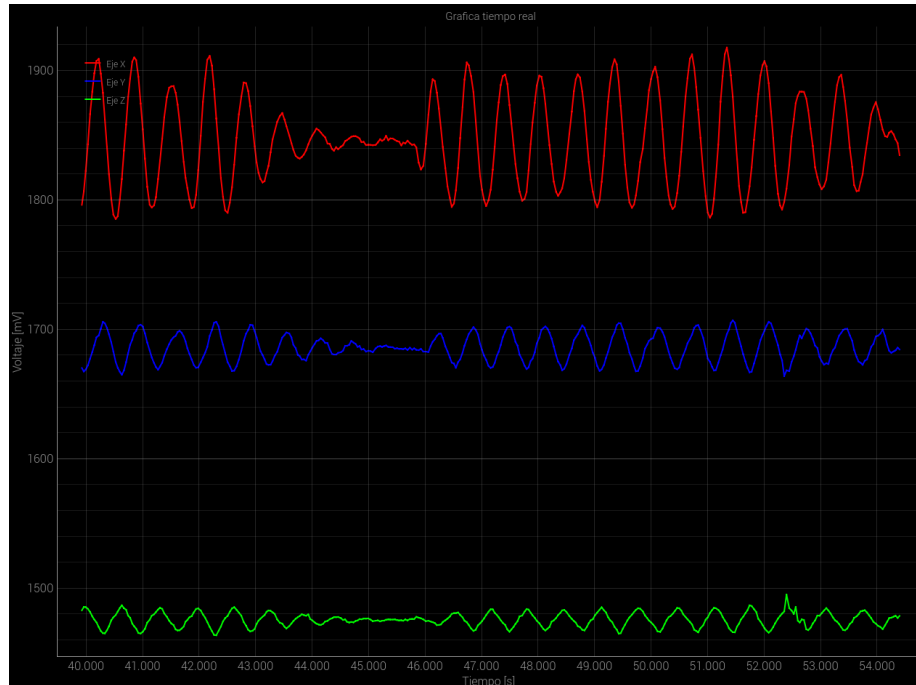


Fig. 3-23 Captura de pantalla de las gráficas generadas en tiempo real correspondiente de los ejes X, Y y Z (de arriba hacia abajo) del acelerómetro óptico.

La frecuencia de muestreo alcanzada con este sistema de adquisición varía dependiendo del número de canales que se lean. La frecuencia alcanzada cuando se leen seis canales, tres del acelerómetro óptico y tres del capacitivo, es de 25 Hz. Cuando se leen solo los tres canales del acelerómetro óptico la frecuencia de muestreo sube hasta los 80 Hz, hay formas de aumentar la frecuencia de muestreo, pero se requiere el uso de un núcleo o “kernel” modificado [57] o una segunda Raspberry [58], por ejemplo. En nuestro sistema no hay necesidad de aumentar la frecuencia de muestreo porque el rango de frecuencias de los movimientos que se quieren medir es de 0.5 – 20 Hz, por tanto, con una frecuencia de muestreo de 80 Hz es más que suficiente, se cumple el criterio de Nyquist referente a la frecuencia de muestreo a la vez que no se genera demasiada información con el paso del tiempo. El objetivo de medir los seis canales es para la caracterización de nuestro acelerómetro al comparar sus mediciones con las del sensor capacitivo. Esta caracterización está limitada a una frecuencia de 12.5 Hz, por el criterio de Nyquist, que es funcional. Después de realizar la caracterización solo se adquieren los datos del sensor óptico.

En la Fig. 3-23 se muestra una captura de pantalla de las gráficas en tiempo real y en la figura Fig. 3-24 una captura de pantalla de las gráficas de datos históricos, dichas gráficas se visualizan conectando un monitor al puerto HDMI de la Raspberry.

El eje vertical de las gráficas se muestra en unidades de voltaje, pero después de que se determina la sensibilidad en cada eje del acelerómetro, los datos se visualizan en unidades de aceleración.

3.8 Desarrollo de los programas

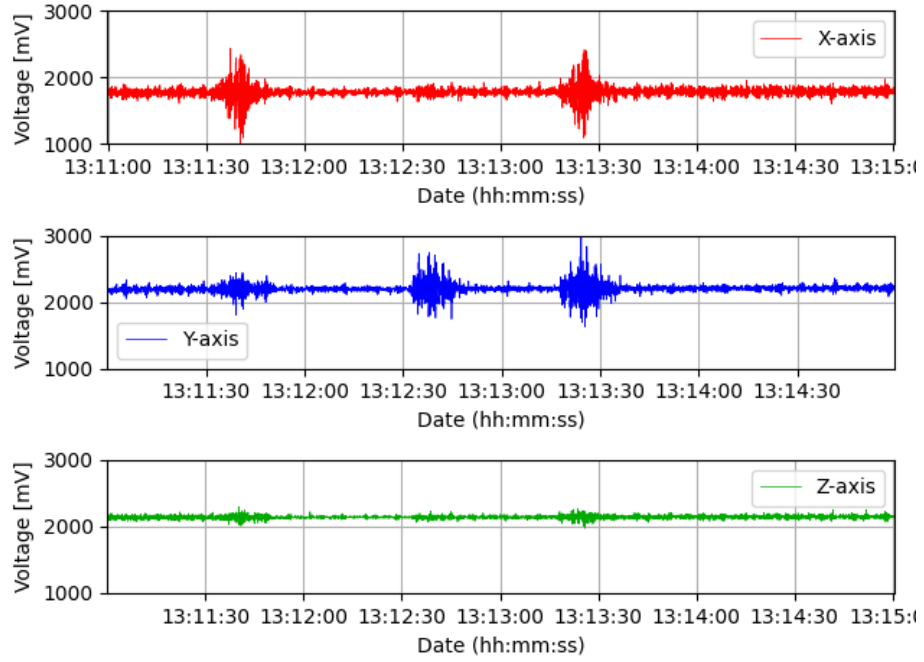


Fig. 3-24 Captura de las gráficas generadas para datos históricos del acelerómetro óptico.

4. Resultados

En esta sección se describen los resultados de las simulaciones y los resultados experimentales de los acelerómetros en cuanto a su estructura, sensibilidad a la aceleración, sensibilidad a la temperatura, frecuencia de resonancia, ruido eléctrico y el mínimo de aceleración detectable.

4.1. Acelerómetro biaxial

Se analizaron las características de un acelerómetro biaxial para tener una mejor comprensión del funcionamiento del esquema óptico mejorado que se propone en este trabajo para posteriormente realizar el diseño del acelerómetro triaxial.

4.1.1. Estructura

En un principio la estructura para el acelerómetro biaxial, desarrollado en [22] consistía en una masa de prueba o inercial sostenida por una placa tipo solera metálica flexible, el acelerómetro construido de esa forma era muy sensible a los movimientos de la estructura, pero la sensibilidad en cada uno de los ejes era diferente porque una placa tiene movimiento preferencial en un eje. Para solventar el inconveniente se cambió dicha placa por una barra circular de Nylon de 13 mm de diámetro, ver Fig. 4-1, dado que se desconocían las propiedades de ese material en específico se realizó el experimento descrito en la sección 3.6.4 para determinar su módulo de Young con resultado de (3.06 ± 0.08) GPa. También se utilizaron nuevas rejillas de Bragg porque las que usaron en [22] estaban centradas en una longitud de onda de 1520 nm, pero la fuente de luz que alimenta al sensor está centrada en 1550 nm con un ancho de banda de 50 nm, esto implicaba que la potencia de la luz que se reflejaba de la rejilla, a 1520 nm, era muy débil. En cambio, la longitud Bragg de las nuevas rejillas, cuyas características se describen en 3.6.1 es de 1550 nm y por tanto sus espectros coinciden con la emisión máxima de la fuente de luz.

Las dimensiones finales del acelerómetro biaxial son 126 mm de ancho por 130 mm de largo y 135 mm de altura, en la Fig. 4-1 se muestra la implementación del prototipo cuyo esquema se mostró en la Fig. 3-5. En este prototipo, la base es una placa de aluminio que se reforzó en la parte inferior con perfil de aluminio T de $\frac{3}{4}$, sobre la base se fijan los postes y la barra flexible con tornillos firmemente apretados. Las fibras ópticas solo se sujetan a presión por medio de las pinzas para fibra óptica, esto ocasiona que el dispositivo se descalibre

fácilmente con el paso de los días, pero sirve como base para estudiar sus características y posteriormente diseñar el dispositivo triaxial.

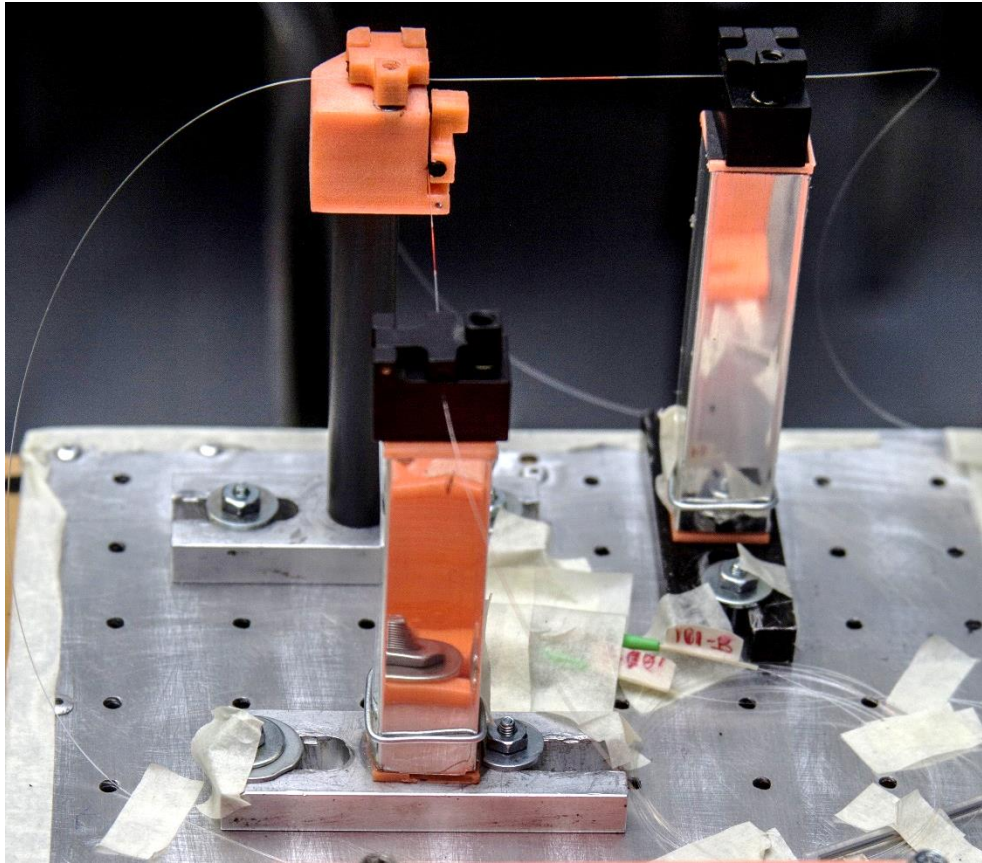


Fig. 4-1 Implementación del acelerómetro biaxial con una barra flexible cilíndrica de nylon sobre la que se sostiene su masa inercial (esquema mostrado en la Fig. 3-5).

4.1.2. Simulación

Para la creación del modelo 3D de la estructura, construir el ensamblaje de sus partes y realizar el análisis de frecuencia del acelerómetro biaxial se utilizó el software FreeCAD. Posteriormente los resultados de la simulación se visualizaron con el software Paraview. La simulación incluye a la barra flexible sobre la cual se monta la masa inercial, las fibras ópticas de los ejes X e Y, y la masa inercial, ver Fig. 3-5. La masa inercial se imprimió en una impresora 3D en material PLA. La barra flexible es de material nylon (poliamida 6/6), que es un material duradero [59]. Las demás partes: la base del sensor, los postes fijos y las pinzas para fibra óptica están hechas de aluminio, excepto la pinza que sujeta a ambas fibras a la vez y que al mismo tiempo es la masa inercial. Los parámetros utilizados en la simulación se resumen en la Tabla 4-1.

Como resultado de la simulación, el primer modo de resonancia se encuentra a 171.6 Hz y 172.6 Hz para el eje X e Y, respectivamente. En la Fig. 4-2 se muestran los desplazamientos normalizados del primer modo de resonancia, en ambos casos el desplazamiento máximo se ubica en el centro del claro de la fibra óptica, justo en la ubicación de la rejilla Bragg.

4 Resultados

Tabla 4-1 Propiedades básicas de los elementos del acelerómetro biaxial.

Símbolo	Parámetro	Valor
E_s	Módulo de Young de la barra flexible cilíndrica	2.93 GPa
μ	Razón de Poisson de la barra flexible	0.39
d_b	Diámetro de la barra flexible	13.0 mm
L_s	Longitud de la barra cilíndrica	91.1 mm
E_{Al}	Módulo de Young del aluminio	70 GPa
E_f	Módulo de Young de la fibra con recubrimiento de acrilato [60]	16.56 GPa
d	Diámetro de la fibra con recubrimiento de acrilato	0.25 mm
m	Masa inercial	22.88 g
L_x	Distancia entre los puntos de fijación del eje X	55.9 mm
L_y	Distancia entre los puntos de fijación del eje Y	56.2 mm

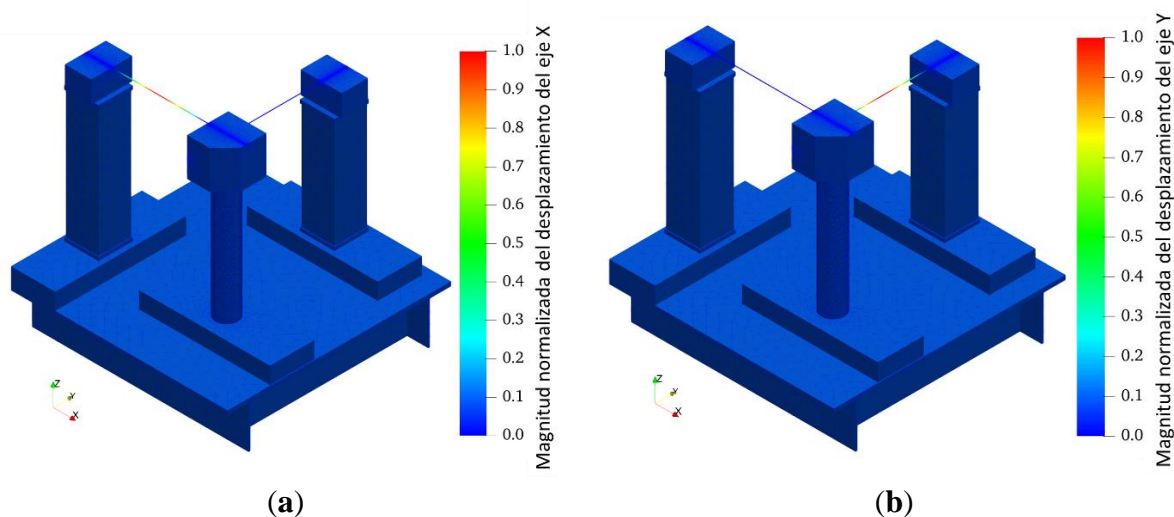


Fig. 4-2 Forma del primer modo de resonancia del acelerómetro, los desplazamientos se muestran normalizados, (a) eje X, (b) eje Y.

4.1.3. Sensibilidad a la aceleración

Se realizó una caracterización dinámica al prototipo utilizando la mesa de vibración descrita en la sección 3.1.2 en un rango de frecuencias desde 0.5 – 50 Hz y desde 0.02 hasta 8.5 m/s² de aceleración pico con un movimiento cuasi-senoidal con respecto al tiempo, se utilizó como referencia el arreglo de acelerómetros capacitivos.

Se tomaron los datos de salida del sensor óptico y del capacitivo utilizando un osciloscopio y se procesaron en una computadora para determinar la sensibilidad del dispositivo óptico a las diferentes frecuencias. La sensibilidad teórica utilizando la Ec. (3.6) con un valor para el coeficiente fotoelástico $\rho_e = 0.22$ y una longitud de Bragg $\lambda_B = 1.55 \mu\text{m}$ resulta en 16 pm/(m/s²). El ancho de banda de las rejillas que se utilizan en este trabajo es de 0.2 nm, en la sección 3.6.2 se vio que el rango de trabajo lineal del cambio de la longitud Bragg de las rejillas es de 165 pm, al combinar la sensibilidad de 16 pm/(m/s²) con el rango de 165 pm se obtiene un rango de trabajo del sensor en amplitud de aceleración de $\approx \pm 5 \text{ m/s}^2$.

En este trabajo, no se mide el cambio de la longitud de Bragg de las rejillas como señal de salida del sensor, sino que se mide la potencia óptica que llega a los fotodetectores y que, por medio de la etapa electrónica, las señales de salida están dadas en unidades de voltaje. Después de obtener las mediciones de la calibración del acelerómetro se obtiene la gráfica de sensibilidad del sensor mostrada en la Fig. 4-3 obtenida como función de la frecuencia, también se muestra una ampliificación de la sensibilidad en el rango de interés (0.5 – 20 Hz), este resultado indica que se tiene una sensibilidad casi constante en el rango de interés con un valor promedio de 0.735 y 0.684 $V/(m/s^2)$ para el eje X y el eje Y, respectivamente.

