



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

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN
ACELERÓMETRO EN MÁS DE UN EJE UTILIZANDO REJILLAS DE BRAGG EN
FIBRA ÓPTICA

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

PRESENTA:
ABRAHAM PÉREZ ALONZO

TUTOR PRINCIPAL
DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO, ICAT

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. OCTUBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



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. GARCÍA VALENZUELA AUGUSTO
Secretario: DR. HERNÁNDEZ CORDERO JUAN A.
Vocal: DR. SANDOVAL ROMERO GABRIEL EDUARDO
1^{er} Suplente: DR. CEBALLOS HERRERA DANIEL ENRIQUE
2^{do} Suplente DR. GARDUÑO MEJÍA JESÚS

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

TUTOR DE TESIS:
DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO

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 Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado para dedicarme de tiempo completo a la Maestría.

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

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.

A mi compañero de laboratorio Miguel Ángel Casas Ramos por su apoyo brindado en la realización de este trabajo.

Resumen

En este trabajo de tesis se realiza la instrumentación y el análisis de dos dispositivos que miden la aceleración del objeto al que se sujetan, uno uniaxial y otro biaxial, basados en rejillas de Bragg en fibra óptica (Fiber Bragg Grating - FBG, por sus siglas en inglés). Los dispositivos experimentales aquí descritos están modelados en forma de un sistema masa-resorte. La fibra óptica de la FBG se comporta como un resorte y la FBG funciona como un sensor intrínseco de desplazamiento.

Los acelerómetros basados en FBG's, en donde la FBG actúa como sensor de desplazamiento, tienen ciertas ventajas respecto a los acelerómetros mecánicos o electrónicos, por ejemplo, son inmunes a la interferencia electromagnética, tienen mayor sensibilidad, entre otras.

Un acelerómetro basado en fibra óptica, normalmente utiliza dos FBG's para cada eje de sensado, una se utiliza como referencia y la otra como elemento sensor; en este trabajo se utiliza una FBG de referencia que sirve de filtro para los dos ejes del dispositivo experimental biaxial que finalmente se quiere investigar. Se realiza la implementación de los dispositivos y se determinan sus características de sensibilidad, rango operativo y linealidad. Los dispositivos desarrollados miden la aceleración de movimientos oscilatorios, por esto se puede decir que se realizó la instrumentación de un prototipo de acelerómetro uniaxial capaz de medir la aceleración de oscilaciones con frecuencias comprendidas entre 0.01 y 50 Hz y en amplitud de aceleración de 0.16 a 1.2 g, por otro lado, que se instrumentó un prototipo de acelerómetro biaxial, en ejes x e y , con un rango de medición de 0.1 a 30 Hz en frecuencia y de 0.01 a 1 g en amplitud de aceleración.

Índice general

RESUMEN	VII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	XV
1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. ANTECEDENTES	19
1.2. JUSTIFICACIÓN	20
1.3. HIPÓTESIS	20
1.4. OBJETIVOS	20
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	20
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	21
2. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. SENSORES.....	23
2.1.1. <i>Modelos matemáticos de un sensor</i>	24
2.1.2. <i>Características de un sensor</i>	26
2.1.3. <i>Relación Señal- Ruido</i>	27
2.2. SENSORES EN FIBRA ÓPTICA	28
2.2.1. <i>Esquema de un sensor en fibra óptica</i>	28
2.2.2. <i>Clasificación de los sensores en fibra óptica</i>	29
2.3. SENSORES ÓPTICOS EN REJILLAS DE BRAGG.....	30
2.3.1. <i>Rejilla de Bragg en fibra óptica</i>	30
2.3.2. <i>Sensores lineales inerciales (Acelerómetros)</i>	34
3. MARCO METODOLÓGICO.....	41
3.1. ACCELERÓMETRO BASADO EN FBG	42
3.1.1. <i>Metodología del funcionamiento del sensor</i>	42
3.1.2. <i>Comportamiento mecánico de la FBG</i>	43
3.2. ESQUEMA ESTRUCTURAL DE LOS DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES	45

3.3.	TÉCNICA DE SUPERPOSICIÓN DE REJILLAS BRAGG	49
3.4.	ESQUEMA ÓPTICO DE LOS DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES	53
3.5.	DETERMINACIÓN DEL VALOR DEL DESPLAZAMIENTO δA	55
4.	RESULTADOS.....	59
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS	59
4.1.1.	<i>Caracterización de filtro Notch a 60 Hz.....</i>	<i>59</i>
4.1.2.	<i>Caracterización de filtro Notch a 120 Hz.....</i>	<i>59</i>
4.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS ÓPTICOS	60
4.2.1.	<i>Caracterización espectral de las rejillas de Bragg (FBG).....</i>	<i>60</i>
4.2.2.	<i>Caracterización de acopladores 1x2.....</i>	<i>64</i>
4.2.3.	<i>Espectro de emisión de la fuente superluminiscente S5FC1005SXL.....</i>	<i>65</i>
4.2.4.	<i>Potencias en las diferentes secciones del circuito óptico del dispositivo experimental biaxial 66</i>	
4.3.	CARACTERIZACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES.....	67
4.3.1.	<i>Deducción de la aceleración g a partir del desplazamiento δA de la FBG de sensado..</i>	<i>67</i>
4.3.2.	<i>Relación señal a ruido de las mediciones del voltaje de salida del sensor experimental</i>	<i>70</i>
4.3.3.	<i>Características del dispositivo experimental uniaxial.....</i>	<i>71</i>
4.3.4.	<i>Características del dispositivo experimental biaxial.....</i>	<i>72</i>
	CONCLUSIONES.....	77
	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	ANEXO A: PROGRAMAS EN MATLAB UTILIZADOS PARA SIMULACIÓN.	83
	ANEXO B: DIAGRAMAS ELÉCTRICOS DE LOS CIRCUITOS UTILIZADOS.....	85
	ANEXO C: LISTA DE EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS EN LOS SENSORES.....	89

Índice de figuras

Fig. 2.1. Aproximación lineal de una función de transferencia no lineal (a) y linealidad independiente (b) [1].	27
Fig. 2.2. Esquema general de un sensor basado en fibra óptica.	28
Fig. 2.3. Fabricación de una rejilla Bragg [12].	31
Fig. 2.4. Concepto de rejilla de Bragg. (a) Rejilla de Bragg, (b) señal reflejada, (c) señal transmitida [12].	32
Fig. 2.5. Rejillas de Bragg: definiciones básicas [12].	32
Fig. 2.6. Concepto de un acelerómetro mecánico lineal [1].	35
Fig. 2.7. Desplazamientos que ocurren de una onda armónica plana P (a) y onda S (b) viajando horizontalmente a lo largo de la página. La propagación de la onda S es cortante sin cambio de volumen con movimiento de la partícula transversal a la dirección de propagación, mientras que las ondas P implican cambio de volumen y también cambio en la forma del material en la dirección de propagación [23].	38
Fig. 2.8. Ondas de superficie Love (a) con movimiento de la partícula perpendicular a la trayectoria, y ondas de superficie Rayleigh (b) con movimiento horizontal y vertical en un plano elíptico orientado en la dirección de propagación [23].	39
Fig. 3.1. Esquema del dispositivo experimental uniaxial en el que también se muestra el método usado para calibración llamado de “deflexión del haz láser” y que está integrado por el láser rojo, el espejo adherido a la superficie de la pinza que sujeta a la fibra y el fotodetector de volumen.	41
Fig. 3.2. Fotografía del dispositivo experimental uniaxial, en el que además se aprecia el láser y el fotodetector de volumen utilizado para medir desplazamiento por medio del OBDM.	42
Fig. 3.3. Esquema de un sensor de desplazamiento basado en FBG [12].	43
Fig. 3.4. Sección transversal de una barra deformada por elongación [25].	44
Fig. 3.5. Esquema estructural del sensor uniaxial.	46
Fig. 3.6. Fotografía del sensor experimental uniaxial.	46
Fig. 3.7. Esquema estructural del sensor experimental de dos ejes: x e y	47
Fig. 3.8. Dos vistas de la pinza para sujetar dos fibras ópticas formando un ángulo de 90 grados entre ellas.	47
Fig. 3.9. Gráfica que ilustra la relación entre el desplazamiento δA y $\delta AX = \delta AY$	48
Fig. 3.10. Fotografía del sensor experimental de dos ejes.	48
Fig. 3.11. Comparación espectral de la reflectividad de la FBG SN: 140911-18 considerando su espectro real y su espectro teórico por aproximación Gaussiana con $\lambda B = 1519.69 \text{ nm}$	50