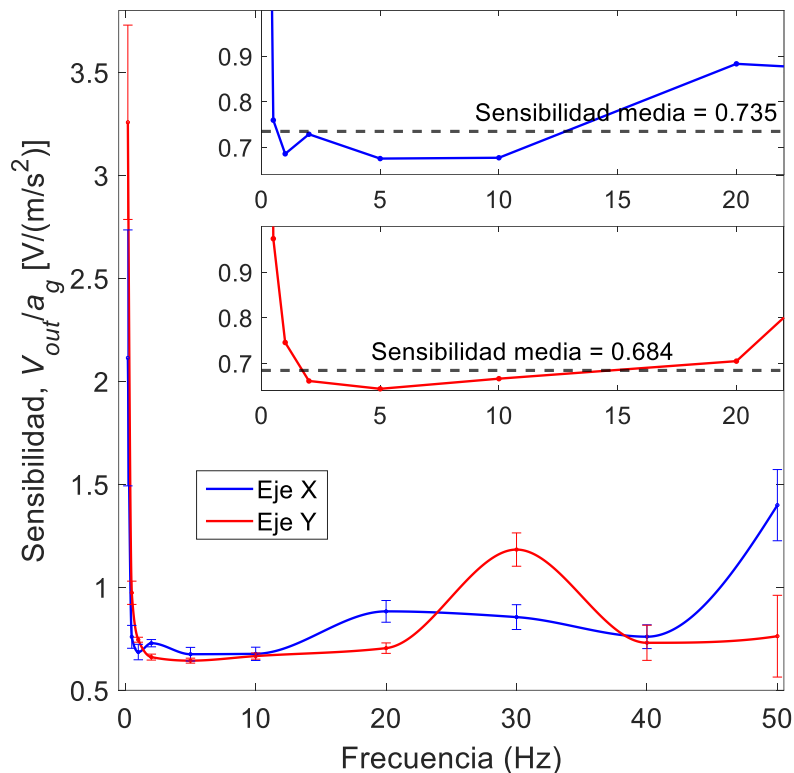


Fig. 4-3 Sensibilidad del prototipo de sensor óptico como función de la frecuencia. En los insertos se muestra una ampliificación de la sensibilidad en el rango de interés, de 0.5 – 20 Hz.

En la Fig. 4-4 se muestra una comparación de las señales de salida del acelerómetro óptico y del capacitivo para una vibración de entrada arbitraria a 1.6 Hz junto con sus respectivos espectros en frecuencia. La frecuencia detectada es la misma en ambos dispositivos, esto demuestra la buena respuesta del sensor óptico. La forma de onda de la señal de salida también es la misma, la diferencia está en las amplitudes de las señales porque el acelerómetro óptico posee mayor sensibilidad que el acelerómetro capacitivo. Esta vibración de entrada se generó al mover la mesa óptica, sobre la cual se encontraba montado el acelerómetro, de forma repetitiva, primero en la dirección del eje X y después en la dirección del eje Y.

4 Resultados

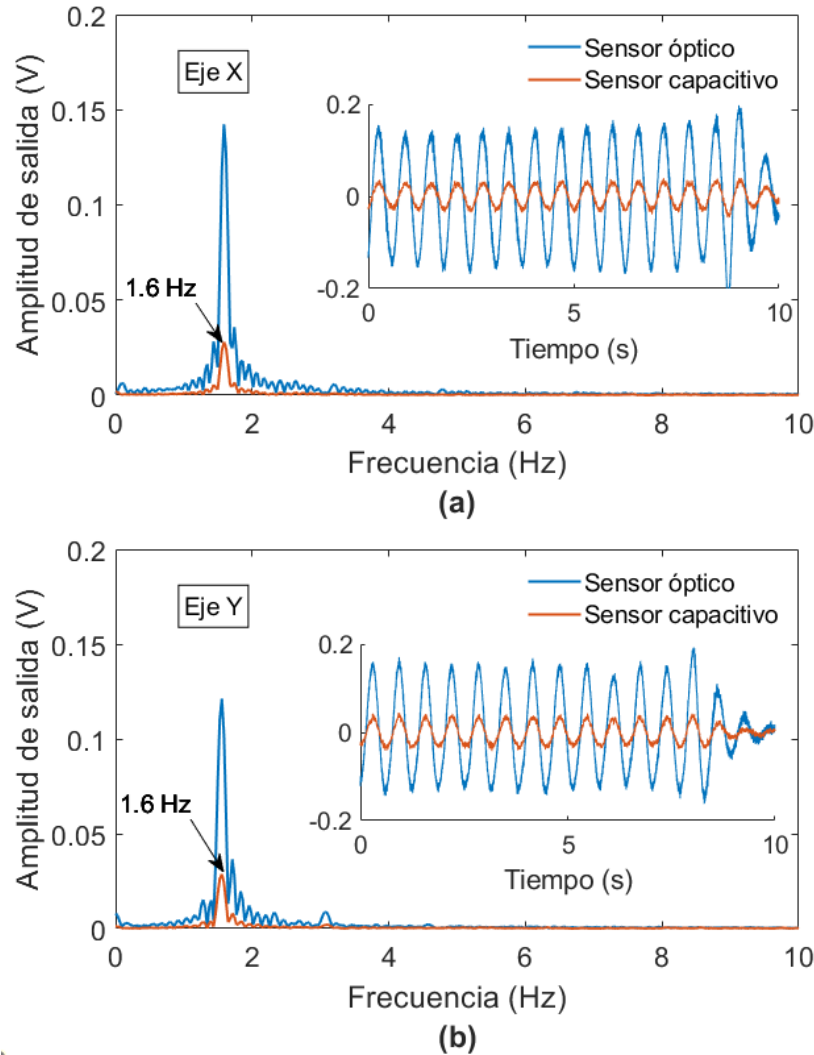


Fig. 4-4 Amplitud de salida en tiempo y en frecuencia del acelerómetro óptico y del acelerómetro capacitivo para una aceleración pico de entrada de 0.25 m/s^2 a 1.6 Hz : (a) Eje X, (b) eje Y.

4.1.4. Linealidad del acelerómetro

Otra de las características que se determinó para el acelerómetro biaxial fue su linealidad. La amplitud de la señal de salida del acelerómetro se muestra en la Fig. 4-5 donde se grafica el voltaje de salida del dispositivo con respecto a la aceleración de entrada aplicada para diferentes frecuencias de excitación (2 , 5 y 10 Hz). Para determinar la linealidad del sensor se mantuvo fija cada una de las frecuencias de excitación y se fue incrementando el valor de la aceleración. Los marcadores muestran los valores obtenidos experimentalmente y las líneas rectas son las líneas de tendencia, los valores del coeficiente de correlación R^2 son de 0.985 y 0.991 . La sensibilidad específica para las frecuencias de 2 , 5 y 10 Hz son de 0.728 , 0.675 y $0.677 \text{ V/(m/s}^2)$ para el eje X, y 0.661 , 0.664 y $0.666 \text{ V/(m/s}^2)$ para el eje Y.

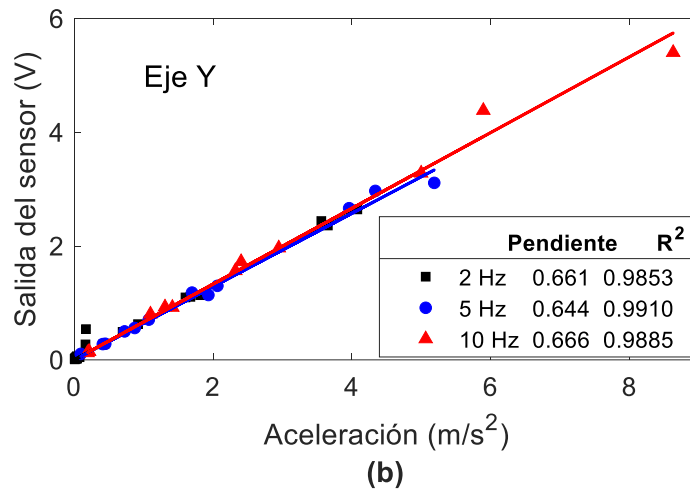
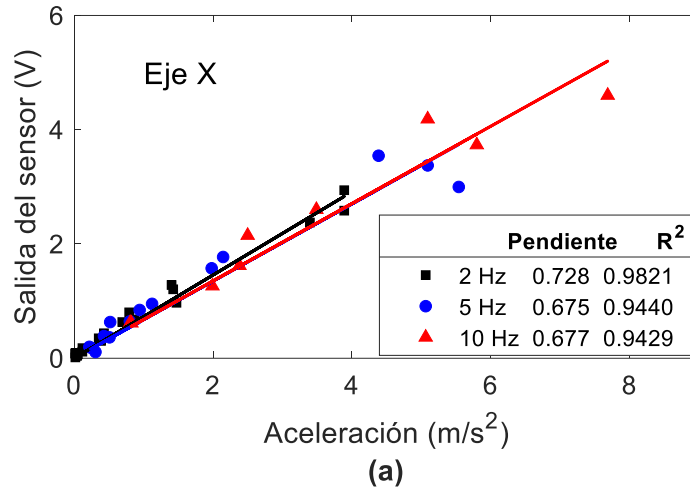


Fig. 4-5 Amplitud de salida del sensor contra aceleración aplicada para señales de excitación a 2 Hz, 5 Hz y 10 Hz. (a) Eje X, (b) eje Y.

4.1.5. Sensibilidad a la temperatura

Debido a que las rejillas de Bragg son sensibles tanto a la deformación como a la temperatura, y no se pueden separar ambas mediciones, se hace necesario el monitoreo de la temperatura para compensar el cambio en la señal. Una de las ventajas del método de superposición de rejillas Bragg es que tiene compensación de forma intrínseca, pero a pesar de dicha ventaja, experimentalmente se ha visto que no se logra compensar por completo la variación de las señales de salida por efectos de la temperatura. Aun así, para mediciones dinámicas, como es el caso de las vibraciones, el cambio de la señal debido a la temperatura no es un problema porque las fluctuaciones térmicas ocurren a frecuencias muy bajas comparadas con las frecuencias de interés. Si se requiere compensación total, se puede agregar un factor de compensación como en [61] o monitorear la temperatura con un sensor aparte.

4 Resultados

4.1.6. Frecuencia de resonancia

Para encontrar experimentalmente la frecuencia de resonancia del prototipo se aplicó una señal impulso al mismo, la respuesta se grabó con un osciloscopio y posteriormente se obtuvo su espectro en frecuencia. En la Fig. 4-6 se muestra la respuesta en tiempo y su correspondiente espectro en frecuencia del eje X, en la Fig. 4-7 se muestra la respuesta correspondiente al eje Y.

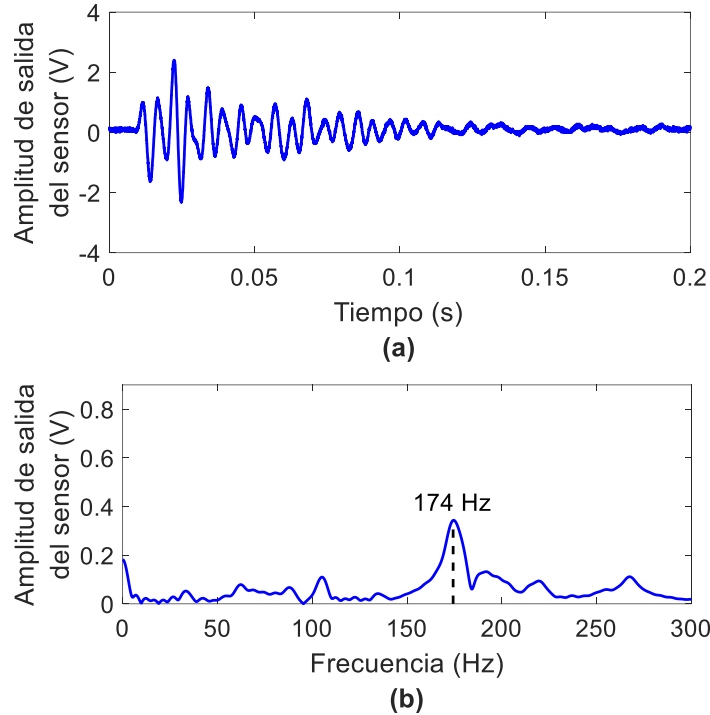


Fig. 4-6 Respuesta al impulso para determinar experimentalmente la frecuencia de resonancia del sensor en el eje X. (a) Dominio del tiempo, (b) Espectro en frecuencia.

La frecuencia de resonancia experimental del acelerómetro fue de 174 Hz y 182 Hz para los ejes X e Y, respectivamente. También se calculó la frecuencia de resonancia de forma teórica utilizando la Ec. (3.7) sustituyendo L_f por L_x y L_y , y los valores obtenidos fueron 184.7 Hz y 184.5 Hz para los ejes X e Y, respectivamente. En la Tabla 4-2 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos de forma teórica, simulada y experimental del acelerómetro biaxial, a partir de la comparación podemos ver que los valores son muy similares aunque hay pequeñas discrepancias que se pueden deber a errores en algunos parámetros tal como el coeficiente de rigidez de la fibra óptica y de la barra de nylon así como también de la densidad de la masa inercial que se imprimió en una impresora 3D del laboratorio.

Dado que el rango de trabajo en frecuencia para el acelerómetro es de 0.5 – 20 Hz, la frecuencia de resonancia de nuestro sensor en ambos ejes es más del doble de la máxima frecuencia de interés, y por tanto se espera que la sensibilidad del dispositivo en su rango de trabajo sea razonablemente constante.

Tabla 4-2 Comparación de los valores obtenidos de forma teórica, simulada y experimental de la frecuencia de resonancia para el acelerómetro biaxial.

Frecuencia de resonancia	Eje X	Eje Y
Teórica	184.7 Hz	184.5 Hz
Simulada	171.6 Hz	172.6 Hz
Experimental	174 Hz	182 Hz

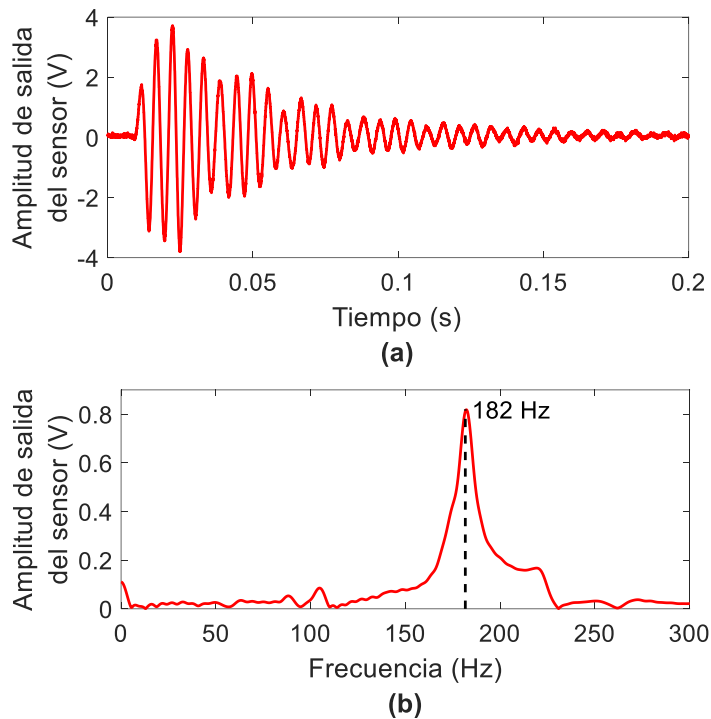


Fig. 4-7 Respuesta al impulso para determinar experimentalmente la frecuencia de resonancia del sensor en el eje Y. (a) Dominio del tiempo, (b) Espectro en frecuencia.

4.1.7. Ruido eléctrico y mínimo detectable

En la Fig. 4-8 se muestra el ruido en tiempo y su correspondiente densidad espectral del ruido en un rango de frecuencias de 0 a 500 Hz. El sensor presenta un ruido eléctrico en el que predomina la frecuencia de 60 Hz debido a la línea de alimentación. El pico de densidad espectral de ruido es de $1 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ en el eje X y $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ en el eje Y. El valor rms del ruido en tiempo es de 5.0 y 4.1 mV para el eje X y eje Y, respectivamente. Para calcular la mínima aceleración detectable por el dispositivo se considera el ruido en tiempo y una relación señal a ruido (Signal-to-noise ratio, SNR, por sus siglas en inglés) de 2, con estos parámetros, la mínima aceleración detectable es de $14 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ para el eje X y $12 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ para el eje Y.

Otro parámetro importante es el rango dinámico (*DR*) que refleja la relación entre el valor máximo de detección y la mínima aceleración detectable. En el caso de la aceleración es la relación entre la aceleración máxima a_{max} y la mínima detectable a_{min} :

4 Resultados

$$DR = 20 \log \left(\frac{a_{\max}}{a_{\min}} \right) \quad (4.1)$$

Para el acelerómetro biaxial desarrollado en este trabajo, la aceleración máxima es $\pm 5 \text{ m/s}^2$, como resultado se tiene un rango dinámico de 51 dB y 52 dB para el eje X y para el eje Y, respectivamente, en el rango de frecuencias de interés.