Fig. 3.12. Diagrama del esquema de interrogación por rejillas superpuestas.	51
Fig. 3.13. La potencia medida por el fotodetector depende de la diferencia relativa de la longitud Bragg de las rejillas. a) Potencia reflejada mínima, b) Potencia reflejada media, c) Potencia reflejada máxima.	52
Fig. 3.14. Potencia óptica que incide en el fotodetector vs diferencia relativa de las longitudes de Bragg de las FBG's.	53
Fig. 3.15. Esquema óptico del sensor experimental uniaxial.	54
Fig. 3.16. Esquema óptico del sensor experimental de dos ejes implementado.	55
Fig. 3.17. Esquema que muestra las partes que integran el método de deflexión del haz láser: láser, espejo fijado en la superficie de la pinza para fibra óptica y fotodetector.	56
Fig. 3.18. Esquema para determinar la deformación de la fibra óptica, δA , a partir del desplazamiento h	57
Fig. 3.19. Calibración del desplazamiento h en la superficie del fotodetector. a) Calibración del máximo, b) calibración del mínimo, c) Posición final.	57
Fig. 4.1. Filtro Notch 60 Hz con amplificación de 9.2 dB y atenuación de 21.2 dB a 60 Hz	59
Fig. 4.2. Respuesta en frecuencia del filtro Notch a 120 Hz con ganancia de -31.1 dB a 120 Hz. .	60
Fig. 4.3. Espectro de reflexión de las FBG's, ya montadas en el experimento.	61
Fig. 4.4. Espectro de transmisión de las FBG's montadas en el experimento.	61
Fig. 4.5. Diagrama utilizado para el análisis de la sensibilidad de las FBG's.	62
Fig. 4.6. Desplazamiento de la longitud de onda Bragg de las FBG's utilizadas en el dispositivo experimental con respecto a la deformación que se le aplica.	63
Fig. 4.7. Espectros de transmitancia de la FBG de referencia SN: 140911-1.	64
Fig. 4.8. Acoplador 1x2 modelo SWB-1550-1x2-P-50/50-1-FA.	64
Fig. 4.9. Comparación de la sensibilidad del circulador con respecto a la de un acoplador en el sensor experimental.	65
Fig. 4.10. Espectro de emisión de la fuente SFS modelo S5FC1005SXL.	66
Fig. 4.11. Potencias en las diferentes secciones del circuito óptico del dispositivo experimental biaxial.	67
Fig. 4.12. Gráfica del ruido presente en las mediciones de la señal del voltaje de salida del sensor. El ruido tiene una amplitud de 14.8 mVpp.	70
Fig. 4.13. Ejemplo de una señal en tiempo obtenida a la salida del dispositivo sensor.	71
Fig. 4.14. Respuesta en frecuencia del dispositivo uniaxial obtenida experimentalmente a 1, 2, 3, y 4 Vpp de alimentación del electroimán.	71
Fig. 4.15. Voltaje de salida del sensor con respecto a la aceleración ejercida sobre el a diferentes frecuencias fijas de excitación.	72
Fig. 4.16. Respuesta en frecuencia del eje x del sensor biaxial.	73
Fig. 4.17. Respuesta en frecuencia del eje y del sensor biaxial.	73
Fig. 4.18. Respuesta en amplitud del dispositivo biaxial, eje x	74

Fig. 4.19. Respuesta en amplitud del dispositivo biaxial, eje y.	74
Fig. 4.20. Ajuste por mínimos cuadrados lineal de la respuesta del eje y del dispositivo biaxial a 2 Hz. El coeficiente de determinación es de 0.97.	75

Símbolos y abreviaturas

a	Aceleración a la que se somete el dispositivo experimental [m/s ²]
a_x	Aceleración a la que se somete el dispositivo experimental en el eje x , [m/s ²]
a_y	Aceleración a la que se somete el dispositivo experimental en el eje y , [m/s ²]
AC_1	Acoplador óptico 1x2 que divide la potencia de la luz proveniente de la SFS en el dispositivo experimental biaxial
AC_2	Acoplador 1x2 en el dispositivo experimental biaxial, eje x
AC_3	Acoplador 1x2 en el dispositivo experimental biaxial, eje y
A_{SMF}	Área transversal de una fibra óptica estándar SMF-28e de Corning®, [m ²]
DAC	Sistema de Adquisición de Datos (<i>Data Acquisition System</i> , por sus siglas en inglés)
E	Señal eléctrica de salida de un sensor
E_{SMF}	Módulo de Young de la fibra óptica SMF-28e de Corning ® que contiene a la FBG, [Pa]
EMI	Interferencia electromagnética (<i>Electromagnetic Interference</i> , por sus siglas en inglés)
f	Frecuencia, [Hz]
f_0	Frecuencia natural (resonante), [Hz]
F	Fuerza axial, [N]
FBG	Rejilla de Bragg en fibra óptica (<i>Fiber Bragg Grating</i> , por sus siglas en inglés)
FBG_{S_X}	FBG de sensado del eje x del dispositivo experimental biaxial
FBG_{S_Y}	FBG de sensado del eje y del dispositivo experimental biaxial
FBG_R	FBG de referencia
g	Aceleración de la gravedad, $1 g=9.80665$ [m/s ²]
$G(\lambda)$	Espectro de reflexión de la FBG
$G_R(\lambda)$	Espectro de reflexión de la FBG de referencia
$G_S(\lambda)$	Espectro de reflexión de la FBG de sensado
h	Desplazamiento del spot del haz láser en el fotodetector PD_I [m]
h_{max}	Altura máxima del fotodetector PD_I usada para calibración del OBDM
h_{min}	Altura mínima del fotodetector PD_I usada para calibración del OBDM
k_2	Constante de proporcionalidad de la fibra óptica, también denominada rigidez de la FBG, [N/m]
k_{2X}	Constante de proporcionalidad de la fibra óptica del eje x del dispositivo experimental biaxial, [N/m]
k_{2Y}	Constante de proporcionalidad de la fibra óptica del eje y del dispositivo experimental biaxial, [N/m]