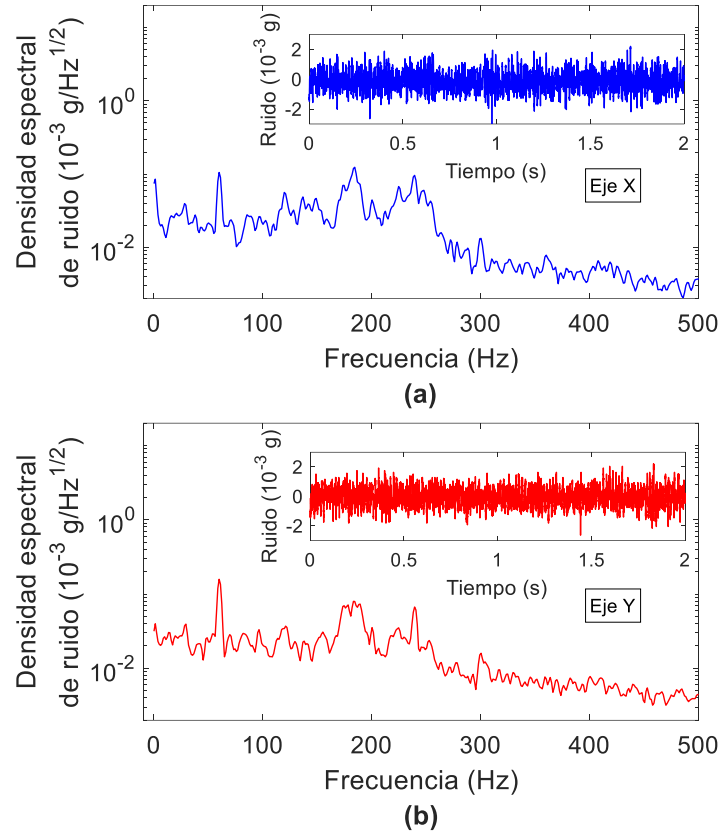


Fig. 4-8 Ruido en el dominio del tiempo del acelerómetro biaxial (inserto) y la densidad espectral de ruido equivalente: (a) eje X, (b) eje Y.

4.2. Acelerómetro triaxial

El objetivo final de esta investigación es el diseño e implementación de un acelerómetro triaxial con el supuesto de que se podría utilizar la técnica de superposición espectral de rejillas Bragg con un esquema óptico modificado para utilizar una menor cantidad de rejillas. En esta sección se muestran los resultados obtenidos para este dispositivo.

4.2.1. Simulaciones (Modelo 1 y Modelo II)

Previo a la implementación del acelerómetro triaxial se realizó la simulación con diferentes estructuras con el propósito de asegurar que la frecuencia de resonancia del sensor sea mayor al doble de su rango de operación objetivo. Para nuestro caso particular se necesita que la frecuencia de resonancia sea mayor a 40 Hz en todos los ejes y en todas las formas del modo de resonancia. Se requería que la masa inercial fuese de 12 gramos para tener un rango

de trabajo lineal en el esquema de demodulación óptico propuesto y un rango de sensado en amplitud de $\pm 5 \text{ m/s}^2$, este resultado para la masa inercial se dedujo en la sección 3.6.2. En la simulación se establecieron las dimensiones al mínimo, pero de tal forma que permitiera una correcta manufactura en el laboratorio, la longitud de la FBG incluyendo la cubierta protectora es de 15 mm (aunque la longitud de la rejilla es de 5 mm) y se dejan 5 mm de cada lado de la fibra para evitar daños durante el proceso de pegado, finalmente la distancia L_t desde la masa inercial al marco del sensor es de 25 mm.

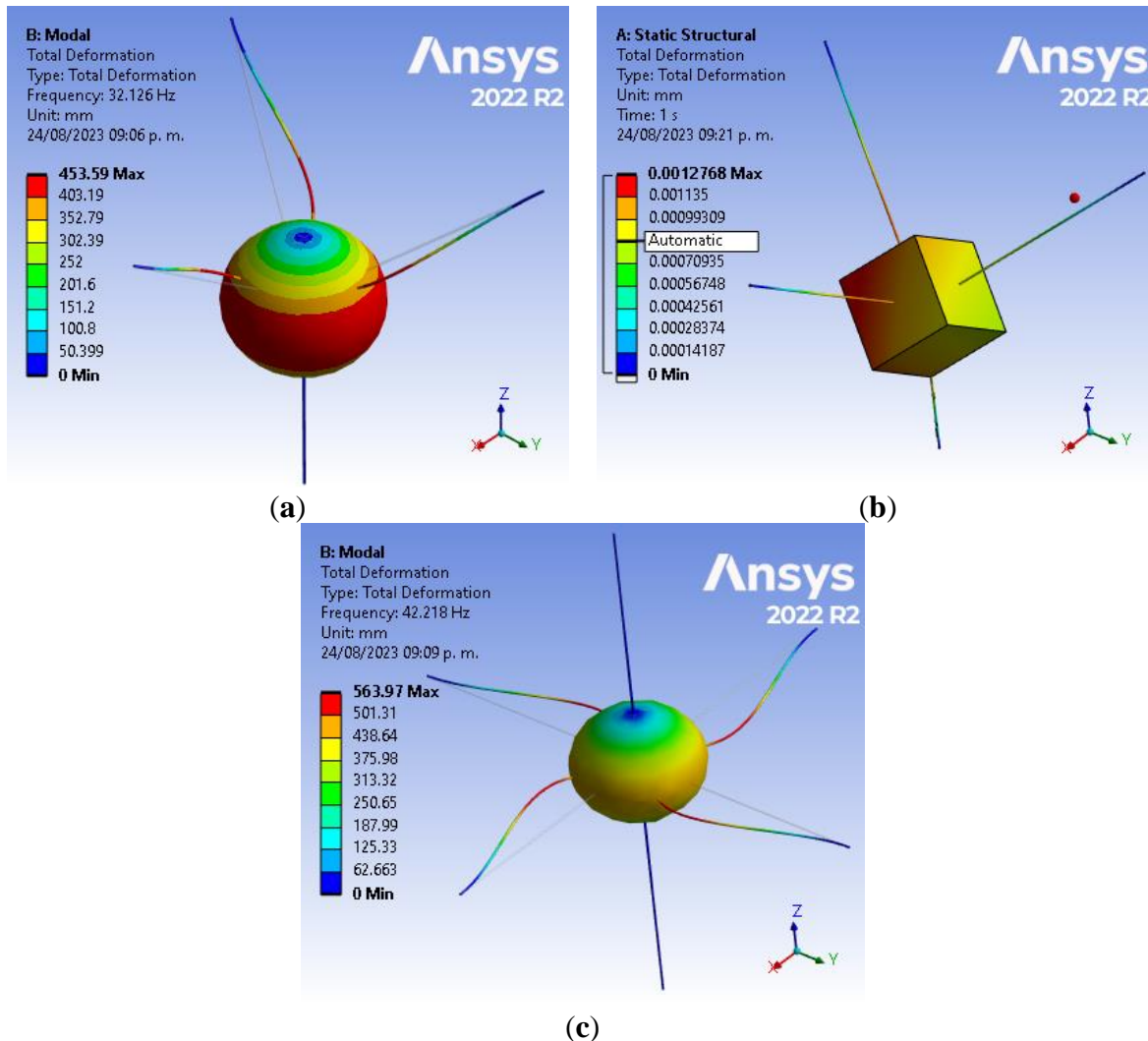


Fig. 4-9 Simulación del sistema masa-resorte de un acelerómetro en tres ejes para dos diferentes formas de masa inercial. (a) Esfera soportada con cuatro fibras, (b) cubo soportado por cuatro fibras, (c) esfera soportada por seis fibras (simulaciones realizadas en ANSYS versión de estudiante el 24 de agosto 2023).

Primero se probó con las configuraciones que se muestran en la Fig. 4-9, se utilizaron esas formas porque se pretendía utilizar el número mínimo de elementos como soporte de la masa inercial y también se necesita que la disposición de los ejes sea ortogonal. En la Fig. 4-9(a-b) solo se utilizaron cuatro fibras con dos formas diferentes de la masa inercial: esférica y cúbica. La frecuencia de resonancia encontrada para esa configuración fue de 32 Hz para la masa inercial con forma esférica y 18 Hz para la masa inercial con forma cúbica,

4 Resultados

esa frecuencia de resonancia no es lo suficientemente alta como para proporcionar una sensibilidad constante en el rango de trabajo.

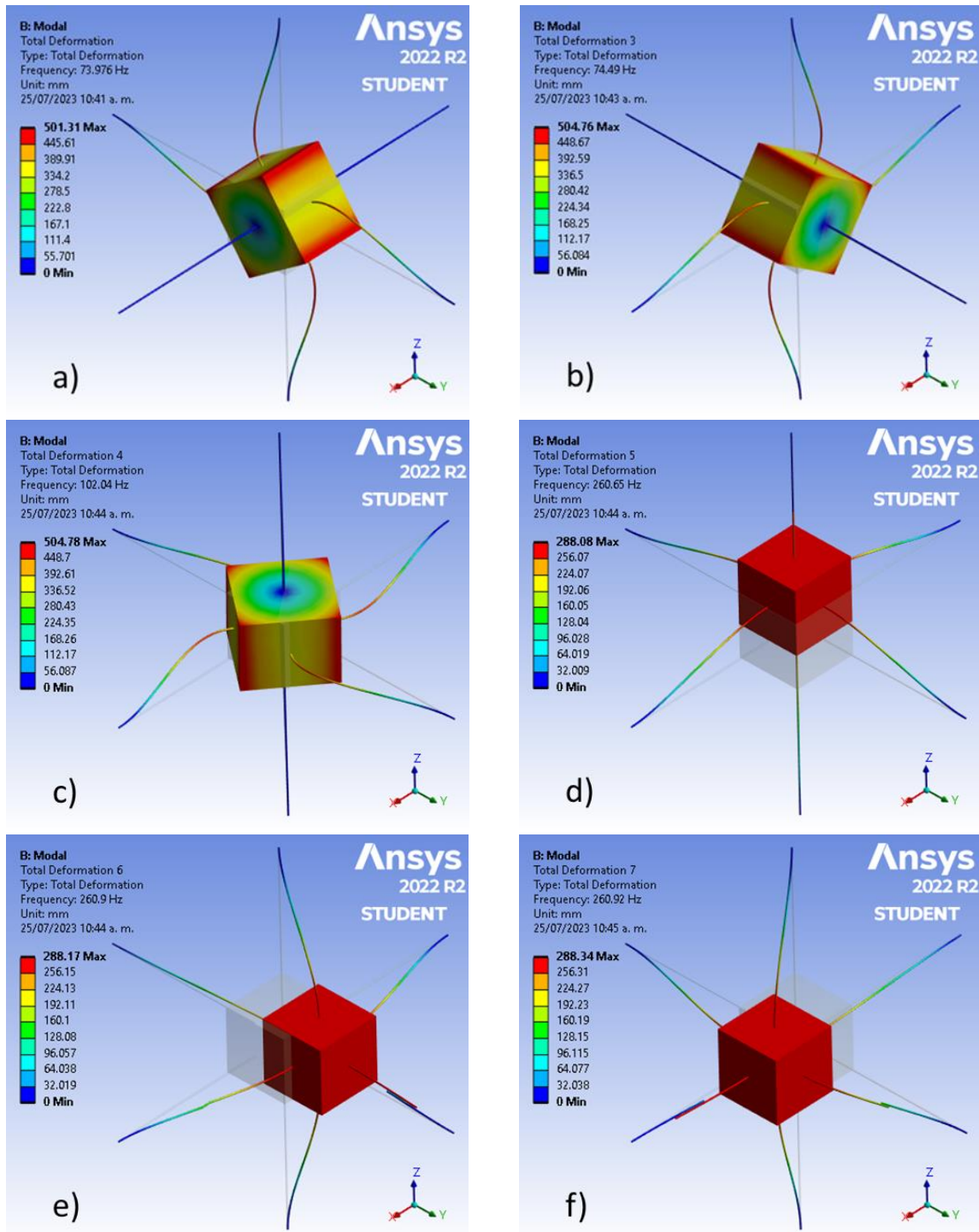


Fig. 4-10 Forma de los primeros seis modos del prototipo triaxial con seis soportes ortogonales en cada eje. (a), (b) y (c) Modos rotacionales, (d), (e) y (f) modos traslacionales (simulaciones realizadas en ANSYS versión de estudiante el 25 de julio 2023).

La siguiente configuración probada fue con una masa esférica soportada por seis fibras ortogonales, Fig. 4-9(c), en este caso la frecuencia de resonancia aumentó a 42 Hz, pero aun así no es una frecuencia lo suficientemente alta para tener un buen comportamiento.

Después, se realizó la simulación con la estructura que se muestra en la Fig. 4-10, y los parámetros de la simulación se muestran en la Tabla 4-3, en los resultados de la simulación podemos apreciar que la frecuencia de resonancia más baja es de 74 Hz, este modelo si cumple con la especificación necesaria en cuanto a la frecuencia natural o de resonancia.

En la Fig. 4-10 se puede ver que los primeros tres modos de resonancia del sensor son rotacionales con frecuencias naturales de 74.0, 74.5 y 102.0 Hz para el eje X, eje Y y eje Z, respectivamente. Los últimos tres modos son traslacionales con frecuencias a 260.7, 260.9 y 260.9 Hz, para los ejes Z, Y y X, respectivamente.

Tabla 4-3 Propiedades básicas de los materiales utilizados en el diseño del sensor.

Símbolo	Parámetro	Valor
E_f	Módulo de Young de la fibra óptica con recubrimiento de acrilato	1.656×10^{10} Pa
μ_f	Razón de Poisson de la fibra óptica	0.22
ρ_f	Densidad de la fibra óptica	2.58×10^3 kg/m ³
d	Diámetro de la fibra con recubrimiento de acrilato	2.5×10^{-4} m
m	Masa inercial	12×10^{-3} kg
E_{Pb}	Módulo de Young de la masa inercial de plomo (Pb)	1.7×10^{10} Pa
μ_{Pb}	Razón de Poisson de la masa inercial	0.44
ρ_{Pb}	Densidad de la masa inercial	1.135×10^4 kg/m ³
l_{Pb}	Lado de la masa inercial cúbica	1.02×10^{-2} m
L_t	Longitud de la fibra óptica desde la masa inercial al marco del sensor	2.5×10^{-2} m

La estructura de la Fig. 4-10 se colocó dentro de una carcasa con la forma de la Fig. 4-11(a), la simulación de esta carcasa resulta en una frecuencia de resonancia de 649 Hz.

También se realizó la simulación de la pinza que sujeta a la rejilla de referencia, la frecuencia de resonancia resultante para esta pinza es de 1828 Hz. Finalmente se realizó la simulación de la caja que protege a todo el acelerómetro con la forma que se muestra en la Fig. 4-12 dando como resultado una frecuencia de resonancia de 957.1 Hz. Se puede notar que todos los elementos que componen al sensor tienen frecuencias de resonancia mayor o mucho mayor a la frecuencia natural requerida para que el dispositivo opere correctamente.

4 Resultados

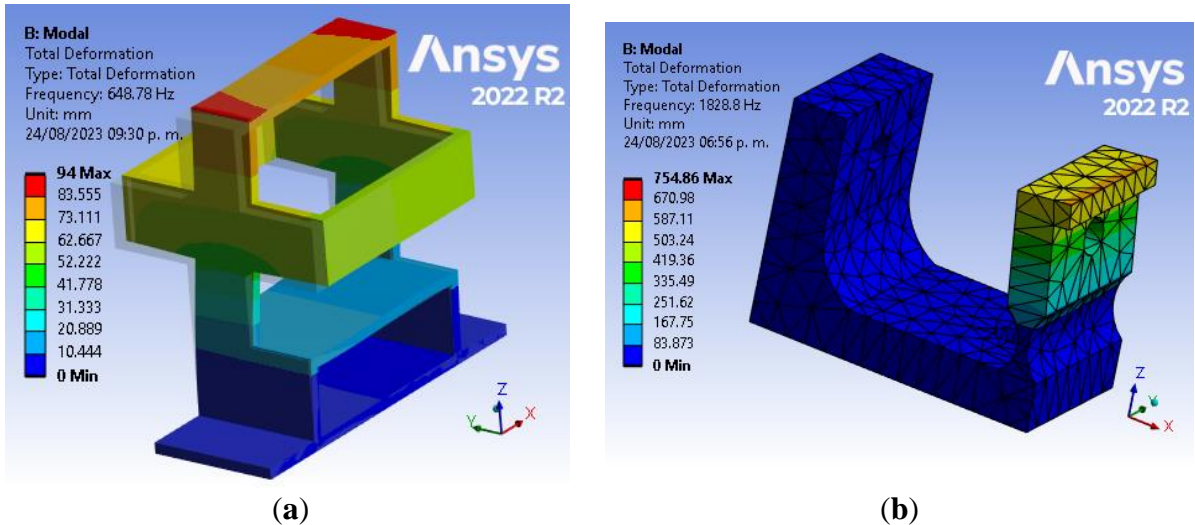


Fig. 4-11 Simulación de: (a) Marco del acelerómetro triaxial y (b) pinza que sujeta a la fibra óptica de la rejilla de referencia (simulaciones realizadas en ANSYS versión de estudiante el 24 de agosto 2023).

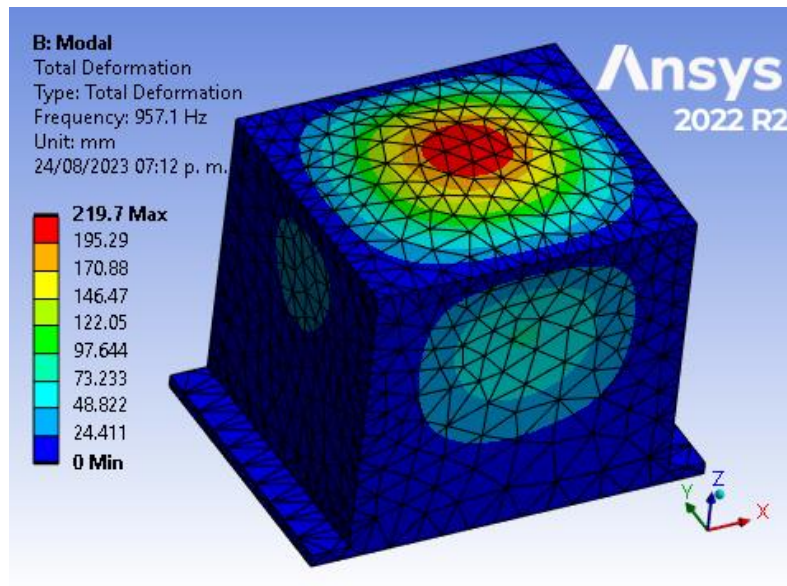


Fig. 4-12 Simulación de la caja que protege al acelerómetro triaxial (simulaciones realizadas en ANSYS versión de estudiante el 24 de agosto 2023).

4.2.2. Estructura

La estructura completa del sensor se integra por el marco del acelerómetro, Fig. 4-11(a), las tres fibras ópticas que contienen a las rejillas de Bragg, la masa inercial, la pinza que sujeta a la rejilla de referencia, Fig. 4-11(b), y la caja externa que protege al acelerómetro, Fig. 4-12. En las Fig. 4-13 y Fig. 4-14 se muestra la estructura completa del acelerómetro óptico triaxial. Sus dimensiones finales sin la caja de acrílico/aluminio son de 106 mm de largo por 57 mm de ancho y 95 mm de altura, mientras que las dimensiones con la caja de acrílico/aluminio que protege completamente el sensor es de 135 mm de largo por 117 mm de ancho y 115 mm de alto. La caja externa es necesaria para la completa protección

del sensor y permite un manejo adecuado y sin peligro de que algo se pueda dañar durante el traslado a alguna instalación.

Para realizar un pretensado a las rejillas de Bragg y para ajustarlas a una longitud Bragg óptima de funcionamiento se agregaron a la carcasa del acelerómetro unas placas tipo palanca, fijas de un lado y móviles del otro lado, la parte móvil es ajustable por medio de un arreglo de tornillos y tuercas. En el centro de las placas hay un agujero por donde pasa la fibra óptica misma que se fija con pegamento epóxico. La pinza que sujeta a la fibra óptica de la rejilla de referencia también se fija al marco del sensor y la fibra óptica se sujeta a la pinza con pegamento epóxico, el ajuste también se realiza por medio de un tornillo.

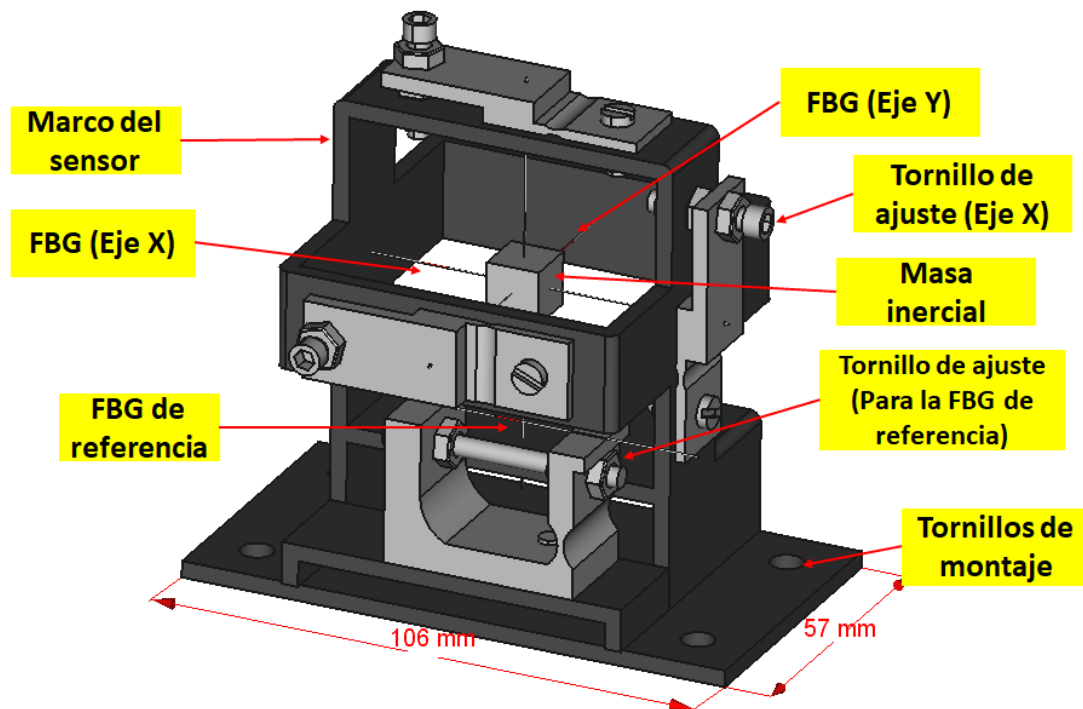


Fig. 4-13 Esquema de la estructura del acelerómetro triaxial. Se utiliza una sola rejilla de medición en cada eje.

La implementación del acelerómetro triaxial se muestra en la Fig. 4-14, el marco del acelerómetro se fija a la caja exterior por medio de tornillos y se hacen orificios en la caja para añadirle conectores para fibra óptica, con eso se logra que no haya necesidad de llevar cables conectados al momento de hacer algún traslado del sensor. Los materiales utilizados son: acero estructural de 3.2 mm de espesor para el marco del sensor, aluminio para las placas de ajuste de tensión y para la pinza que sujeta a la rejilla de referencia.

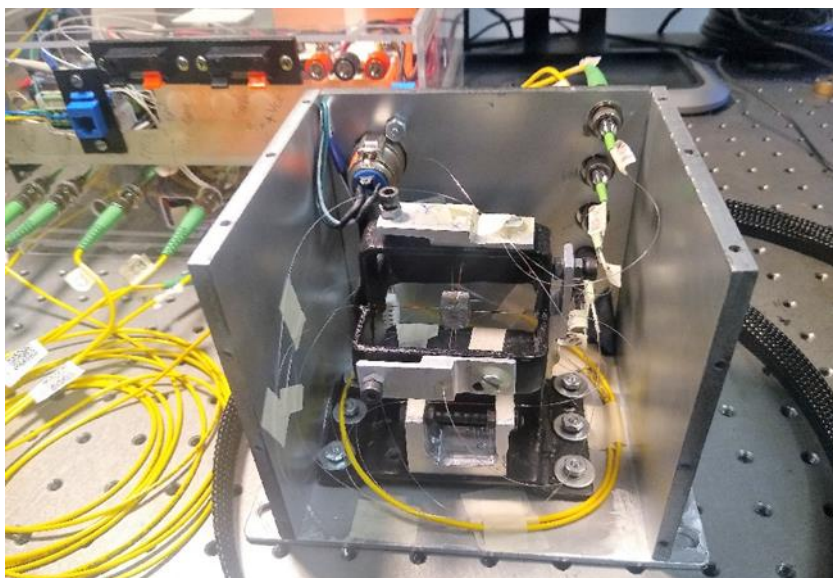


Fig. 4-14 Fotografía del acelerómetro triaxial.

4.2.3. Sensibilidad a la aceleración

El acelerómetro óptico triaxial se caracterizó parcialmente en una mesa de vibración propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, esta mesa tiene movimiento en dos ejes con un desplazamiento máximo de 100 mm en cada eje. El arreglo de acelerómetros capacitivos, que tienen una sensibilidad de $0.12 \text{ V}/(\text{m}/\text{s}^2)$, se utilizó como referencia para determinar la sensibilidad del sensor óptico, en la Fig. 4-15 se puede ver la comparación entre la respuesta de ambos dispositivos.

Las gráficas del lado izquierdo de la Fig. 4-15 se obtuvieron después de realizar una reducción del ruido base y del ruido mecánico inducido por la mesa de vibración, para lo anterior se utilizaron los espectros de las señales mostrados del lado derecho de la figura y se eliminaron todas las frecuencias cuya potencia espectral era menor a $50 \times 10^{-6} \text{ W}/\text{Hz}$. Esta caracterización nos proporciona una sensibilidad promedio a 1 Hz de 0.31 ± 0.012 y $0.42 \pm 0.004 \text{ V}/(\text{m}/\text{s}^2)$ para el eje X y para el eje Y, respectivamente. Los números seguidos del signo \pm representan la desviación estándar de las mediciones. Estos resultados de calibración se consideran preliminares porque aún hace falta la caracterización del eje Z. Se requiere calibración futura de este sensor usando una mesa de vibración de tres ejes o por métodos numéricos.

4.2.4. Sensibilidad a la temperatura

En la Fig. 4-16 se muestra una comparación de la variación de la señal de salida del acelerómetro con respecto a la temperatura. La temperatura se toma con el sensor DHT22 que se ubica dentro de la caja del acelerómetro. Se aprecia una variación de la señal del acelerómetro, pero esta variación es lenta con respecto a la señal que se pretende medir con este dispositivo. El esquema de demodulación de la longitud de Bragg, Fig. 3-9, permite una compensación por temperatura porque la longitud de Bragg se desplaza en el mismo sentido

que lo hacen las rejillas de sensado cuando la temperatura varía, pero en los resultados experimentales se puede ver que la compensación no es total. Dado de la variación de la señal de salida del acelerómetro está correlacionada con la variación de la temperatura, se puede utilizar un sensor de temperatura adicional para lograr una mayor compensación en caso de ser necesario.

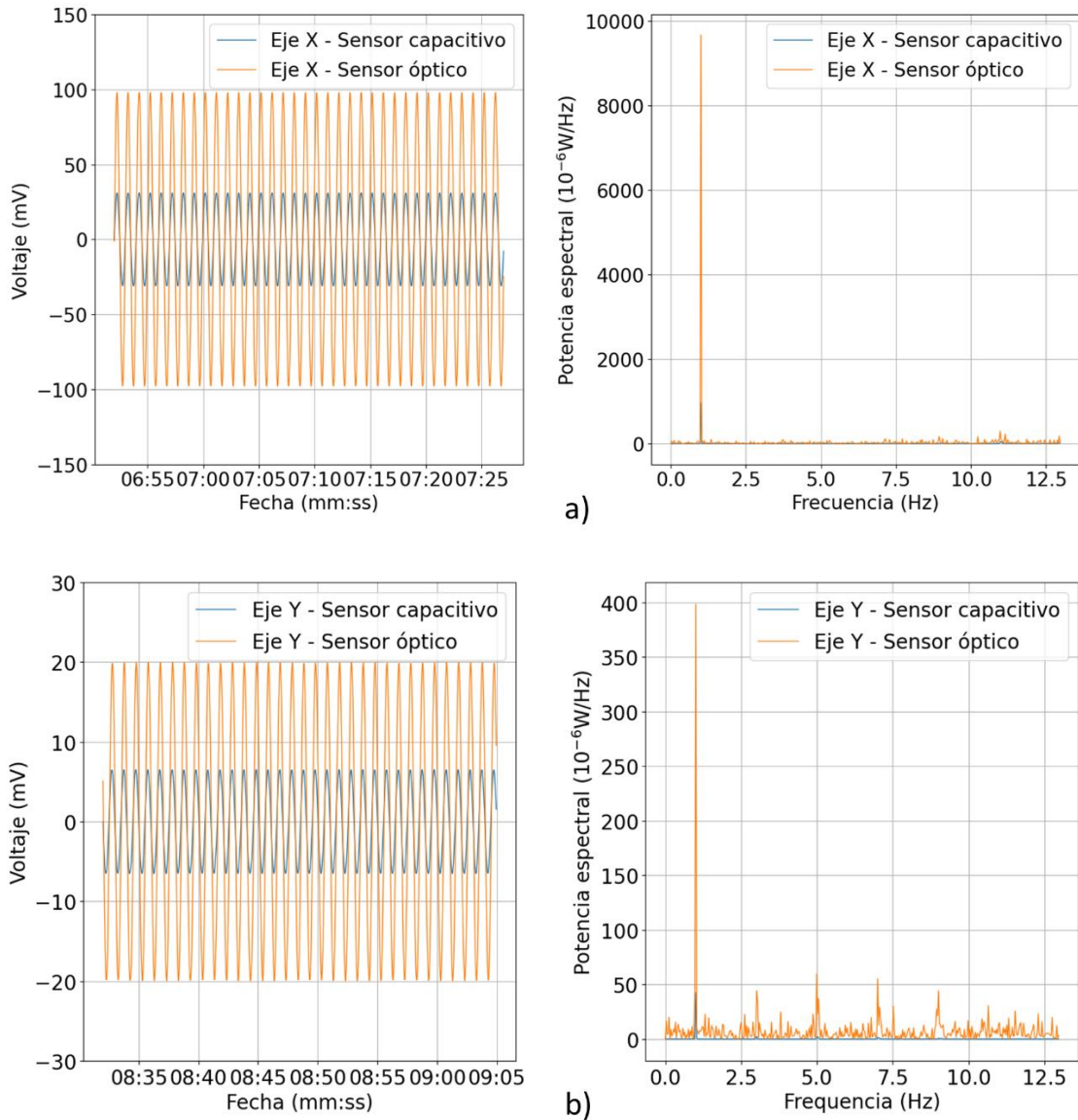


Fig. 4-15 Señales de ejemplo a 1 Hz inducidas al acelerómetro por una mesa de vibración para calcular la sensibilidad de cada eje. Los datos de salida del acelerómetro óptico se comparan con los del arreglo de acelerómetros capacitivos.

4 Resultados

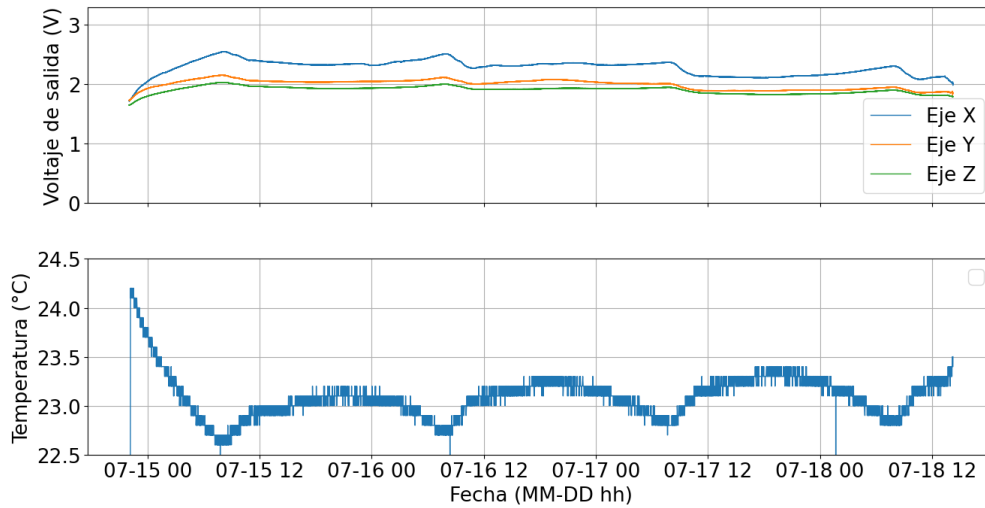


Fig. 4-16 Variación de la señal de salida del acelerómetro óptico con respecto a la variación de la temperatura. Se puede ver que la salida del acelerómetro está correlacionada con la temperatura de forma inversa.

4.2.5. Ruido eléctrico y mínimo detectable

El ruido presente en el sistema completo, incluyendo las etapas óptica y electrónica, se analizó para reducirlo durante la caracterización del acelerómetro. Los valores RMS del ruido en tiempo son 1.50, 1.86, y 0.85 mV en el eje X, eje Y y eje Z, respectivamente, Fig. 4-17. Tomando en cuenta el valor del ruido, la sensibilidad calculada del acelerómetro, y una $SNR=2$, la mínima señal de aceleración que se puede detectar, sin reducción de ruido, es de 13.7×10^{-3} y 12.5×10^{-3} m/s² para el eje X y para el eje Y, respectivamente.

La mínima aceleración detectable a_{min} puede disminuir si se hace una reducción por software del ruido presente en el sistema en tiempo real.

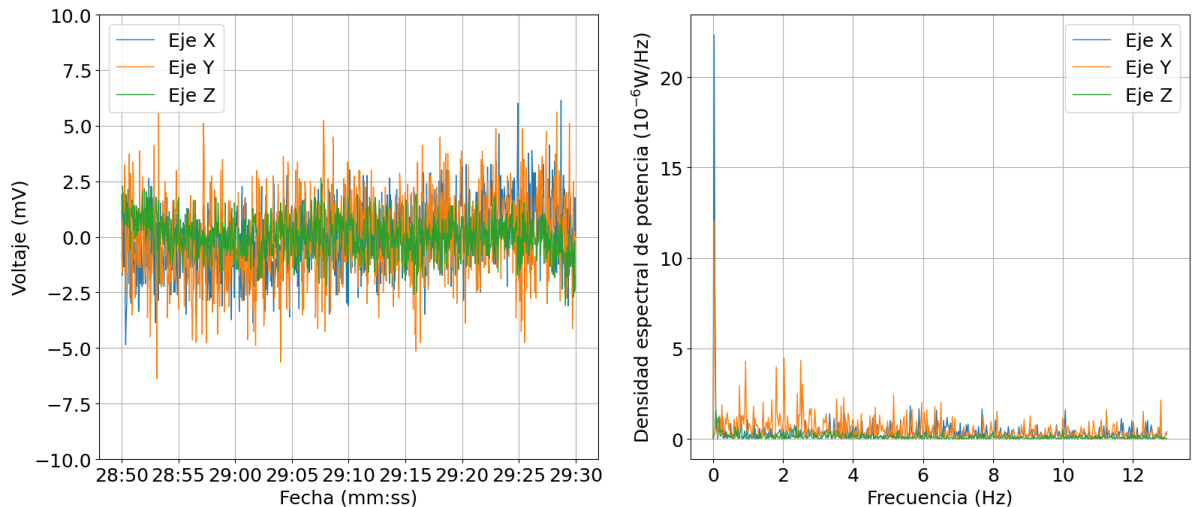


Fig. 4-17 Ruido base presente en las lecturas del acelerómetro triaxial.