l_1	Longitud entre la superficie de la masa de trabajo y el punto en el espejo donde incide el haz láser, [m]
l_2	Longitud total desde el espejo en que se refleja el haz láser hasta la superficie del fotodetector de volumen PD_1 [m]
l_3	Distancia entre los postes que atan a la fibra óptica de la FBG [m]
l_{3X}	Distancia entre los postes que atan a la fibra óptica de la FBG del eje x en el dispositivo experimental biaxial [m]
l_{3Y}	Distancia entre los postes que atan a la fibra óptica de la FBG del eje y en dispositivo experimental biaxial [m]
m_{eff}	Masa efectiva de la masa de prueba [gramos]
n_{eff}	Índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica estándar SMF-28e de Corning®
nm	Nanómetros, 1×10^{-9} [m]
OBDM	Método de deflexión del haz láser (<i>Optical Beam Deflection Method</i> , por sus siglas en inglés)
OSA	Analizador de espectro óptico (<i>Optical Spectrum Analyzer</i> , por sus siglas en inglés)
PD_1	Fotodetector de volumen utilizado en el OBDM
PD_2	Fotodetector en fibra óptica que recibe la potencia de la luz proveniente de la FBG del eje x
PD_3	Fotodetector en fibra óptica que recibe la potencia de la luz proveniente de la FBG del eje y
pm	Picómetros, 1×10^{-12} [m]
PO_1	Pinza para fibra óptica colocada sobre la placa metálica flexible en el dispositivo experimental uniaxial
PO_2	Pinza para fibra óptica colocada sobre el poste fijo del eje x del dispositivo experimental biaxial
PO_3	Pinza para fibra óptica colocada sobre el poste fijo del eje y del dispositivo experimental biaxial
PO_4	Pinza que sostiene dos fibras ópticas formando un ángulo de 90° entre ellas
P_R	Potencia de la señal en el cálculo de la SNR
P_S	Potencia del ruido en el cálculo de la SNR
P_t	Potencia óptica transmitida por la FBG a su longitud de Bragg, [nW]
P_T	Potencia óptica que recibe la FBG a su longitud de onda de Bragg, [nW]
R	Reflectividad de la FBG, [%]
R_0	Reflectividad máxima de la FBG, [%]
RFI	Interferencia de radio frecuencia (<i>Radio Frequency Interference</i> , por sus siglas en inglés)
s	Estímulo de entrada en un sensor
S	Coefficiente de sensibilidad estática del acelerómetro, cambio en el desplazamiento δ_A de la masa de prueba con respecto a la aceleración [m/g]
SFS	Fuente superluminiscente en fibra óptica, (<i>Superluminescent Fiber Source</i> , por sus siglas en inglés)

SNR	Relación señal a ruido (<i>Signal to Noise Ratio</i> , por sus siglas en inglés)
$S(\lambda)$	Espectro de emisión de la SFS
$u.a.$	Unidades adimensionales
V_{max}	Voltaje de salida del fotodetector PD_1 , cuando este se encuentra a su altura máxima h_{max} , usado para calibración
V_{min}	Voltaje de salida del fotodetector PD_1 , cuando este se encuentra a su altura mínima h_{min} , usado para calibración
V_S	Voltaje de la señal en el cálculo de la SNR
V_R	Voltaje del ruido en el cálculo de la SNR
α	Coefficiente de expansión térmica del material de la fibra óptica, [$^{\circ}C^{-1}$]
ΔT	Cambio de temperatura, [$^{\circ}C$]
$\Delta\lambda_0$	Ancho de banda de la fuente SFS, [nm]
$\Delta\lambda_B$	Desplazamiento de la longitud de onda de Bragg, [nm]
$\Delta\lambda_{BX}$	Desplazamiento de la longitud de onda de Bragg del eje x del dispositivo experimental biaxial, [nm]
$\Delta\lambda_{BY}$	Desplazamiento de la longitud de onda de Bragg del eje y del dispositivo experimental biaxial, [nm]
δ	Diferencia entre el estímulo o mensurando real de entrada y el estímulo medido en un sensor
δ_A	Desplazamiento de la masa de prueba, [m]
δ_{AXY}	Desplazamiento de la masa de prueba en la dirección del eje x o y [m]
ε	Deformación axial unitaria, [ε], u.a.
λ	Longitud de onda en el vacío, [nm]
λ_0	Longitud de onda central de la SFS, [nm]
λ_B	Longitud de onda central de la FBG, [nm]
λ_{BR}	Longitud de onda central de la FBG de referencia, [nm]
λ_{BS}	Longitud de onda central de la FBG de sensado, [nm]
Λ	Periodo de la FBG, distancia de separación entre cada una de las rejillas, [nm]
$\mu\varepsilon$	Micro deformación, $1 \times 10^{-6} [\varepsilon] = 1 [\mu\varepsilon]$
ρ_e	Constante foto-elástica efectiva para una fibra óptica SMF-28e
σ	Esfuerzo, [Pa]
ω_0	Frecuencia circular, [rad/s]

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Un acelerómetro es un instrumento que mide la aceleración del movimiento del objeto al que va unido, es un sensor inercial que no requiere de un sistema de referencia estacionario [1]. Usualmente contiene un sistema masa-resorte unido a su carcasa y un sensor de desplazamiento. Cuando la carcasa del sensor se somete a una aceleración su masa se opone al movimiento ejerciendo una fuerza sobre el resorte, el resorte se deforma de acuerdo con la segunda Ley de Newton y el sensor de desplazamiento mide esa deformación que es proporcional a la aceleración a la que se somete el dispositivo [2].

El diseño de un acelerómetro se puede llevar a cabo de diversas formas dependiendo del tipo de sensor de desplazamiento para monitorear los cambios de la masa inercial con respecto a su carcasa. Existen diversos tipos: mecánicos, capacitivos, piezoresistivos, piezoeléctricos, térmicos, ópticos, entre otros. Dentro de los sensores ópticos, los basados en rejillas de Bragg en fibra óptica han demostrado ser bastante útiles en transductores diseñados para medir diferentes cantidades físicas, incluyendo a la aceleración, o químicas con numerosas ventajas tales como un tamaño pequeño, peso reducido, bajas atenuaciones, inmunidad a la interferencia electromagnética y aislamiento eléctrico. [3].

Los acelerómetros son usados en diversas aplicaciones tales como el monitoreo de vibraciones de maquinaria rotativa para diagnosticar, por ejemplo, el desbalanceo de las condiciones de piezas giratorias donde un acelerómetro puede detectar vibraciones anormales, analizar la forma de estas vibraciones y ayudar a identificar las causas. Otra aplicación es en pruebas estructurales, donde la presencia de un defecto estructural, tal como una grieta, mala soldadura o la corrosión puede cambiar la forma de vibración de la estructura. Los sensores de aceleración también desempeñan un papel importante en la orientación y la dirección de objetos, en la detección de sismos, en la exploración y detección mineral [4].

La primera configuración de un sensor de aceleración óptico se basa en el efecto fotoelástico (*Photoelastic Effect* - PE, por sus siglas en inglés) para alterar las propiedades de transmisión de una varilla rectangular de un material transparente isotrópico que sirve como guía de onda. Sobre la superficie de la varilla se coloca una masa de tal forma que cuando el sensor se somete a una aceleración, la masa produce una deformación en la varilla y esto le provoca birrefringencia; con un polarizador y un analizador se convierten estos cambios a luz modulada en intensidad dependiente de la deformación aplicada. Este montaje utiliza elementos de óptica de volumen por lo que requiere una colocación exacta de los componentes ópticos, su señal de salida es en intensidad y su medición es directa [5]

CAPÍTULO 1 Introducción

Los sensores basados en FBG se diseñan de tal forma que la magnitud física a medir provoque una deformación en la FBG y por tanto un desplazamiento en su longitud de onda Bragg. El cambio en la longitud de onda de Bragg es resultado de la alteración del índice de refracción y del periodo de modulación de la FBG causado por la deformación [6].

Algunos modelos de acelerómetros basados en FBG que se han diseñado utilizan conjuntos cantiléver-masa de tal forma que la FBG se fija y pega a la superficie de la viga y requieren el uso de un dispositivo interrogador para medir sus señales de salida [7]. Otros modelos de acelerómetros uniaxiales y multiaxiales que no requieren del uso de un interrogador utilizan dos FBG's para sensar cada eje y una masa en el centro une a todas las rejillas [8, 9].

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 sensores de alto costo. También se ha utilizado un método para sustituir el uso del equipo interrogador que consiste en utilizar una segunda FBG para convertir el cambio en longitud de onda Bragg de la FBG de sensado a variaciones en potencia y medir estos cambios con un fotodetector; éste método se puede mejorar para aplicarlo en acelerómetros multiaxiales y reducir el número de FBG's utilizados. Además, estos dispositivos se podrían fabricar localmente y así tener una independencia tecnológica.