4.2.6. Registro de movimiento sísmico

El prototipo de acelerómetro triaxial implementado se mantiene grabando permanentemente desde marzo del 2023. El 10 de mayo a las 22:20 horas, tiempo de la Ciudad de México, ocurrió un sismo de magnitud 3.0 con epicentro en la Ciudad de México. La grabación de este sismo por el acelerómetro se muestra en la Fig. 4-18. Con la sensibilidad calculada en la sección previa para los ejes X e Y, se escaló la salida en voltaje que proporciona el sensor a unidades de aceleración. Para el caso del eje Z que no se calibró, se supuso una sensibilidad igual a la del eje Y. El pico de aceleración durante el movimiento de la tierra en el eje Y es de 0.11 m/s^2 y para los otros ejes es una cantidad menor, este valor de aceleración coincide con el mapa de isoaceleraciones del reporte especial del Servicio Sismológico Nacional (SSN) [62] donde se puede leer que el pico de aceleración en la ubicación del laboratorio es menor a 0.1 m/s^2 . Las gráficas se muestran sin ningún procesamiento digital ni reducción de ruido, con datos crudos grabados por el sistema de adquisición de datos.

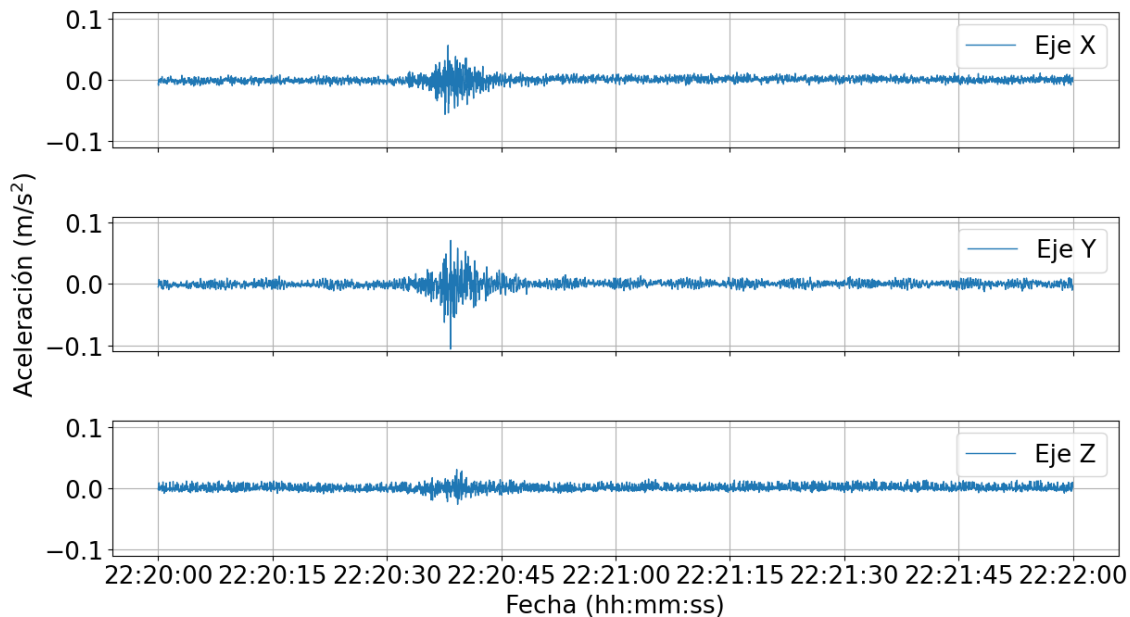


Fig. 4-18 Registro de un sismo débil de magnitud 3.0 ocurrido en la Ciudad de México el 10 de mayo del 2023 a las 22:20 horas.

Para realizar la comparación entre los registros obtenidos por el acelerómetro desarrollado en este trabajo y los registros del Servicio Sismológico Nacional, en la Fig. 4-19 se muestran los registros sísmicos del SSN en las estaciones de las alcaldías Miguel Hidalgo (MHVM), Benito Juárez (BJVM), y Escuela nacional Preparatoria #8 (ENP8). Aunque en [62] no se especifica las unidades del tiempo en el eje horizontal de las gráficas, la forma de las gráficas obtenidas por nuestro acelerómetro es muy similar a las del SSN.

4 Resultados

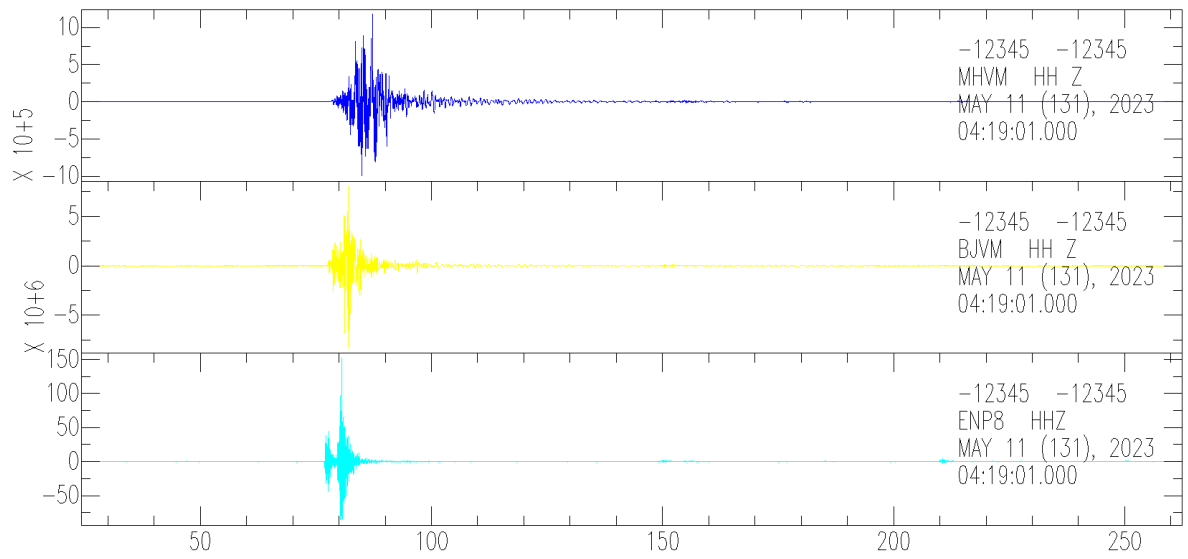


Fig. 4-19 Registros sísmicos del evento del día 10 de mayo de 2023, M 3.0 en diferentes estaciones MHVM, BJVM y ENP8 [62].

Conclusiones

Se estudió a profundidad el método de superposición de los espectros ópticos de rejillas de Bragg para aplicarlo en la implementación de un acelerómetro triaxial. Se logró desarrollar un prototipo para medir la aceleración de movimientos oscilatorios sin utilizar un equipo interrogador, esto reduce de manera considerable el costo de la tecnología dando una mayor facilidad para tener independencia tecnológica. El método de superposición reportado en la literatura se modificó para utilizar una menor cantidad de rejillas de Bragg logrando un ahorro de dos dispositivos ópticos, lo anterior comparándolo con el esquema tradicional que utiliza seis dispositivos ópticos.

Por otro lado, para el diseño del acelerómetro, además del análisis del método de superposición de rejillas Bragg, también se realizó la simulación mecánica del sensor. Se utilizaron diferentes propuestas y se eligió la estructura con frecuencia de vibración natural más alta. Esta estructura consiste en una masa en forma de cubo colocada en el centro del marco del sensor. La masa se sostiene por medio de seis fibras ópticas, una en cada cara del cubo. El objetivo de la simulación fue determinar la frecuencia de resonancia de la estructura y asegurarse de que ésta esté fuera del rango de trabajo del sensor.

Según la literatura especializada, las especificaciones que debe de cumplir el acelerómetro para la medición de movimientos en edificios durante sismos son: rango en amplitud de aceleración de $\pm 5 \text{ m/s}^2$ y rango de medición en frecuencia de 0.5 a 20 Hz, la frecuencia de resonancia debe ser mayor a 40 Hz; la frecuencia natural resultante de la simulación realizada para esta investigación fue de 74 Hz, 74.5 Hz y 102 Hz, para los ejes X, Y y Z, respectivamente. Los rangos de trabajo en amplitud y frecuencia necesarios se satisfacen en el acelerómetro desarrollado, la ventaja del acelerómetro de tres ejes consiste en que monitorea de forma completa cualquier movimiento en el espacio.

Durante el desarrollo de esta investigación, se estudió la sensibilidad de un acelerómetro biaxial y del acelerómetro triaxial. Para la calibración de los dispositivos se utilizó un arreglo de acelerómetros capacitivos como referencia y una mesa de vibración como fuente de movimiento oscilatorio. La mesa de vibración para la calibración del acelerómetro biaxial es de diseño y elaboración propia, mientras que para la calibración del acelerómetro triaxial se utilizó una mesa de vibración propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Para demostrar la alta sensibilidad del sensor desarrollado, así como la factibilidad de su uso especializado en estructuras y edificaciones que están bajo la influencia de movimientos sísmicos, se pone como ejemplo el registro proveniente del microsismo ocurrido en la Ciudad de México el 10 de mayo del 2023 con magnitud 3.0. Este prototipo registró en forma similar a las señales que el SSN tiene registrados, lo que nos permite asumir que el sensor puede ser instalado en diferentes ubicaciones dentro de los edificios.

Como parte del trabajo desarrollado en esta investigación se realizó el encapsulamiento de la primera versión triaxial para proponer un prototipo portable, lo anterior llevó a realizar un estudio detallado de la conversión de señales ópticas de salida del acelerómetro a señales eléctricas mediante una etapa electrónica de acondicionamiento y se elaboró un sistema de adquisición de datos con el uso de una Raspberry Pi, en donde además almacenan los datos y generan gráficas para visualizar las señales de salida del sensor. Se utilizó un DAQ y una caja de acrílico para la colocación de los elementos ópticos adicionales al sensor y de la electrónica necesaria para hacer el sistema portable. El tamaño final del dispositivo encapsulado es de 135 mm de largo por 117 mm de ancho y 115 mm de alto, esto es el acelerómetro triaxial, estas dimensiones son adecuadas tomando en cuenta que el lugar de instalación es grande en comparación con el tamaño del dispositivo encapsulado. Las dimensiones del dispositivo encapsulado varían según la necesidad de la sensibilidad del sensor triaxial (acelerómetro), si el tamaño del sensor aumenta, la sensibilidad también aumenta.

Este sensor triaxial es un complemento a las tecnologías existentes para medir aceleración, es altamente sensible e inmune a las interferencias electromagnéticas. A pesar de que este dispositivo se encuentra en etapas tempranas de desarrollo, se presentaron evidencias sólidas de la alta confiabilidad comparada con los dispositivos comerciales. Hay oportunidad de mejorar el proceso de fabricación y reducir el ruido eléctrico al máximo para tener mediciones con mayor exactitud, sin embargo, con la resolución alcanzada con el prototipo en esta tesis es suficiente para medir un sismo de magnitud 3.0, con las mejoras se puede llegar a medir sismos de menores amplitudes. Las características actuales del prototipo son: mínimo detectable de 13.7×10^{-3} y 12.5×10^{-3} m/s² para el eje X y para el eje Y, respectivamente, sensibilidad de 0.31 ± 0.012 y 0.42 ± 0.004 V/(m/s²) para el eje X y para el eje Y, respectivamente, y resolución de 0.32×10^{-3} y 0.24×10^{-3} m/s² para el eje X e Y, respectivamente.

Se pretende lograr la certificación del sensor y así contribuir con la independencia tecnológica a nivel nacional, hacer accesible este tipo de tecnología, realizar mediciones de campo para aumentar las probabilidades de detectar a tiempo cualquier problema que pudiera surgir en algún edificio o estructura civil, así como formar parte en la protección de la vida de las personas.

Las acciones futuras que se proponen para el sensor triaxial (acelerómetro) son:

- Mejorar la técnica de fabricación del acelerómetro triaxial para tener mayor ortogonalidad en sus ejes.

- Realizar un análisis de las diversas fuentes del ruido presente en el sensor y realizar las acciones correctivas necesarias tanto a nivel electrónico como digital.
- Calibración del acelerómetro con un estándar de referencia.

En el Anexo 4 se presenta la primera hoja de las publicaciones derivadas de este trabajo doctoral.

Referencias

- [1] M. A. Jaimes, E. Reinoso, M. Ordaz y C. Arredondo, «Correlación entre la aceleración y velocidad máxima del suelo: Aplicación en el análisis del peligro sísmico,» *Revista de Ingeniería Sísmica*, vol. 81, pp. 19-35, 2009.
- [2] B. Benito y L. Cabañas, «Caracterización del movimiento del suelo en Ingeniería Sísmica,» *Física de la Tierra*, vol. 11, pp. 49-79, 1999.
- [3] C. Collete, S. Janssens, P. Fernandez-Carmona, K. Artoos, M. Guinchard, C. Hauviller y A. Preumont, «Inertial sensors for low-frequency seismic vibration measurement,» *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 102, pp. 1289-1300, 2012.
- [4] E. Parisi, A. Moallemi, F. Barchi, A. Bartolini, D. Brunelli, N. Buratti y A. Acquaviva, «Time and frequency domain assessment of Low-Power MEMS Accelerometers for Structural Health Monitoring,» de *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT (MetroInd4.0&IoT)*, Bologna, Italy, 2022.
- [5] R. M. Ali, M. S. Elksasy, M. S. Salam, M. S. Saraya y M. M. Abdelsalam, «Low-cost MEMS accelerograph: structure, operation and application to seismology,» *Delta University Scientific Journal*, vol. 6, n° 1, pp. 193-204, 2023.
- [6] A. Rovera, A. Tancau, N. Boetti, M. D. Dall, P. Maggiore y D. Janner, «Fiber optics sensors for harsh and high radiation environments in aerospace applications,» *Sensors*, vol. 23, n° 2512, pp. 1-37, 2022.
- [7] k. H. Hisham, *Fiber Bragg grating sensors: Development and applications*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.
- [8] R. Moreira, J. L. de Siqueira, T. d. B. Caldas, J. Urbaninho, N. Alles y R. Cardoso, «Improvement of fiber Bragg grating interrogator sensitivity for triaxial accelerometer,» de *2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2009.

- [9] X. Xiao, J. Tao, Q. Song, Y. Sun, J. Yang y Z. Yan, «Sensitivity-tunable oscillator-accelerometer based on optical fiber Bragg grating,» *Photonics*, vol. 8, n° 223, pp. 1-8, 2021.
- [10] Q. Zhang, T. Zhu, J. Zhang y K. S. Chiang, «Micro-fiber-based FBG sensor for simultaneous measurement of vibration and temperature,» *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 25, n° 18, pp. 1751-1753, 2013.
- [11] J. Wang, L. Wei, R. Li, Q. Liu, L. Yu, T. Li y Y. Tan, «An FBG-based 2-D vibration sensor with adjustable sensitivity,» *IEEE Sensors J.*, vol. 17, n° 15, pp. 4716-4724, 2017.
- [12] K. Li, T. H. Chan, M. H. Yau, D. P. Thambiratnam y H. Y. Tam, «Biaxial fiber Bragg grating accelerometer using axial and transverse forces,» *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, n° 15, pp. 1549-1552, 2014.
- [13] L. Wei, L. Yu, J. Wang, D. Jiang, Q. Liu y Z. Liu, «An FBG-sensing two-dimensional vibration sensor based on multi-axis flexure hinge,» *IEEE Sensors J.*, vol. 19, n° 10, pp. 3698-3710, 2019.
- [14] B. Yan y L. Liang, «A novel fiber Bragg grating accelerometer based on parallel double flexible hinges,» *IEEE Sens. J.*, vol. 20, pp. 4713-4718, 2020.
- [15] J. Thomas, J. Nayak, S. Asokan y O. P. Parida , «Double-L cantilever-based fiber Bragg grating accelerometer,» *IEEE Sens. J.*, vol. 19, pp. 11247-11254, 2019.
- [16] K. Skorupski, D. Harasim, P. Panas, S. Cieszczyk, P. Kisala, P. Kacejko, J. Mroczka y M. Wydra, «Overhead transmission line sag estimation using the simple opto-mechanical system with fiber Bragg gratings-Part 2: Interrogation system,» *Sensors*, vol. 20, pp. 1-21, 2020.
- [17] L. Wei, L. Yu, J. Wang , D. Jiang, Q. Liu y Z. Liu, «An FBG-sensing two dimensional vibration sensor based on multi-axis flexure hinge,» *IEEE Sens. J.*, vol. 19, pp. 3698-3710, 2019.
- [18] Y. Zhang, W. Zhang, Y. Zhang, L. Chen, T. Yan, S. Wang, L. Yu y Y. Li, «2-D medium-high frequency fiber Bragg gratings accelerometer,» *IEEE Sens. J.*, vol. 17, pp. 614-618, 2017.
- [19] N. N. Ismail, A. S. Sharbirin, M. Sa'ad, M. Zaini, M. F. Ismail, G. Brambilla, B. Rahman, K. Grattan y H. Ahmad, «Novel 3D-printed biaxial tilt sensor based on fiber Bragg grating sensing approach,» *Sensors and Actuators A*, vol. 330, n° 112864, pp. 1-8, 2021.
- [20] S. R. Morikawa, A. S. Ribeiro, R. D. Regazzi, L. Valente y A. Braga, «Triaxial Bragg

Referencias

- grating accelerometer,» *OFS IEEE*, pp. 95-98, 2002.
- [21] Q. Jiang y M. Yang , «Simulation and experimental study of a three-axis fiber Bragg grating accelerometer based on the pull-push mechanism,» *IOPSCIENCE*, vol. 24, pp. 1-9, 2013.
- [22] A. Pérez-Alonzo y G. E. Sandoval-Romero, Estudio de las características de funcionamiento de un acelerómetro en más de un eje utilizando rejillas de Bragg en fibra óptica, Ciudad Universitaria: Universidad Nacional Autónoma de México, 2019.
- [23] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors*, San Diego, CA: Springer, 2016, pp. 392-297.
- [24] Freescale Semiconductor, Inc, «Technical data - MMA1260D Low G micromachined accelerometer,» Arizona, 2004.
- [25] S. J. Eidi, G. F. Arantes Bertochi, J. Meneguci y R. W. Motl, «Pedometers and accelerometers in multiple sclerosis: Current and new applications,» *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, n° 11839, pp. 1-11, 2022.
- [26] D. Krohn, T. MacDougall y A. Mendez, *Fiber optic sensors*, Bellingham, Washington: SPIE PRESS, 2014.
- [27] K. O. Hill, «Photosensitivity in optical fiber waveguides: from discovery to commercialization,» *EEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, n° 6, pp. 1186-1189, 2000.
- [28] A. Othonos y K. Kalli, *Fiber Bragg gratings-Fundamentals and applications in Telecommunications and Sensing*, Boston: Artech House, 1999.
- [29] R. Kashyap, *Fiber Bragg gratings*, Academic Press, 2009.
- [30] SOL PHOTONICS, «ABOUT THE NORIA,» [En línea]. Available: <https://www.solphotonics.nl/noria>. [Último acceso: 16 08 2023].
- [31] J. Haus, *Optical Sensors: Basics and Applications*, Weinheim, Germany: WILEY-VCH, 2010.
- [32] F. V. de Nazaré, M. M. Werneck, R. P. de Oliveira, D. M. Santos, R. C. Allil y B. A. Ribeiro, «Development of an optical sensor head for current and temperature measurements in power systems,» *Journal of Sensors*, vol. 2013, n° 393406, pp. 1-12, 2013.
- [33] Q. Zhang, *Fiber-optic pi-phase-shifted Bragg grating and its application in sensor*, Lincoln, Nebraska: University of Nebraska, 2015.
- [34] T. Erdogan, «Fiber grating spectra,» *J. Light. Technol.*, vol. 15, n° 8, pp. 1277-1294,

- 1997.
- [35] A. B. Lobo, L. A. Ferreira, J. L. Santos y D. A. Jackson , «Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme.,» *Applied Optics*, vol. 36, n° 4, pp. 934-339, 1997.
- [36] A. Pérez-Alonzo y G. E. Sandoval-Romero, «Accelerometer prototype based on enhanced fiber Bragg grating overlapping interrogation method,» *Optik*, vol. 242, n° 167027, pp. 1-10, 2021.
- [37] A. Pérez-Alonzo, F. Velazquez-Carreón y G. E. Sandoval-Romero, «Biaxial FBG vibration sensor with a single edge filter and matching demodulation,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 127798-127805, 2022.
- [38] F. T. Yu y S. Yin, *Fiber optic sensors*, New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [39] B. E. Saleh y M. C. Teich, *Fundamental of Photonics*, USA: John Wiley, 1991.
- [40] Freescale Semiconductor, Inc, «Technical Data - MMA2260 1.5g X-Axis micromachined accelerometer,» Arizona, 2006.
- [41] Q. Liu, W. Liu, C. Wang, R. Zhang, W. Fan, D. Yu y X. Qiao, «High figure of merit and low cross sensitivity fiber Bragg grating accelerometer based on double grid-diaphragms,» *IEEE Sensors J.*, vol. 21, n° 24, pp. 27503-27509, 2021.
- [42] O. M. Abushagur, M. A. Abushagur y K. Narayanan, «Novel three-axes fiber Bragg grating accelerometer,» de *Proc. SPIE 5877, Optomechanics 2005, 58770Z*, San Diego, California, 2005.
- [43] Thorlabs, «T711-250 - Post-mountable fiber clamp, 250 um, 8.32 Tap,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=T711-250>. [Último acceso: 15 Agosto 2023].
- [44] AG Electrónica S.A. de C.V., «Sensor de humedad relativa y temperatura,» 24 09 2015. [En línea]. Available: <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/D/DHT-22.PDF>. [Último acceso: 22 08 2023].
- [45] EXTECH INSTRUMENTS, «Manual de usuario Registrador de HUmedad/ Temperatura,» Extech Instruments Corporation, Waltham, MA, 2009.
- [46] J. Browaeys, «MATLAB Central File Exchange,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45711-linear-fit-with-both-uncertainties-in-x-and-in-y>. [Último acceso: 26 08 2023].
- [47] S. Crowder, C. Dleker, E. Forrest y N. Martin , *Introduction to Statistics in Metrology*, Albuquerque, NM, USA: Springer Nature Switzerland, 2020.

Referencias

- [48] Daley, «10. Error propagation tutorial.doc,» 10 09 2009. [En línea]. Available: https://foothill.edu/psme/daley/tutorials_files/10.%20Error%20Propagation.pdf. [Último acceso: 2023 08 27].
- [49] D. Mohapatra y B. Subudhi, «Development of a cost-effective IoT-based weather monitoring system,» *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 11, pp. 81-86, 2022.
- [50] J. Yoon y S. Benerjee, «Hardware-assisted, low-cost video transcoding solution in wireless networks,» *IEEE Trans. on Mob. Comput.*, vol. 19, pp. 581-597, 2020.
- [51] Y. Obeidat y A. Ammar, «A system for blood glucose monitoring and smart insulin prediction,» *IEEE Sens. J.*, vol. 21, pp. 13895-13909, 2021.
- [52] K. H. Yeh, C. Su, J. L. Hou, W. Chiu y C. M. Chen, «A robust mobile payment scheme with smart contract-based transaction repository,» *IEEE Access*, vol. 6, pp. 59394-59404, 2018.
- [53] D. Despa, A. Kurniawan, M. Komarudin, Mardiana y G. F. Nama, «Smart monitoring of electrical quantities based on single board computer BCM2835,» de *2015 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Semarang, Indonesia, 2015.
- [54] Q. Zhu, J. Lu, X. Wang, H. Wang y S. Lu, «Real-time quality inspection of motor rotor using cost-effective intelligent edge system,» *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, pp. 7393-7404, 2023.
- [55] B. Fu, S. Li, J. Wei, Q. Li, Q. Wang y J. Tu, «A novel intelligent garbage classification system based on deep learning and an embedded Linux system,» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 131134-131146, 2021.
- [56] S. Karthikeyan, R. Aakash, V. C. Meenalosini, C. Lei, V. J. Ajay y V. S. Rohith , «A systematic analysis on Raspberry Pi prototyping: uses, challenges, benefits, and drawbacks,» *IEEE Internet Thing J.*, in press, 2023.
- [57] P. Skrzypiec y Z. Marszalek, «Linux Kernel driver for external analog-to-digital and digital-to-analog converters,» de *2020 27th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES)*, Poland, 2020.
- [58] M. Tivnan, R. Gurjar, D. E. Wolf y K. Vishwanath, «High frequency sampling of TTL pulses on a Raspberry Pi for diffuse correlation spectroscopy applications,» *Sensors*, vol. 15, pp. 19709-19722, 2015.
- [59] Modern Plastics Handbook, Lutherville, MD, USA: Technology Seminars, 2000.
- [60] P. Antunes, F. Dominguez, M. Granada y P. André, «Mechanical properties of optical

- fibers,» *Selected Topics on Optical Fiber Technology*, pp. 537-550, 2012.
- [61] F. Velazquez-Carreón, A. Pérez-Alonzo y G. E. Sandoval-Romero, «Temperature-compensated fiber Bragg grating sensor based on curvature sensing for bidirectional displacements measurement,» *Optical Fiber Technology*, vol. 77, n° 103257, pp. 1-8, 2023.
- [62] SSN, «Sismos del 10 y 11 de mayo de 2023, Cuenca de México (M 3.0), Reporte especial,» Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2023.
- [63] L. Ada, «Adding a Real Time Clock to Raspberry Pi,» Adafruit, 31 08 2012. [En línea]. Available: <https://learn.adafruit.com/adding-a-real-time-clock-to-raspberry-pi/set-rtc-time>. [Último acceso: 2023 08 24].

Anexo 1. Electrónica

En esta sección se describen los principales circuitos electrónicos utilizados en el sensor y también se explican los parámetros de diseño.

A.1.1. Tarjeta del arreglo de acelerómetros capacitivos

La tarjeta electrónica de los acelerómetros se muestra en la Fig. A-1. El circuito empieza con una fuente de alimentación que puede ser de 9-12 V, el voltaje de entrada se regula con el LM7805 a 5V para alimentar a los acelerómetros. El circuito se puede alimentar con una fuente externa a 12 V (que son muy comunes) o una pila de 9 V que se coloca directamente dentro de la caja que se elaboró para el arreglo, si se quiere alimentar con 5 V directamente, se puede quitar el puente JP1. Se utilizan capacitores de 0.1 μF en VDD para desacoplar la fuente de alimentación, estos capacitores deben de estar lo más cerca posible a los pines de los circuitos integrados [24].

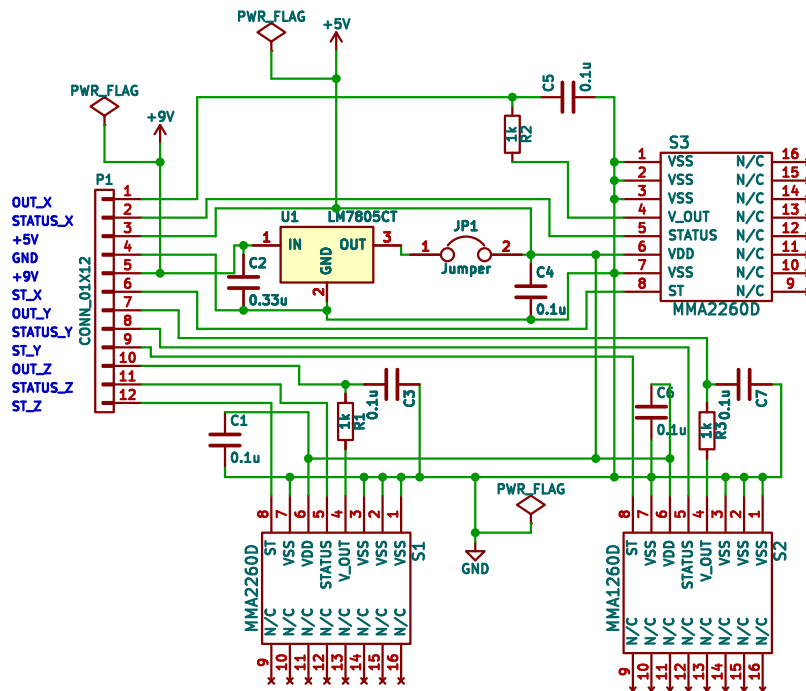


Fig. A-1 Diagrama del arreglo de acelerómetros capacitivos.

Se utiliza un filtro RC de 1 kΩ y 0.1 μF a la salida de los acelerómetros para minimizar el ruido de reloj proveniente del circuito de filtro de capacitor conmutado interno. Las señales de salida de cada acelerómetro se indican con OUT_X, OUT_Y y OUT_Z.

A.1.2. Tarjeta de acondicionamiento

La tarjeta de acondicionamiento se utiliza para convertir la corriente proveniente de los fotodetectores en voltaje, filtrarla y amplificarla antes de enviarla a la tarjeta del convertidor analógico digital. La señal en corriente proveniente del fotodetector PD-A-25-9-1-FA con responsividad de 0.9 A/W a una longitud de onda de 1550 nm se convierte a voltaje por medio de un circuito de transimpedancia utilizando un amplificador operacional TL082. La segunda etapa consiste en un filtro pasivo paso-bajas con frecuencia de corte a 159 Hz para atenuar ruido de alta frecuencia y permitir una operación apropiada del amplificador de instrumentación AD620. Posteriormente la señal filtrada se amplifica con un circuito integrado AD620 de bajo ruido (9 nV/Hz^{1/2}). La ganancia del AD620N se estableció en 40.5 dB usando una resistencia de ganancia de 470 Ω. El voltaje de salida OUT del circuito se ajusta a la mitad de la fuente de alimentación del convertidor analógico digital (1.65 V) usando un divisor de voltaje en el negativo de la entrada diferencial del AD620 y se puede ajustar cuando sea necesario usando la resistencia variable de 100 kΩ. La etapa final es un filtro paso-bajas con frecuencia de corte a 159 Hz.

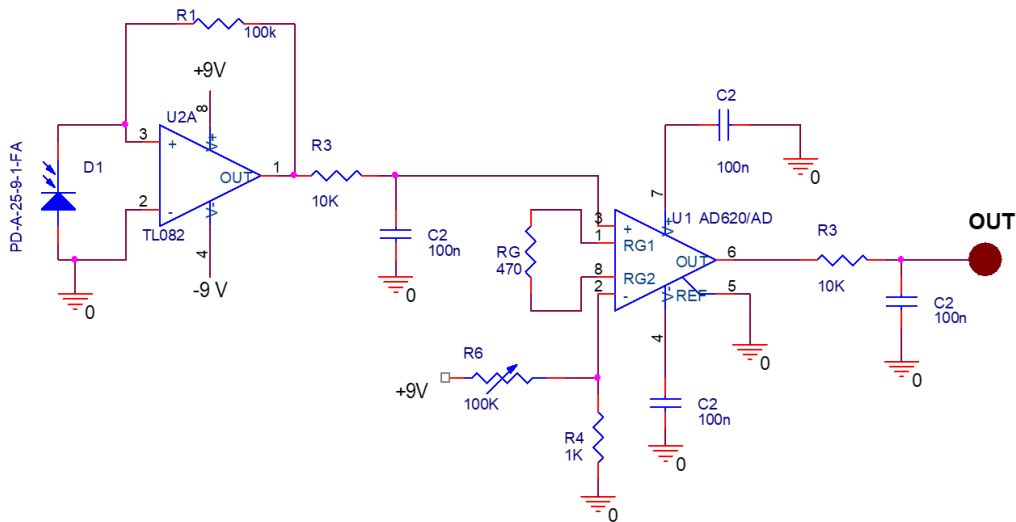


Fig. A-2 Circuito eléctrico para el acondicionamiento de las señales provenientes del fotodetector hacia la tarjeta de los ADCs.

Para el caso del arreglo de acelerómetros capacitivos, su salida es directa en voltaje con una sensibilidad de $120 \times 10^{-3} \text{ V/(m/s}^2\text{)}$ y no se requiere electrónica adicional.

A.1.3. Tarjeta de los ADC

Esta tarjeta contiene dos convertidores analógico-digital (ADC) y el reloj en tiempo real que mantiene la hora en la Raspberry Pi. Además, tiene una serie de pines para recibir hasta 8 canales analógicos, hasta dos sensores de temperatura digitales DHT22 y para

comunicarse con la Raspberry Pi. No se usan todos los pines de la tarjeta que llegan a la Raspberry Pi, pero se agregaron para futuras expansiones, hay pines disponibles para los 40 pines de entrada/salida que trae la Raspberry para agregar diversos dispositivos. La conexión entre esta tarjeta y la Raspberry se realiza mediante un cable plano de 40 pines.

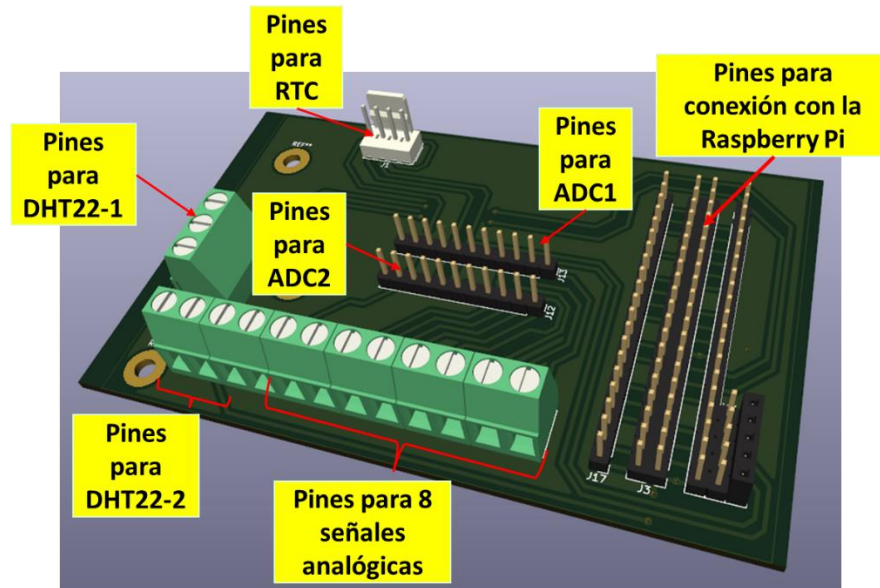


Fig. A-3 Vista 3D de la placa construida para adquirir las señales analógicas de los acelerómetros y las señales digitales de los sensores de temperatura DHT22.