Un área de utilización de estos dispositivos es la sismología, ya que en lugares donde hay una alta actividad sísmica, como en la Ciudad de México, es necesario incrementar cada vez más el número de sensores instalados para tener una mejor comprensión de los efectos de cada evento sísmico en los edificios y otras estructuras de acuerdo con la intensidad y frecuencia de las ondas sísmicas registradas por los sensores.

1.3. Hipótesis

Se podría utilizar una FBG para cada eje del sensor en lugar de las dos que actualmente se requieren cuando se usa el método de interrogación por rejillas superpuestas, para lo anterior se parte de que la condición necesaria es que se superpongan los espectros ópticos de dos FBG's y en este trabajo proponemos superponer cada una de las rejillas de sensado con una misma que nombramos "de referencia". Con lo anterior cumplimos con la condición necesaria para aplicar el método y reducimos el número de FBG's utilizados.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar, simular e instrumentar un sensor de aceleración de dos ejes, basado en rejillas de Bragg en fibra óptica, que podría funcionar para aplicaciones sísmicas, que sea capaz de medir la aceleración de ondas periódicas cuyas frecuencias estén en el rango de 0.05 - 30 Hz, este rango es deseable ya que la frecuencia de las ondas sísmicas está comprendida entre 0.05 – 20 Hz.

1.4.2. Objetivos específicos

- Proponer y analizar un prototipo de acelerómetro en un eje (uniaxial) para comprobar el método de interrogación por rejillas de Bragg superpuestas.
- Una vez comprobado el método de interrogación por rejillas de Bragg superpuestas, proponer y analizar un prototipo de acelerómetro en dos ejes para tener un sensor biaxial.
- Instrumentar el dispositivo experimental biaxial.
- Estudiar las características de funcionamiento del dispositivo experimental biaxial.

2. Marco teórico

2.1. Sensores

Un *sensor* se define como un “*dispositivo que recibe y responde a una señal o estímulo*”. Esta definición es amplia. De hecho, es tan amplia que cubre casi todo, desde un ojo humano hasta un gatillo en una pistola [1]. El mundo está dividido en objetos naturales y objetos hechos por el hombre. Para dar una definición más cerrada de un sensor, solo se consideran los sensores hechos por el hombre y cuya señal finalmente es de tipo eléctrica, entonces la definición es que un *sensor* es un dispositivo que recibe un estímulo y responde con una señal eléctrica.

El objetivo clave del sensado es determinar el estímulo de entrada desconocido a partir de la salida eléctrica del sensor. Los sensores se necesitan para medir señales desconocidas y parámetros de un sistema de ingeniería y su ambiente. Esencialmente los sensores se necesitan para monitorear y *aprender* del sistema y las interacciones posibles con su alrededor [10].

Los sensores y sistemas de sensores son indispensables en un *sistema de control*, que tiene como propósito generar señales de control las cuales llevarán al *proceso* (o *planta*) que se está controlando de la forma deseada usando varios dispositivos de control.

Existen diferentes tipos y clasificaciones de sensores, se pueden clasificar por su principio de conversión, la cantidad a medir, la tecnología usada o la aplicación [11]. Dependiendo con el propósito de la clasificación es el criterio de clasificación a seleccionar [1].

A continuación se muestran algunas formas prácticas de ver a los sensores:

1. Todos los sensores pueden ser de dos tipos: *pasivos* o *activos*. Un sensor *pasivo* no necesita ninguna fuente de energía adicional sino que genera una señal eléctrica en respuesta a un estímulo externo. Ejemplos son los termopares y un sensor piezoeléctrico. Muchos sensores pasivos son sensores directos.

Los sensores *activos* requieren de energía externa para su operación, la cual es llamada *señal de excitación*. Esta señal es modificada (modulada) por el sensor para producir una señal de salida. Por ejemplo, un termistor es un resistor sensible a la temperatura. No genera una señal eléctrica, pero al pasar la corriente eléctrica (señal de excitación) a través de él, se puede medir su resistencia detectando variaciones en corriente y/o caída de voltaje a través del termistor.

2. Dependiendo de la referencia seleccionada, los sensores se pueden clasificar en *absolutos* y *relativos*. Un sensor absoluto detecta un estímulo en referencia a una escala física absoluta que es independiente de las condiciones de la medición, mientras un sensor relativo produce una señal que se relaciona a un caso especial.

3. Los sensores que se posicionan directamente sobre o dentro del objeto son sensores de *contacto*, y los sensores que perciben a un objeto sin un contacto físico se llaman sensores de *no-contacto*. Ejemplos de éstos últimos son un detector de radiación y una cámara TV. Aún si se dice “no-contacto”, siempre ocurre una transferencia de energía siempre ocurre entre el sensor y el objeto [12].
4. Otra forma de ver a un sensor es considerando algunas de sus propiedades que pueden ser de un interés específico por ejemplo que tengan las mismas características de medición, por el fenómeno de conversión, por el campo de aplicación, o por la cantidad física que miden.

2.1.1. Modelos matemáticos de un sensor

Ideal o teóricamente existe una relación entrada salida (estímulo-respuesta) para cada sensor que se puede expresar en forma de una tabla de valores, gráficas, una fórmula matemática, o como una solución de una ecuación matemática. Cuando la función entrada-salida es invariante en el tiempo es llamada *función de transferencia estática* o simplemente *función de transferencia* [1].

Una función de transferencia estática $E=f(s)$ representa una relación entre el estímulo de entrada s y la señal eléctrica E producida por el sensor a su salida. El sistema de medición empleará una función de transferencia ideal $s = f^{-1}(E) = F(E)$, para obtener el valor del estímulo o mensurando s .

Preferiblemente se debe conocer la ley física o química que forma la base de operación del sensor. En la práctica, no existen fórmulas fáciles de resolver para muchas funciones de transferencia, especialmente para sensores complejos y uno debe recurrir a varias aproximaciones de las funciones de transferencia directa e inversa.

2.1.1.1. Tipos de aproximaciones de una función de transferencia

Una aproximación es la selección de una expresión matemática adecuada que se ajuste a los datos experimentales tanto como sea posible. La aproximación se puede ver como una *curva de ajuste* de los valores observados experimentalmente. La función de aproximación debe ser suficientemente simple para facilidad de cálculo e inversión y otros tratamientos matemáticos. No hay un método definitivo para seleccionar la función más apropiada. Inicialmente uno debe revisar si los datos se pueden ajustar a funciones básicas, si los datos no se ajustan entonces recurrir a un método de ajuste de curva más general.

El modelo más simple de una función de transferencia es el *lineal*. Se describe por la siguiente ecuación (2.1) que representa a una línea recta con ordenada al origen en A. La pendiente de la línea es B, algunas veces llamada *sensibilidad*.

$$E = A + Bs \quad (2.1)$$

Una función de transferencia no lineal se puede aproximar por una función matemática no lineal. Las funciones más útiles son la *logarítmica*, *exponencial* y *potencia*. Estas tres

aproximaciones no lineales anteriores tienen pocos parámetros que se deben determinar durante la calibración.

Cuando el sensor tiene una función de transferencia que no se ajusta a las funciones de aproximación anteriores, entonces se puede tratar de usar otras funciones de aproximación, pero si no se encuentra ninguna, existen otras técnicas que son confiables como: (1) aproximación *polinomial* que consiste en una serie de potencias que pueden aproximar a cualquier función continua sin importar su forma, (2) aproximación *lineal a trozos* que descompone una función no lineal de cualquier forma en secciones y considera a cada sección como lineal, es muy útil en un sistema de adquisición de datos computarizado, (3) *Interpolación Spline*, similar a la interpolación lineal a trozos pero cada sección se representa con un polinomio de primero, segundo o tercer orden.