A.1.4. Configuración de la Raspberry Pi

La configuración que se necesita realizar en la Raspberry Pi para que pueda comunicarse con los ADCs, el reloj en tiempo real, los sensores digitales de temperatura DHT22, y los programas que se necesitan instalar para leer, almacenar y graficar los datos se resumen a continuación:

- 1) Descargar e instalar el programa “Raspberry Pi Imager” en la PC.
- 2) Seguir las instrucciones para cargar el sistema operativo “Raspberry Pi OS” en una MicroSD clase 10 o superior.
- 3) Ya en la Raspberry, habilitar la interfaz I2C (para que se pueda comunicar con los ADCs y el RTC). Comando “`sudo raspi-config`”, seleccionar Interface→Option→I2C→SI.
 - a. Para comprobar que el puerto esté habilitado y que se reconocen los dispositivos, ejecutar el comando: `$ sudo i2cdetect -y 1`. Deben de aparecer las direcciones correspondientes a los ADCs y al RTC, 0x48, 0x49 y 0x68, respectivamente.
- 4) Conectar la Raspberry Pi a Internet (Para poder descargar los programas y actualizarlos).
- 5) Revisar que Python esté instalado. Comando: `$ Python3 -version`. En caso necesario actualizarlo a la versión más reciente.

- 6) Instalar y configurar la base de datos MariaDB. Comando: `$ sudo apt install mariadb-server -fix-missing.`
 - a. Instalar el conector Mariadb/C (es necesario para instalar el conector MariaDB/Python). Comando: `$ sudo apt install libmariadb3 libmariadb-dev`
 - b. Instalar el conector MariaDB/Python. Comando: `$ pip3 install mariadb==1.0.11`
 - c. Revisar si se puede acceder a MariaDB. Comando: `$ mysql -u root -p.`
 - d. Si desde Python no se puede acceder a la base de datos, ir a la consola de mysql y escribir `>SET PASSWORD FOR 'root'@localhost = PASSWORD("password");`
- 7) Instalar las librerías necesarias para que corran los programas en Python.
 - a. Instalar la librería del ADS1115. Comando: `$ sudo pip3 install adafruit-circuitpython-ads1x15`
 - b. Instalar la librería del sensor de temperatura. Comando: `$ sudo pip3 install Adafruit_DHT`
 - c. Instalar la librería scipy. Comando: `$ sudo apt-get install python3-scipy`
 - d. Instalar la librería Matplotlib. Comando: `$ sudo apt-get install python3-matplotlib`
 - e. Instalar la librería de PyQtGraph. Comando: `$ sudo pip3 install pyqtgraph==0.12.4.` Si marca algún error, ejecutar: `$ sudo apt-get install libatlas-base-dev`
- 8) Para que los programas de lectura y almacenamiento de datos corran al iniciar o reiniciar la Raspberry hay que agregar una línea al final del documento crontab. Comando: `$ crontab -e.`
 - a. Añadir una línea por cada programa que se quiera correr. Ejemplo:

```
@reboot      sleep      100;      /usr/bin/python3
             /home/<directorio>/<nombre_del_programa>.py
```
- 9) Configurar el reloj en tiempo real [63].

Anexo 2. Códigos de programas en Matlab y Python

A lo largo del desarrollo de este trabajo se desarrollaron diversos programas tanto en Matlab como en Python, los principales se presentan en este apéndice.

A.2.1. Simulación del voltaje de salida del acelerómetro

Este código simula los valores de salida en voltaje del acelerómetro en posiciones estáticas dependiendo de los ángulos θ_a y φ_a de rotación de este. El programa está elaborado en Matlab.

```
%Programa que simula la señal de salida de un acelerómetro en V,
%Los datos de entrada son:
%  Ángulo de rotación alrededor de y /theta, °
%  Ángulo de rotación alrededor de x /phi, °
%  Sensibilidad G en cada eje del acelerómetro, V/(m/s2)
%  Offset de la señal en cada eje, V
%
% Los datos de salida son los voltajes en cada eje del acelerómetro, V

clear;
phi = 0; theta = 0; mg = 9.81; %Ángulo en grados, mg en N Theta rota alrededor de
y, Phi alrededor de x
G = [0.3; 0.4; 0.4]; B = [1.8; 1.9; -2.0]; %G en V/(m/s2), B en V

Roty = [cosd(theta) 0 sind(theta); 0 1 0; -sind(theta) 0 cosd(theta)] %Matriz de
rotación y
Rotx = [1 0 0; 0 cosd(phi) -sind(phi); 0 sind(phi) cosd(phi)] %Matriz de
rotación X
R = Roty*Rotx; %Rotación compuesta, primero en eje X, después en Y, Rotación
usando sistema de referencia fijo
xn = R*[1; 0;0] %Eje rotado
yn = R*[0; 1; 0] %Eje rotado
zn = R*[0; 0; 1] %Eje rotado
F = [0; 0; mg] %Fuerza debida a la gravedad

MTF=[xn yn zn F] %Matriz aumentada
```

```

RMTF=rref(MTF) %Matriz aumentada resuelta m/s2
Out = G.*RMTF(:,4)+B %Voltajes de salida x G + B

```

A.2.2. Programa para almacenar los datos de los acelerómetros.

Este programa se desarrolló en Python, lee los datos de seis canales, tres del acelerómetro capacitivo y tres del óptico. Los almacena en la base de datos con nombre “database” de MariaDB. El diagrama de flujo de este programa se muestra en la Fig. 3-22.

```

#Programa para leer los datos de dos ADS1115 y guardarlos en la base de
datos
#Destino: arduinodb2.
import time
import mariadb
import re #Para utilizar expresiones regulares
import numpy as np
from datetime import datetime
import sys
import board
import busio
i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)

import adafruit_ads1x15.ads1115 as ADS
from adafruit_ads1x15.analog_in import AnalogIn

ads48 = ADS.ADS1115(i2c, address=0x48) #CONFIGURACIÓN DEL ADS CON DIRECCIÓN
48 (para: sensor_optico)
ads48.gain = 1
ads48.data_rate=860
chan048= AnalogIn(ads48, ADS.P0)
chan148= AnalogIn(ads48, ADS.P1)
chan248= AnalogIn(ads48, ADS.P2)

ads49 = ADS.ADS1115(i2c, address=0x49) #CONFIGURACIÓN DEL ADS CON DIRECCIÓN
49 (para: sensor_capacitivo)
ads49.gain = 1
ads49.data_rate=860
chan049= AnalogIn(ads49, ADS.P0)
chan149= AnalogIn(ads49, ADS.P1)
chan249= AnalogIn(ads49, ADS.P2)

def main():

    #CONEXIÓN A LA BASE DE DATOS.
    try:
        conn = mariadb.connect(
            host = "localhost",
            user = "root",
            password="password",
            database="database")
    except mariadb.Error as e:

```

Anexo 2 Códigos de programas

```
print(f"Error connecting to the database origen: {e}")
sys.exit(1)

cur= conn.cursor() #Get cursor #Creamos el objeto cursor.

while True:
    for i in range(4):
        xo = chan048.value      #Factor para convertir a voltaje
0.000125 @ gain=1.
        yo = chan148.value
        zo = chan248.value
        xc = chan049.value      #Factor para convertir a voltaje
0.000125 @ gain=1.
        yc = chan149.value
        zc = chan249.value
        fecha = datetime.now()

        if xo < 0:
            xo = 0
        if yo < 0:
            yo = 0
        if zo < 0:
            zo = 0

        if xc < 0:
            xc = 0
        if yc < 0:
            yc = 0
        if zc < 0:
            zc = 0

        ToDB_opt = "INSERT INTO sensor_optico (FECHA, VOLTAJEX,
VOLTAJEY, VOLTAJEZ) VALUES (%s, %s, %s, %s)"
        ToDB_opt_vals = (fecha,xo,yo,zo)

        ToDB_cap = "INSERT INTO sensor_capacitivo (FECHA, VOLTAJEX,
VOLTAJEY, VOLTAJEZ) VALUES (%s, %s, %s, %s)"
        ToDB_cap_vals = (fecha,xc,yc,zc)

        cur.execute(ToDB_opt,ToDB_opt_vals)
        cur.execute(ToDB_cap,ToDB_cap_vals)
        #conn.commit() #Si se habilita esta instrucción (aquí), la
tabla se actualiza en cada ciclo.
        conn.commit() #Si se habilita esta instrucción (aquí), la tabla se
actualiza cada 40 ciclos.

    conn.close()

if __name__ == '__main__':
    main()
```

A.2.3. Programa para graficar en tiempo real

El diagrama de flujo de este programa se puede ver en la Fig. 3-22, primero se establece la conexión a la base de datos, posteriormente se lee el último registro guardado y

se crea la gráfica utilizando la librería PyQtGraph. Después se leen los nuevos registros, se crea un vector de datos con longitud máxima de 380 registros y se actualiza la gráfica, este ciclo de actualizar y graficar se repite indefinidamente. Este programa está escrito en Python.

```
#import mariadb Programa con gráficas en tiempo real con PyQtGraph
import time
import mariadb
from pyqtgraph.Qt import QtGui, QtCore, QtWidgets
import pyqtgraph as pg #Aqui uso la version py -m pip install
pyqtgraph==0.12.4
import re #Para utilizar expresiones regulares
import numpy as np
from datetime import datetime
import sys

fecha3 = []
x3 = []
y3 = []
z3 = []

global conn

def conexion_db(): #Conexion a la base de datos
    global conn
    try:
        conn = mariadb.connect(
            host = "localhost",
            user = "root",
            password="password",
            database="database")
    except mariadb.Error as e:
        print(f"Error connecting to the database: {e}")
        sys.exit(1)

    cursor = conn.cursor() #Get cursor #Creamos el objeto cursor.
    return cursor

def leerdatos(cur): #Se utiliza para obtener solo el primer dato
    Fromsql="SELECT * FROM sensor_optico ORDER BY ID DESC LIMIT 1" #Para
    leer el último registro de Mysql
    cur.execute(Fromsql) #Ejecuta la consulta y regresa los registros de
    acuerdo a la consulta.
    ToPlot = cur.fetchall() #Obtiene todas la filas del resultado de una
    consulta.
    print("Total number of rows in table", cur.rowcount)

    fecha_dt = [ToPlot[0][1].timestamp()] #Lo coloco entre corchetes para
    tenga la estructura de un arreglo aunque sea un solo dato
    x = [ToPlot[0][2]]
    y = [ToPlot[0][3]]
    z = [ToPlot[0][4]]

    global IDa
    IDa = ToPlot[0][0]

    return fecha_dt, x, y, z
```

Anexo 2 Códigos de programas

```
#conn.close()

def nuevosdatos(cur): #Se utiliza para obtener los datos subsiguientes al
primero
    global IDa, conn
    Fromsql="SELECT * FROM sensor_optico WHERE ID > " + str(IDa) #Para leer
los datos de Mysql con ID mayor al último leído

    flag = True
    while flag: #Este asegura que tengamos por lo menos un registro en la
consulta.
        cur.execute(Fromsql) #Ejecuta la consulta y regresa los registros
de acuerdo a la consulta.
        ToPlot = cur.fetchall() #Obtiene todas la filas del resultado de
una consulta.
        if ToPlot != []:
            flag = False
        else:
            time.sleep(0.1)
            conn.commit()

    list_fecha_dt = []
    list_x = []
    list_y = []
    list_z = []

    for row in ToPlot:
        list_fecha_dt.append(row[1].timestamp())
        list_x.append(row[2]*0.125)
        list_y.append(row[3]*0.125)
        list_z.append(row[4]*0.125-400)
        IDa = row[0]

    return list_fecha_dt, list_x, list_y, list_z
#conn.close()
#-----INICIA SECCION DE GRÁFICA-----
def Actualizar(line1,line2,line3):
    global fecha3, x3, y3, z3

    nd = nuevosdatos(conexion_db())

    for row in nd[0]:
        fecha3.append(row)

    for row in nd[1]:
        x3.append(row)

    for row in nd[2]:
        y3.append(row)

    for row in nd[3]:
        z3.append(row)

    while len(x3) > 380:
        fecha3 = fecha3[1:]
        x3 = x3[1:]
        y3 = y3[1:]
```



```

    z3 = z3[1:]

    line1.setData(fecha3,x3)
    line2.setData(fecha3,y3)
    line3.setData(fecha3,z3)

    QtWidgets.QApplication.processEvents()

def grafica(data):
    app = QtWidgets.QApplication([]) #Lazo infinito que trabaja en el
    background de la aplicacionesperando un evento como del mouse, clicks,etc,)

    list_fecha_dt = data[0]
    #print(list_fecha_dt)
    list_x = data[1]
    list_y = data[2]
    list_z = data[3]

    win = pg.GraphicsWindow(title="Grafica en tiempo real")
    graph = win.addPlot(title="Grafica tiempo real", axisItems = {'bottom':
pg.DateAxisItem()}) #Crea una gráfica con eje tipo fecha

    penx = pg.mkPen(color='r')
    peny = pg.mkPen(color='b')
    penz = pg.mkPen(color='g')
    graph.addLegend()
    line1 = graph.plot(list_fecha_dt,list_x, name = "Eje X", pen=penx)
    line2 = graph.plot(list_fecha_dt,list_y, name = "Eje Y", pen=peny)
    line3 = graph.plot(list_fecha_dt,list_z, name = "Eje Z", pen=penz)

    graph.showGrid(x=True, y=True)
    #graph.setRange(yRange=[8000, 10000])
    graph.setLabel('left', 'Voltaje [mV]')
    graph.setLabel('bottom', 'Tiempo [s]')
    #graph.setBackground('w')
    while True:
        Actualizar(line1,line2,line3)
        time.sleep(0.02) #Espero un tiempo para que no actualize tan
rápido

    pg.QtWidgets.QApplication.exec_() #Inicio del lazo. Con PyQt5 se usa
QtWidgets en lugar de
                                #QtGui

def main():
    datos = leerdatos(conexion_db()) #Lee el primer dato
    grafica(datos)

if __name__ == '__main__':
    main()

```

A.2.4. Programa para graficar datos históricos

El diagrama de flujo de este programa se puede ver en la Fig. 3-22, primero se establece la conexión a la base de datos, después se establecen las fechas o el número de registros de los datos a graficar, se recuperan los datos y finalmente se grafican.

Anexo 2 Códigos de programas

```
import time
import mariadb
import matplotlib.pyplot as plt
import re #Para utilizar expresiones regulares
import numpy as np
plt.style.use('_mpl-gallery')

#Conexion a la base de datos
try:
    conn = mariadb.connect(
        host = "localhost",
        user = "root",
        password="password",
        database="database")
except mariadb.Error as e:
    print(f"Error connecting to the database: {e}")
    sys.exit(1)

#Get cursor
cur = conn.cursor() #Creamos el objeto cursor.

Fromsql="SELECT * FROM sensor_optico ORDER BY ID DESC LIMIT 1000000" #Para
leer los datos de Mysql
#Fromsql="SELECT * FROM sensor_optico WHERE FECHA BETWEEN '2023-03-29
07:00:00.000000' AND '2023-03-29 08:00:00.000000'" #Para leer los datos de
Mysql solo de debe de habilitar una instrucción a la vez.
#Fromsql="SELECT * FROM sensor_optico WHERE ID < 2000000" #Para leer los
datos de Mysql
#Fromsql ="SELECT ID, FECHA, VOLTAJEX, VOLTAJEY, VOLTAJEZ, @a FROM
sensor_optico WHERE ((@a := @a+1)%20=0) AND (FECHA BETWEEN '2023-02-14
06:00:00.000000' AND '2023-02-14 06:10:00.000000')"
#Fromsql ="SELECT ID, FECHA, VOLTAJEX, VOLTAJEY, VOLTAJEZ, @a FROM
sensor_optico WHERE (@a := @a+1)%20=0 ORDER BY ID DESC LIMIT 1000000"

#cur.execute("set @a=0")
cur.execute(Fromsql) #Ejecuta la consulta y regresa los registros de
acuerdo a la consulta.
ToPlot = cur.fetchall() #Obtiene todas la filas del resultado de una
consulta.
print("Total number of rows in table", cur.rowcount)

#Separar los datos en variables
indice = []
fecha = []
x = []
y = []
z = []
for row in ToPlot:
    fecha.append(row[1])
    x.append(row[2]*0.125) #Dado que la ganancia del ADS1115 está
configurado con 1, el LSB = 125uV
    y.append(row[3]*0.125)
    z.append(row[4]*0.125)

#Graficar
fig, axs = plt.subplots(3, 1)
axs[0].plot(fecha,x, linewidth=1.0, label='Eje X')
#axs[0].set_ylim(9000, 10000)
```

```
axs[0].set_xlabel('Fecha')
axs[0].set_ylabel('Voltaje [mV]')
axs[0].grid(True)
axs[0].legend()

axs[1].plot(fecha,y, linewidth=1.0, label='Eje Y')
#axs[0].set_xlim(0, 2)
axs[1].set_xlabel('Fecha')
axs[1].set_ylabel('Voltaje [mV]')
axs[1].grid(True)
axs[1].legend()

axs[2].plot(fecha,z, linewidth=1.0, label='Eje Z')
#axs[0].set_xlim(0, 2)
axs[2].set_xlabel('Fecha')
axs[2].set_ylabel('Voltaje [mV]')
axs[2].grid(True)
axs[2].legend()

fig.tight_layout()
plt.show()

conn.close()
```

Anexo 3. Lista de equipos y materiales

MATERIALES

1. Rejillas de Bragg en fibra óptica de OeMarket con valores nominales: $\lambda_B=1550$ nm, ancho de banda de 0.2 nm, reflectividad del 95%, 5 mm de longitud, en fibra óptica SMF-28e, conectores FC/APC.
2. Circuladores ópticos monomodales CIR-3-1550-P-1-FA de OeMarket, longitud de onda de trabajo 1550 ± 30 nm, conectores FC/APC.
3. Acopladores ópticos monomodales 1x2 SWB-1550-1x2-P-50/50-1-FA de OeMarket, longitud de onda de trabajo 1550 ± 40 nm, tasa de acoplamiento 50:50, en fibra óptica SMF-28e.
4. Acoplador óptico monomodal 1x3 SWB-1550-1x3-P-1-FA de OeMarket, longitud de onda de trabajo 1550 ± 40 nm, tasa de acoplamiento 33:33:33, en fibra óptica SMF-28e.
5. Aislador en fibra óptica ISO-S-1550-A-1-FA de OeMarket, longitud de onda de trabajo 1550 ± 15 nm, aislamiento de 46 dB, conectores FC/APC.
6. Fotodetectores PIN InGaAs 2.5 GHz PD-A-25-9-1-FP de OeMarket, rango de detección de 1100-1650 nm, corriente de oscuridad de 0.1 nA, responsividad de 0.90 A/W a 1550 nm.
7. Pinzas para fibra óptica con cubierta de 250 μ m modelo T711-250 de Thorlabs.