2.1.1.2. Regresión lineal

Si las mediciones del mensurando durante la calibración no se pueden hacer consistentemente con alta exactitud y se esperan errores aleatorios grandes, el número mínimo de mediciones no dará una exactitud suficiente. Para hacer frente a los errores aleatorios en el proceso de calibración, si se elige una aproximación lineal, se puede usar el método de *mínimos cuadrados* para encontrar la pendiente y la ordenada al origen. El procedimiento es el siguiente:

1. Medir múltiples (k) valores de salida E para los valores de entrada s sobre un rango grande, preferiblemente en todo el rango del sensor.
2. Usar las siguientes fórmulas para regresión lineal para determinar la ordenada al origen A y la pendiente B de la línea recta de la ecuación (2.1) que mejor se ajusta.

$$A = \frac{\sum E \sum s^2 - \sum s \sum s E}{k \sum s^2 - (\sum s)^2}, B = \frac{k \sum s E - \sum s \sum E}{k \sum s^2 - (\sum s)^2} \quad (2.2)$$

donde \sum es la sumatoria sobre todas las k mediciones. Cuando se encuentran las constantes A y B , la ecuación (2.1) se puede usar como una *aproximación lineal* de la función de transferencia experimental.

Calidad de la estimación de la función de aproximación

La *calidad* de una estimación de la función de aproximación depende de muchos factores, tales como la exactitud de los datos, el tamaño del conjunto de datos, el método de estimación, el modelo usado para la estimación, el número estimado de parámetros [13].

Algunas estadísticas de error útiles que indican la calidad de un ajuste por mínimos cuadrados (de la regresión lineal) son:

1. **Suma de errores al cuadrado** (*Sum of Squares Error - SSE*, por sus siglas en inglés): es la suma de los cuadrados de los errores de cada punto de dato respecto del correspondiente punto de la curva de ajuste. Un valor cercano a 0 indica que el modelo y los datos tienen el mejor ajuste.
2. **Error cuadrático medio** (*Mean Square error - MSE*, por sus siglas en inglés): Este es el valor promedio *ajustado* de SSE.

3. **Error de raíz medio cuadrático** (*Root-mean-square error* - **RMSE**, por sus siglas en inglés): Es la raíz cuadrada del MSE.
4. **R-cuadrado**: También llamado *coeficiente de determinación*. R-cuadrado representa que tan bien los datos se ajustan al modelo. Un valor de R-cuadrado cercano a 1 es deseado dado que esto indica un mejor ajuste de los datos con la curva del modelo. Para la regresión lineal, R-cuadrado es simplemente el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson [14].

2.1.2. Características de un sensor

Cuando se selecciona un sensor, el primer paso es establecer los requerimientos para la aplicación en particular. Después, cuando se sabe que se necesita, se estudia la hoja de datos de los sensores. Entonces la tarea es relacionar los requerimientos con la disponibilidad. A continuación se describen las características más típicas que nos permiten describir el funcionamiento de un sensor.

2.1.2.1. Span (Entrada a escala completa)

Al rango dinámico de estímulo que puede convertir un sensor se le llama *span* o *entrada a escala completa* (*Full Scale* - FS, por sus siglas en inglés). Representa la mayor diferencia aritmética entre el mayor y el menor valor que se puede aplicar al sensor sin causar un error grande inaceptable. Para sensores con características muy amplias y respuesta no lineal, el rango dinámico del estímulo de entrada se expresa en decibeles, que es la relación entre el límite superior y el límite inferior. Para indicar correctamente el rango dinámico, éste debe ir acompañado del nivel de referencia utilizado para calcularlo.

2.1.2.2. Salida a escala completa

Salida a escala completa (*Full Scale Output* - FSO, por sus siglas en inglés) para una salida análoga es la diferencia algebraica entre las señales eléctricas de salida medidas cuando se aplica el máximo y el mínimo estímulo de entrada. Para una salida digital es el recuento digital máximo del convertidor A/D para el valor máximo absoluto FS de entrada. Éste debe incluir todas las desviaciones de la función de transferencia ideal.

2.1.2.3. Linealidad

El error de linealidad se especifica para los sensores cuya función de transferencia puede ser aproximada por líneas rectas. El término “linealidad” de hecho hace referencia al grado de “no linealidad” de un dispositivo. Una no linealidad es una desviación máxima (L) de una función de transferencia real de la línea recta de aproximación. Cuando se hace más de una corrida de calibración, se debe de fijar la peor linealidad vista durante cualquiera de los ciclos de calibración. Hay varias formas para especificar la linealidad, dependiendo de cómo se superponga la línea sobre la función de transferencia. Una forma es usar los puntos terminales (Fig. 2.1a), y dibujar una línea recta entre estos puntos. Aquí, cerca de los puntos terminales, el error de linealidad es menor que en los puntos centrales. Otras formas son: linealidad independiente, de punto final, de cruce por cero, de mínimos cuadrados. La linealidad de mínimos cuadrados es referida a la recta de aproximación por mínimos cuadrados.

En algunas aplicaciones, es deseable tener una mayor exactitud en algunas secciones particulares más estrechas del rango de entrada. Por ejemplo un acelerómetro para aplicaciones sísmicas debe tener mayor exactitud en el rango de aceleración desde 0.1 hasta 9.8 m/s². Por esto, un sensor se calibra preferentemente en la región donde se necesita mayor exactitud.

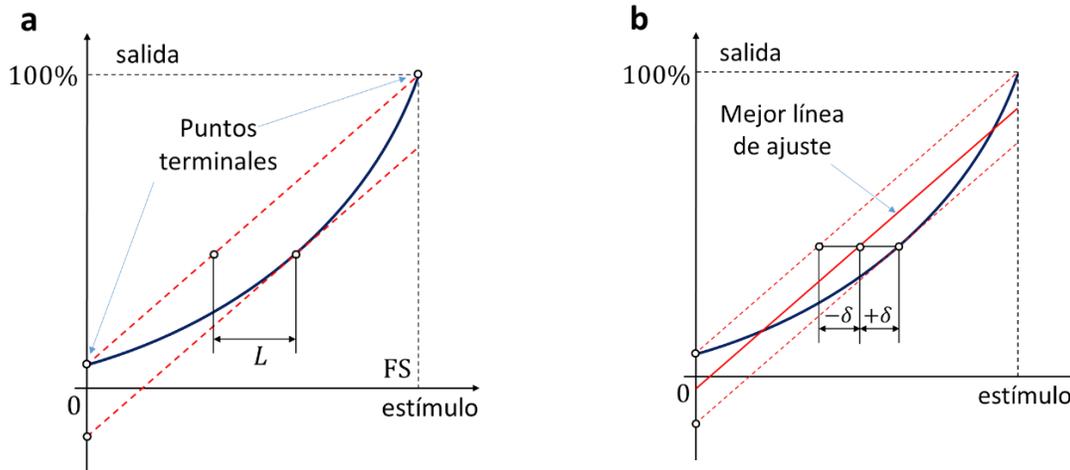


Fig. 2.1. Aproximación lineal de una función de transferencia no lineal (a) y linealidad independiente (b) [1].

La *linealidad independiente* se refiere a la llamada “mejor línea recta”, Fig. 2.1b, la cual es una línea media entre dos líneas rectas paralelas que envuelve a todos los valores de salida de una función de transferencia real.

2.1.3. Relación Señal- Ruido

El ruido es cualquier señal eléctrica presente en un circuito y que no es parte la señal deseada, no incluye las distorsiones debido a no linealidades. Las fuentes de ruido se pueden agrupar en tres categorías: (1) fuentes de ruido intrínseco, que surgen de fluctuaciones aleatorias en los sistemas físicos, tal como el ruido térmico y el ruido de disparo, (2) fuentes de ruido artificiales, tales como motores, interruptores, electrónica digital y radio transmisores, y (3) ruido debido a disturbios naturales, tales como rayos y manchas solares.

El ruido no se puede eliminar sino que sólo reducir en magnitud. Un parámetro para analizar el ruido en los dispositivos es la relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio* - SNR, por sus siglas en inglés).

La SNR en potencia se define como:

$$SNR = \frac{P_S}{P_R} \quad (2.3)$$

o

$$SNR = \left(\frac{V_S}{V_R} \right)^2 \quad (2.4)$$

donde P_S es la potencia de la señal, P_R es la potencia del ruido, V_S es el voltaje de la señal y V_R es el voltaje del ruido.

La SNR, usada en las ecuaciones (2.3) y (2.4) se refieren a relaciones de potencias. Sin embargo, la SNR, a veces se expresa como una relación de voltaje, lo cual se debe especificar porque numéricamente son distintas. Cuando la SNR se especifica en decibeles, la relación de potencia de señal a ruido es $10 \log(P_S/P_R)$, o la relación de voltaje de señal a ruido es $20 \log(V_S/V_R)$. Disminuir el ruido implica tener una mejor SNR [15].

2.2. Sensores en fibra óptica

2.2.1. Esquema de un sensor en fibra óptica

Un sensor en fibra óptica, de manera general se compone de tres partes: fuente de luz, elemento de sensado, que modula la luz, y un detector de luz; el elemento que modula la luz puede ser igual fibra óptica y en ese caso el sensor es conocido como *intrínseco* o si el elemento que modula la luz es algún otro material el sensor es de tipo *extrínseco*, y en este tipo de sensor la fibra óptica solo funciona como medio de transporte para la luz. En el caso de un sensor *intrínseco* la luz no sale de la fibra óptica.

El elemento o material que modula el haz de luz que pasa a través de él responde a los efectos ambientales o variables físicas que se quieren medir y la modulación la puede hacer en términos de intensidad, fase, frecuencia, polarización, contenido espectral, u otros métodos [16].

En la Fig. 2.2 se muestra el esquema general de un sensor en fibra óptica.

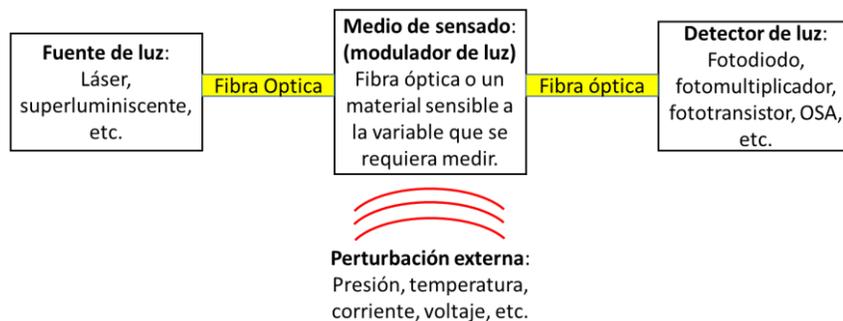


Fig. 2.2. Esquema general de un sensor basado en fibra óptica.

Un sensor de fibra óptica puede afectar una o más de las características de la luz guiada de la fibra transmisora y correlacionar el parámetro de interés (por ej. temperatura, tensión, presión, especies químicas, etc.) a estos cambios en la luz. Por tanto, el principio fundamental es medir un parámetro físico externo induciendo cambios en una o más de las propiedades ópticas de un haz de luz que viaja dentro y a lo largo de la fibra óptica. La fibra óptica es el elemento de sensado así como también el medio de transmisión [12].

Los sensores en fibra óptica representan una base tecnológica que se puede aplicar a multitud de aplicaciones de sensado. Las siguientes son algunas de las ventajas características de la fibra óptica que hace su uso especialmente atractivo para sensores:

- No eléctrico

- A prueba de explosiones
- A menudo no requiere contacto
- Remoto
- Tamaño pequeño y ligeros
- Permite acceso en áreas normalmente inaccesibles
- Potencialmente fácil de instalar
- Inmune a la interferencia de radiofrecuencia (*Radio Frequency Interference* - RFI, por sus siglas en inglés) e interferencia electromagnética (*Electromagnetic Interference* - EMI, por sus siglas en inglés)
- Fiabilidad de estado sólido, es decir, no tienen partes móviles.
- Alta exactitud
- Pueden interactuar con sistemas de comunicación
- Transmisión de datos segura
- Resistente a la radiación ionizante
- Puede facilitar el sensado distribuido

Algunas de las magnitudes físicas que se pueden sensar con fibras ópticas son: intensidad de la luz, desplazamiento, temperatura, presión, rotación, sonido, tensión, campo magnético, campo eléctrico, radiación, flujo, nivel de líquido, análisis químico, vibración, etc.; son solo algunos ejemplos.

2.2.2. Clasificación de los sensores en fibra óptica

Los sensores de fibra óptica, tal vez, se pueden dividir en cinco categorías básicas: sensores de intensidad modulada, sensores de fase modulada, sensores basados en polarización, sensores basados en esparcimiento y sensores de longitud de onda modulada.

A grandes rasgos tenemos que:

1. **Sensores de intensidad modulada:** Los sensores modulados en intensidad generalmente se asocian con desplazamiento o alguna otra perturbación que interactúa con la fibra o un transductor mecánico pegado a la fibra. La perturbación causa un cambio en la intensidad de la luz recibida, la cual es función del fenómeno que se mide. La pérdida de luz se puede asociar con transmisión, reflexión, micro-doblado, u otro fenómeno tal como absorción, esparcimiento o fluorescencia.
2. **Sensores de fase modulada:** Los sensores modulados en fase comparan la fase de la luz en la fibra de sensado con la luz de la fibra de referencia en un dispositivo conocido como interferómetro. La diferencia de fase se puede medir con extrema sensibilidad. Son mucho más exactos que los sensores modulados en intensidad y se pueden usar sobre un rango dinámico mucho mayor. Sin embargo, son mucho más complejos en su fabricación. En la mayoría de los casos, los interferómetros tienen aplicaciones entre algunos campos, como en los sistemas militares donde el costo no es necesariamente el de mayor consideración. Por otra parte, los sensores de intensidad son buenos para su uso en la industria.

- 3. Sensores basados en polarización:** Los sensores basados en polarización se basan en el fenómeno tal como la rotación de Faraday o birrefringencia que puede alterar el estado de polarización, por lo tanto alterando la intensidad de la luz transmitida.
- 4. Sensores basados en esparcimiento:** Los sensores basados en esparcimiento se asocian con tres tipos de esparcimientos de la luz: Rayleigh, Raman y Brillouin. Se detectan anomalías a lo largo de la fibra por cambios en la luz dispersada reflejada a lo largo de la fibra hacia un detector que es incorporado en forma de reflectómetro óptico en el dominio del tiempo. La perturbación de la luz dispersada puede causar un cambio en intensidad o cambio en longitud de onda causado por el parámetro que se mide, típicamente temperatura o tensión.
- 5. Sensores de longitud de onda modulada:** Los sensores modulados en longitud de onda experimentan cambios de longitud de onda asociados con desplazamiento, temperatura o presencia de especies químicas, lo cual causa fluorescencia. Sin embargo, un concepto amplio cuando se usa modulación en longitud de onda es acompañado con rejillas de Bragg. La rejilla de Bragg tiene una condición de resonancia a una longitud de onda específica, la luz a esa longitud de onda es reflejada pero un cambio en tensión o temperatura perturba a la rejilla y causa que la luz que refleja sea a una longitud de onda diferente, por esto es una medición directa del cambio en tensión o temperatura.

2.3. Sensores ópticos en rejillas de Bragg

Las rejillas de Bragg son sensores modulados en longitud de onda [12]. El cambio de la longitud de onda de Bragg es función directa del parámetro que se monitorea. En algunos casos el parámetro fundamental que se mide es la intensidad de la luz, sin embargo, el cambio en longitud de onda es el efecto directo de la perturbación ambiental asociada y es independiente de la intensidad de la fuente de luz. Una ventaja distintiva de las rejillas de Bragg es su capacidad para ser usados en sensores cuasi-distribuidos. Se pueden usar en esquemas de multiplexado por división de longitud de onda sin filtros de codificación en longitud de onda adicionales.