EQUIPOS

1. Osciloscopio digital de fosforo modelo TDS 3034C marca Tektronix, ancho de banda de 300 MHz, frecuencia de muestreo de 2.5 GS/s.
2. Fuente de voltaje variable MPS-3005L-3 marca MATRIX, rango de voltaje de salida de 0 – 30 VCC, rango de salida de corriente de 0 – 5 A.
3. Analizador de espectros ópticos Q8381 de ADVANTEST, opera en el rango de 600 a 1750 nm, resolución mínima de 0.1 nm.

4. Analizador de espectros ópticos, FIBERER-OSA-M-(1525-1565), rango de operación de 1525 – 1565 nm, resolución de 2 pm, rango de operación en potencia de -75 a +5 dBm, y repetitividad de ± 5 pm.
5. Multímetro óptico, OMM-6810B de ILX LIGHTWAVE con cabezal de detección para medición en el rango de 950 – 1650 nm.
6. Fuente de luz superluminiscente SLD1005S de Thorlabs, perfil espectral cuasi-Gausiano, bajo rizo, longitud de onda central 1550 nm, ancho de banda 50 nm, potencia de emisión máxima 20 mW.
7. Controlador de temperatura y corriente LDC3744B, ILX Lightwave, para la fuente de luz superluminiscente.

Anexo 4. Trabajos publicados de la investigación desarrollada

ARTÍCULOS

1. A. Pérez-Alonzo, F. Velazquez-Carreón y G. E. Sandoval-Romero, «Biaxial FBG vibration sensor with a single edge filter and matching demodulation, » IEEE Access, vol. 10, pp. 127798-127805, 2022.
2. A. Pérez-Alonzo y G. E. Sandoval-Romero, «Accelerometer prototype based on enhanced fiber Bragg grating overlapping interrogation method, » Optik, vol. 242, n° 167027, pp. 1-10, 2021.

PROCEEDINGS

3. A. Pérez-Alonzo, F. Velazquez-Carreón y G. E. Sandoval-Romero, «Data acquisition based on a single-board computer for a low-frequency optical accelerometer, » IEEE 30th International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Istanbul, Turkey, December 4-7, 2023.
4. A. Pérez-Alonzo, F. Velazquez-Carreón y G. E. Sandoval-Romero, «High sensitivity three-axis optical vibration sensor for low-frequency measurement, » The 2023 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM23), GECE, Seoul, Korea, August 19-18, 2023.

Received 8 November 2022, accepted 25 November 2022, date of publication 6 December 2022, date of current version 12 December 2022.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2022.3227050

RESEARCH ARTICLE

Biaxial FBG Vibration Sensor With a Single Edge Filter and Matching Demodulation

ABRAHAM PEREZ-ALONZO^{1,2}, FERNANDO VELÁZQUEZ-CARREÓN^{1,2},
AND GABRIEL EDUARDO SANDOVAL-ROMERO^{1,2}

¹Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City 04510, Mexico

²Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City 04510, Mexico

Corresponding author: Abraham Perez-Alonzo (a.perez.iee.daia@gmail.com)

This work was supported by the Dirección General de Asuntos del Personal Académico—Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM) under Project PAPIIT IT101019. The work of Abraham Perez-Alonzo was supported by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) through the master's and Ph.D. Engineering Program at the Universidad Nacional Autónoma de México.

ABSTRACT This work developed, simulated, and characterized a high sensitivity vibration sensor for low-frequency applications. The fiber Bragg grating (FBG) overlapping method was used to demodulate the wavelength shift of the sensing gratings, but only one FBG for each axis was utilized (unlike two FBGs in the common approach), along with another one acting as a filter for both axes and temperature compensator; this enhanced method could measure acceleration in two axes simultaneously, although only the X-axis had constant sensibility in the entire operating range. The difficulty in achieving constant sensitivity in both axes lies in the need to match three Bragg gratings, resulting in a set of gratings with similar Bragg wavelengths. The new results showed constant sensitivity in both accelerometer axes (0.735 and $0.684 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^2$ for the X- and Y-axis, respectively). The usable frequency and acceleration amplitude ranges were from 0.5 to 20 Hz and from 14×10^{-3} to 9 m/s^2 , respectively, which both meet the requirements for detecting seismic-induced movements. Furthermore, the present results demonstrate that we can utilize a smaller number of gratings in accelerometer development compared to the common approach.

INDEX TERMS Biaxial accelerometer, FBG interrogation, vibration sensing, vibrometer.

I. INTRODUCTION

Buildings may be greatly affected by seismic movements, whose effect on them must thus be monitored. The response and health of buildings can be effectively assessed by measuring the spectral acceleration of their movement induced by ground motion [1], [2]. Optical sensors, compared to electronic ones, offer advantages such as electromagnetic interference immunity and high sensitivity that make them suitable for installation in all types of building, regardless of the electromagnetic noise level.

Several types of fiber Bragg grating (FBG)-based accelerometers have been developed in one, two, or three axes. For example, a uniaxial device includes a microstructure for measuring vibration and temperature simultaneously,

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Md. Selim Habib¹.

within a 0.5 – 10 Hz range, and it uses filters and photodetectors to demodulate the FBG Bragg wavelength [3]. A two-dimensional (2D) vibration sensor [4] has been endowed with adjustable sensitivity to make it equal in both axes within a detection range of 0 – 180 Hz; however, no measurements under 20 Hz have been reported, and an interrogator was used to demodulate the FBG Bragg wavelength. A biaxial accelerometer using only 2 FBGs arranged on one axis and relying on axial and transverse forces has also been developed [5]. It has a resonant frequency of 34.42 Hz and needs an interrogator to demodulate its wavelength shift. Reference [6] presented a biaxial vibration sensor based on a multiaxis flexure hinge, with a measurement range of 5 – 170 Hz and the same sensitivity in the two axes. However, for the application at which our work aims, this frequency range is not sufficiently low and requires the use of an interrogator.

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Optik

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijleo

Accelerometer prototype based on enhanced fiber Bragg grating overlapping interrogation method

Abraham Perez-Alonzo^{a,*}, G.E. Sandoval-Romero^b

^a Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Edificio S-Bernardo Quintana Arrijoa, Ciudad Universitaria, Mexico City 04510, Mexico

^b Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, Mexico City 04510, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:

Accelerometer
Fiber Bragg grating
FBG overlapping interrogation
Biaxial sensor
Ratiometric interrogation method

ABSTRACT

This paper presents the development and analysis of an optical biaxial accelerometer based on fiber Bragg gratings (FBGs) using an enhanced ratiometric interrogation method: Bragg grating overlapping interrogation. Typically, this method requires two FBGs for each sensing axis in the accelerometer. However, the configuration employed in this study comprises only one grating for each sensing axis and one reference FBG that demodulates the Bragg wavelength changes of both sensing FBGs, in addition to performing temperature compensation. This modified scheme enables the use of fewer gratings without requiring an interrogator, a device often unsuitable for in-field applications. This prototype is also temperature-insensitive, with a usable acceleration range of 0.1–1.0 g ($1\text{ g} = 9.8\text{ m/s}^2$) for measuring the acceleration amplitudes of objects moving at frequencies of 0.1–20 Hz. These findings show that the developed prototype 2D accelerometer is suitable for real-world seismic applications.

1. Introduction

Accelerometers are widely used in various applications, such as rotary machine vibration monitoring, detection of structural faults and orientations of objects, and seismograph signal detection [1]. They are especially employed for earthquake detection [2] in regions with high seismic activity, e.g. Mexico City, where an increasing demand for installed cost-efficient sensors is arising.

In recent years, the use of fiber optic sensors has increased. Such sensors appear to be preferable for future application in several fields, such as instrumentation and automation of existing and new civil assets, and prediction of faults in expensive machinery. The use of fiber optic sensors in such applications results in good reliability and cost-efficiency. These sensors are stable and insensitive to electric perturbations. Multiple parameters can be measured with a single sensor: this was done, for example, by Liu et al. [3], who in 2012 introduced a multiplexed fiber Bragg grating monitoring system that simultaneously monitored temperature, strain, displacement, and seepage pressure in a coalmine.

Fiber optic sensors offer certain advantages over other types of sensors. For example, they can be used in distributed sensing [4] to sense multiple points at a cost lower than that of using individual single-point sensors. This provides more accurate and reliable knowledge regarding buildings and systems. In addition, fiber optic sensors are immune to electromagnetic interference (EMI) and are highly sensitive. Fiber Bragg grating (FBG)-based sensors use the strain or temperature changes experienced to measure the parameter

* Corresponding author.

E-mail addresses: a.perez.iee.daia@gmail.com (A. Perez-Alonzo), eduardo.sandoval@icat.unam.mx (G.E. Sandoval-Romero).

Data acquisition based on a single-board computer for a low-frequency optical accelerometer

Abraham Perez-Alonzo
Instituto de Ciencias Aplicadas y
Tecnología
Universidad Nacional Autónoma de
México
Mexico City, Mexico
a.perez.ice.daia@gmail.com

Fernando Velazquez-Carreón
Instituto de Ciencias Aplicadas y
Tecnología
Universidad Nacional Autónoma de
México
Mexico City, Mexico
f.velazqu@ciencias.unam.mx

G. E. Sandoval-Romero
Instituto de Ciencias Aplicadas y
Tecnología
Universidad Nacional Autónoma de
México
Mexico City, Mexico
eduardo.sandoval@icat.unam.mx

Abstract—The response of buildings to seismic events helps us to evaluate their health condition, this is critical in places with high seismic activity as in Mexico City. In this work, a continuous recording system designed for a triaxial optical accelerometer based on fiber Bragg gratings oriented to structural health monitoring (SHM) is presented. The optical/electrical conversion circuit, the cost-effective data acquisition system (DAS) using a Raspberry Pi and the software design to record and visualize the data are presented. The frequency sample achieved in reading the three channels of the optical accelerometer was 75 Hz, sufficient to record vibrations with a frequency range of 0.5–20 Hz. At the same time, the graphs are displayed locally on a monitor.

Keywords—data acquisition, single-board computer, raspberry Pi, optical accelerometer

I. INTRODUCTION

When we develop a sensor, it is always a part of a larger system que may incorporate, among others, signal conditioners and a data acquisition system [1]. Commercial systems are reliable but in certain cases they have a high cost, and they are not suitable for use in single units, so the search for cost-effective systems is growing in recent years [2]. Many of these systems are based on single-board computers (SBCs) which are low-cost, credit card sized, complete computers suitable for portable devices.

One of the most common SBC models is the Raspberry Pi which is widely used in projects in a variety of fields such as video transcoding for video streaming [3], health care systems [4], weather monitoring systems [2], mobile payment [5], monitoring of electrical quantities [6], electrical machine inspection [7], garbage classification [8], among many others [9]. The Raspberry Pi includes a graphics processing unit which allow us to display real-time graphics with the local data.

On the other hand, this work integrates data acquisition with a low-frequency, high sensitivity optical accelerometer for application in structural health monitoring (SHM). In SHM, accelerometers are used to record the response of structures to vibrations for modal analysis, for example. FBG-based optical accelerometers have high sensitivity and are immune to electromagnetic interference (EMI), which makes them suitable for measuring weak accelerations due to seismic motions. The triaxial accelerometer we use in this work has the same operation principle as the biaxial accelerometer of [10] where we could use a smaller number of fiber Bragg gratings (FBGs).

We perform the integration of our triaxial optical accelerometer with data acquisition, describe the optical/electric conversion circuit, the analog-to-digital converter (ADC) and the Raspberry Pi used as a computer, together with the software developed to read and record permanently, and to display the graph with the measured accelerations.

II. EXPERIMENTAL SETUP

A. Triaxial optical accelerometer

The structure of the optical accelerometer is shown in Fig. 1, this accelerometer is based on FBGs. FBGs are simple devices inscribed in an optical fiber and are sensitive to temperature and strain changes, they are wavelength modulated and normally require the use of interrogator equipment to demodulate their Bragg wavelength changes. The interrogator is a good equipment, but in most cases, it is quite expensive for use in individual sensors. Due to the mentioned drawback, some researchers are in the development of low-cost optical interrogator systems [11]. In this accelerometer we use an interrogation scheme that consists in the superposition of the sensing FBGs spectra with a “reference-FBG” and then the changes of the accelerometer output signal are modulated in light intensity. After that, we do not need to use an interrogator, but only a photodetector for each axis.

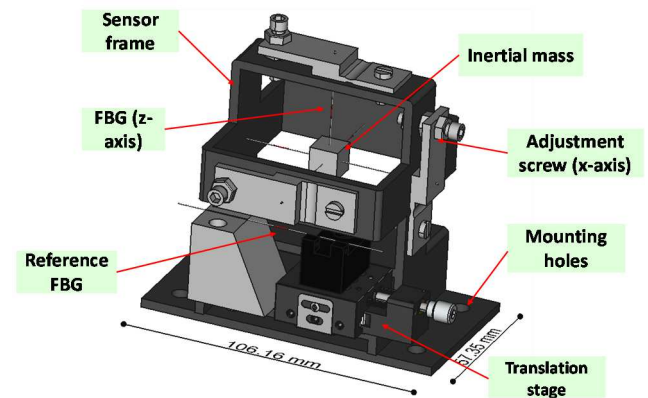


Fig. 1. Schematic of the structure of the triaxial accelerometer. Only one fiber Bragg grating (FBG) is used for each sensing axis.

The optical working principle of our triaxial sensor is the same as in [10] where we use one FBG less in a biaxial sensor but, to fully characterize the motion of a building we need a three-axis sensor, for this reason we developed the triaxial accelerometer whose schematic is shown in Fig. 1, in the case of the triaxial accelerometer we used two FBGs less, this when compared to the traditional method. We achieve this by using

This work was supported by Dirección General de Asuntos del Personal Académico, Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM) under the PAPIIT IT104123 project.

High sensitivity three-axis optical vibration sensor for low-frequency measurement

*A. Perez-Alonzo¹⁾, F. Velazquez-Carreón²⁾ and G. E. Sandoval-Romero³⁾

^{1), 2)} *Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM, Mexico City 04510, Mexico*

^{1), 2), 3)} *Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM, Mexico City 04510, Mexico*

¹⁾ a.perez.iee.daia@gmail.com

ABSTRACT

An enhanced three-axis optical vibration sensor with high sensitivity for low-frequency vibration measurement is presented. A new optical scheme approach for the sensor based on fiber Bragg gratings (FBGs) is proposed. This scheme allows us to utilize only one FBG for each axis, requiring two fewer FBGs compared to the traditional approach and without the need for a FBGs interrogator equipment. The intended measurement range is 0.2 to 20 Hz in frequency and ± 5 m/s² in acceleration amplitude. First, a simulation was performed to ensure that the natural frequency of the sensor was more than twice the upper limit of the range. We used a 12 grams lead cubic inertial mass, and the internal frame size is 60 mm in all three axes. The simulated natural frequency of the sensor with the specified parameters was 74 Hz, with FBGs pre-stressed to 0.2 N. The sensor was later implemented using 3.2 mm thick structural steel for the frame. The output optical signal of each axis of the sensor is converted by a photodetector to electrical current, amplified, and converted into a digital signal by an ADS1115. The sensor was mounted on an optical table to preliminarily measure laboratory vibrations and the signals are permanently recorded at 75 samples per second. The high sensitivity of the sensor is proved by the registration of a weak seism of magnitude 3.0 that occurred in Mexico City on May 10th, 2023.

1. INTRODUCTION

Accelerometers are frequently employed in Structure Health Monitoring (SHM) to monitor building response to movements, and in seismic locations, the predominant motions are those caused by earthquakes (Parisi 2022). The significance of these devices is that they are part of an early warning system designed to protect human life and support infrastructure conservation efforts (Ali 2023). Among the several types of

¹⁾ PhD Candidate

²⁾ PhD Candidate

²⁾ Professor