2.3.1. Rejilla de Bragg en fibra óptica

2.3.1.1. Concepto de rejilla de Bragg

Las rejillas de Bragg son dispositivos simples y pasivos, el núcleo de la fibra tiene una variación del índice de refracción inscrito con luz ultravioleta intensa usando un enfoque holográfico o máscara de fase [17] como se muestra en la Fig. 2.3.

2.3 Sensores ópticos en rejillas de Bragg

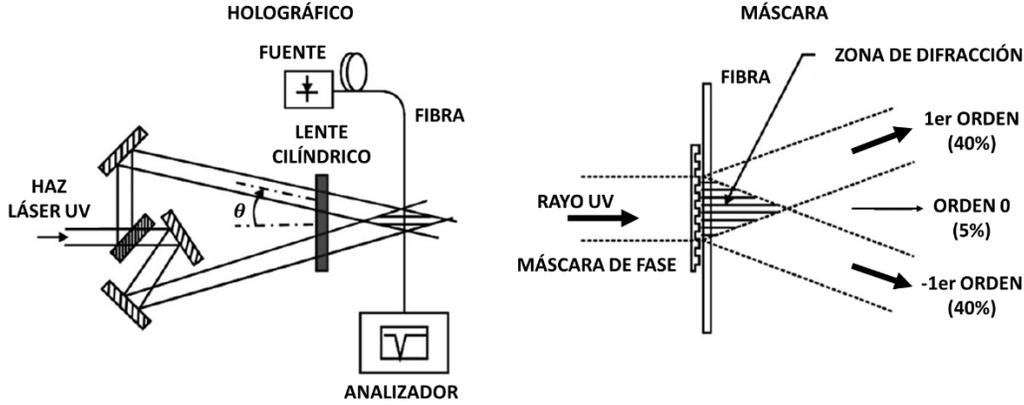


Fig. 2.3. Fabricación de una rejilla Bragg [12].

En la Fig. 2.4 se ilustra el concepto de rejilla de Bragg, el cambio pico del índice de refracción (Δn) en la región de la rejilla es de 10^{-5} a 10^{-3} . El espaciamiento entre periodos de la rejilla es Λ . La longitud de la rejilla típicamente es de 1 a 20 mm.

La longitud de onda pico del espectro de reflexión asociado con una rejilla de Bragg en particular se puede encontrar primero iniciando con la ecuación de condición resonante de acoplamiento en una fibra óptica:

$$\beta_1 - \beta_2 = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.5)$$

donde β_n es la constante de propagación del modo, y Λ es el periodo de la perturbación del índice de refracción. Sustituyendo β en el caso donde la energía es acoplada a un modo de contra propagación [12], las constantes de propagación tienen signos opuestos [18],

$$\frac{2\pi n_{\text{eff}1}}{\lambda_B} - \left(-\frac{2\pi n_{\text{eff}2}}{\lambda_B}\right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.6)$$

La longitud de onda resonante de Bragg se puede encontrar a como sigue:

$$\lambda_B = (n_{\text{eff}1} + n_{\text{eff}2})\Lambda \quad (2.7)$$

donde n_{eff} define al índice efectivo del modo típicamente con valor de

$$n_{\text{eff}} = n_{\text{rev}} + 0.6(n_{\text{nucleo}} - n_{\text{rev}}) \quad (2.8)$$

donde n_{nucleo} y n_{rev} son los valores del índice de refracción del material para el núcleo y revestimiento de la fibra respectivamente.

En el caso de una fibra monomodal donde la energía es intercambiada entre el modo fundamental de propagación y el modo fundamental de contra propagación, esto se reduce a la expresión familiar

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2.9)$$

Por tanto, la longitud de onda de Bragg (λ_B) de una FBG es función del índice de refracción efectivo de la fibra (n_{eff}) y de la periodicidad de la rejilla (Λ).

CAPÍTULO 2 Marco teórico

La Fig. 2.4a muestra el concepto de la perturbación periódica que es la responsable de este acoplamiento resonante, así como del espectro de transmisión y reflexión resultante para una rejilla de Bragg típica. La luz reflejada de cada plano de la rejilla se unirá con las otras reflexiones en contra propagación. La suma puede ser constructiva o destructiva, dependiendo de si la longitud de onda de la luz entrante cumple con la condición de Bragg.

A longitudes de onda que no satisfacen la condición de Bragg, la luz pasa a través de la rejilla sin cambios. Sin embargo, a la longitud de onda de Bragg, la señal es reflejada como se muestra en la Fig. 2.4b. La intensidad de la señal reflejada depende del cambio del índice de refracción que comprende la rejilla y la longitud de la rejilla.

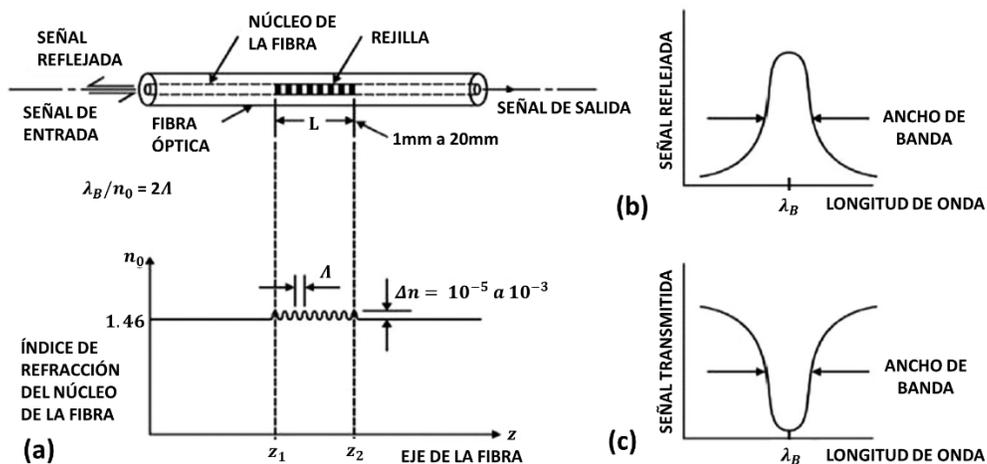


Fig. 2.4. Concepto de rejilla de Bragg. (a) Rejilla de Bragg, (b) señal reflejada, (c) señal transmitida [12].

Las rejillas descritas anteriormente se basan en un perfil uniforme donde los cambios en el índice de refracción y el periodo son uniformes. Se pueden usar otros perfiles para darle propiedades únicas a las rejillas. La Fig. 2.5 muestra los perfiles uniforme, apodizado y periodo no uniforme (chirp). El perfil apodizado modifica espacialmente la amplitud del cambio del índice de refracción. El perfil “chirp” tiene un periodo de rejilla no uniforme. Estos perfiles le agregan propiedades únicas de sensado a las rejillas.

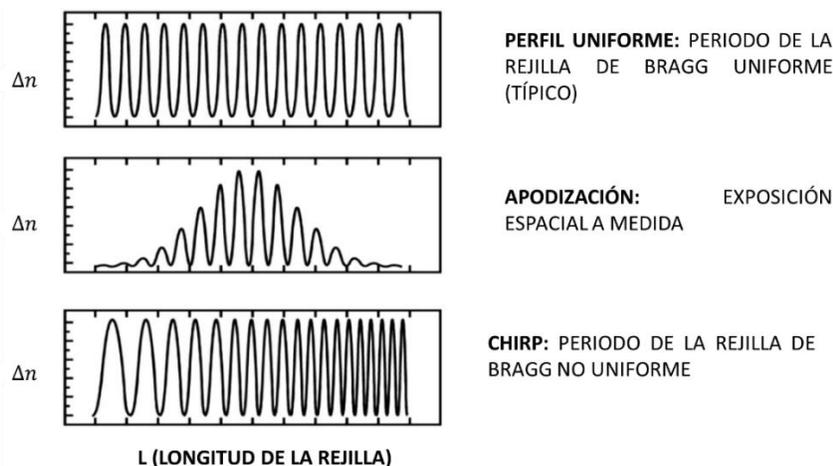


Fig. 2.5. Rejillas de Bragg: definiciones básicas [12].

2.3 Sensores ópticos en rejillas de Bragg

Esencialmente, cualquier agente que sea capaz de cambiar Λ desplazará el espectro reflejado centrado a la longitud de onda de Bragg. Una deformación longitudinal, debido a una fuerza externa, por ejemplo, puede cambiar ambos Λ y n_{eff} , el último por el efecto fotoelástico y el primero por el incremento en el periodo de la rejilla. Igualmente, una variación en temperatura también puede cambiar ambos parámetros, vía dilatación térmica y el coeficiente termoóptico, respectivamente.

Por tanto, una FBG es esencialmente un sensor de temperatura y tensión [19, 20, 21] pero, diseñando la interfaz apropiada, se pueden medir otros estímulos que resulten en un cambio en la longitud de onda de Bragg.

Para calcular la sensibilidad de la longitud de onda de Bragg a la temperatura y a la tensión, se debe usar la ecuación (2.9).

La sensibilidad a la temperatura es la derivada parcial con respecto a la temperatura T :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2n_{\text{eff}} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + 2\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \quad (2.10)$$

Usando las ecs. (2.9) y (2.10)

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \Delta T + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \Delta T \quad (2.11)$$

El primer término del lado derecho de la igualdad en (2.11) es la expansión térmica del silicio (α) y el segundo término es el coeficiente termoóptico (η) que representa la dependencia del índice de refracción a la temperatura (dn/dT).

Por esto,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T \quad (2.12)$$

La sensibilidad a la deformación es la derivada parcial de la ecuación (2.9) con respecto al desplazamiento:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta L} = 2n_{\text{eff}} \frac{\partial\Lambda}{\partial L} + 2\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L} \quad (2.13)$$

Sustituyendo la ec. (2.9) en la ec. (2.13),

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial L} \Delta L + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L} \Delta L \quad (2.14)$$

El primer término de lado derecho de la ecuación en (2.14) es la deformación del periodo de la rejilla debido a la extensión de la fibra. Si un esfuerzo de ΔL se aplica, entonces se obtiene una deformación relativa $\Delta L/L$ de la FBG. Al mismo tiempo, si la FBG tiene una longitud L_{FBG} esta experimentará una deformación $\Delta L_{FBG}/L_{FBG}$, pero dado que la FBG está inscrita en la fibra, entonces $\Delta L_{FBG}/L_{FBG} = \Delta L/L$. El desplazamiento de la longitud de onda de Bragg con la extensión es igual al desplazamiento del periodo de la rejilla con la misma extensión; por lo tanto, el primer término en la ec. (2.14) es igual a la unidad. El segundo término del lado derecho

de la ec. (2.14) es el coeficiente fotoelástico (ρ_e), la variación del índice de refracción con la deformación.

En algunos sólidos, dependiendo de la razón de Poisson del material, este efecto es negativo; esto es, cuando un medio transparente se expande, como una fibra óptica por ejemplo, el índice de refracción disminuye debido a un decremento en la densidad del material. Entonces, cuando se aplica una extensión a la fibra, los dos términos en la ec. (2.14) producen efectos opuestos, uno incrementando la distancia entre las rejillas y por esto aumentando la longitud de onda de Bragg y el otro disminuyendo el índice de refracción efectivo. Los efectos combinados de ambos fenómenos es la forma clásica del desplazamiento de la longitud de onda de Bragg a la deformación:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{FBG} \quad (2.15)$$

donde ε_{FBG} es la deformación longitudinal de la rejilla. Combinando las ecs. (2.12) y (2.15), se obtiene la sensibilidad de la longitud de onda de Bragg a la temperatura y a la deformación:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{FBG} + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (2.16)$$

donde $\Delta\lambda_B$ es el cambio de la longitud de onda de Bragg, ρ_e es coeficiente fotoelástico ($\rho_e = 0.22$), ε_{FBG} es la deformación, ΔT es la variación de la temperatura, α es el coeficiente de expansión térmica del silicio ($0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), y η es el coeficiente termoóptico.

Por esto, la sensibilidad teórica de las rejillas a la temperatura y deformación, a una longitud de onda de 1550 nm, después de sustituir las constantes en (2.16) son: $\Delta\lambda_B/\Delta T = 14.18 \text{ } pm/^\circ\text{C}$ y $\Delta\lambda_B/\Delta\varepsilon = 1.2 \text{ } pm/\mu\varepsilon$. Estos valores teóricos presentados no son absolutos dado que cada FBG presentará una ligera diferencia de sensibilidad de acuerdo al procedimiento de fabricación, aún para el mismo fabricante [21].

2.3.1.2. Ambientes hostiles

Los requerimientos ambientales se vuelven un factor limitante en las aplicaciones de los sensores. Muchas aplicaciones requieren que los sensores basados en fibra funcionen a temperaturas que alcanzan los 300 °C en ambientes ricos en hidrógeno. El monitoreo de combustión requiere operación a 800 °C. Los avances en la tecnología de fibra durante los últimos años permiten a los sensores soportar estos ambientes hostiles. El empaquetado de las rejillas de Bragg también ha experimentado avances similares que permiten que sensores de temperatura y presión trabajen en un amplio rango de aplicaciones ambientalmente difíciles. Como ejemplo, se han usado sensores en rejillas de Bragg para monitorear temperatura y presión en ambientes explosivos donde la presión excede 1 millón de psi y la temperatura excede los 400 °C en un periodo de tiempo de 25ms [12].

2.3.2. Sensores lineales inerciales (Acelerómetros)

Los acelerómetros lineales pertenecen a la clase de sensores inerciales que no requieren referenciamiento a un sistema coordinado estacionario. Son usados para medir la aceleración de

un objeto al que van unidos, lo hacen midiendo la fuerza que se ejerce sobre una masa inercial interna que es afectada por cambios de velocidad. El acelerómetro se compone de una masa de prueba, de un sensor de fuerza y de una carcasa; a su vez el sensor de fuerza se compone de un resorte y un sensor de desplazamiento.

La diferencia entre un acelerómetro y un sensor de fuerza es que el segundo forma parte del primero y además que el acelerómetro siempre mide desde un marco de referencia no inercial mientras que el sensor de fuerza puede hacerlo desde uno no-inercial o desde uno inercial.

Derivado de la segunda Ley de Newton, la aceleración se define como:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} \quad (2.17)$$

donde \mathbf{F} es el vector de fuerza y m es la masa del objeto que se sujeta a la fuerza que causa la aceleración. Por esto, masa, aceleración y fuerza están conectados. La dirección de la aceleración es la misma que la de la fuerza. La ecuación (2.17) sugiere que para medir la aceleración se necesita proporcionar una masa conocida m y medir la magnitud de la fuerza F que es ejercida por la masa en un sensor de fuerza. El sensor de fuerza comprende dos componentes: un resorte que se deforma bajo la influencia de la fuerza y un sensor de desplazamiento para determinar la magnitud del desplazamiento.

2.3.2.1. Función de transferencia y sus características

Un acelerómetro de un eje se puede especificar como un dispositivo de un grado de libertad, el cual tiene una masa llamada “de prueba”, un sistema de soporte tipo resorte, una estructura con propiedades de amortiguamiento, y también un sensor de desplazamiento. Para hacer un acelerómetro funcional, su carcasa se sujeta a la plataforma en movimiento (Fig. 2.6).

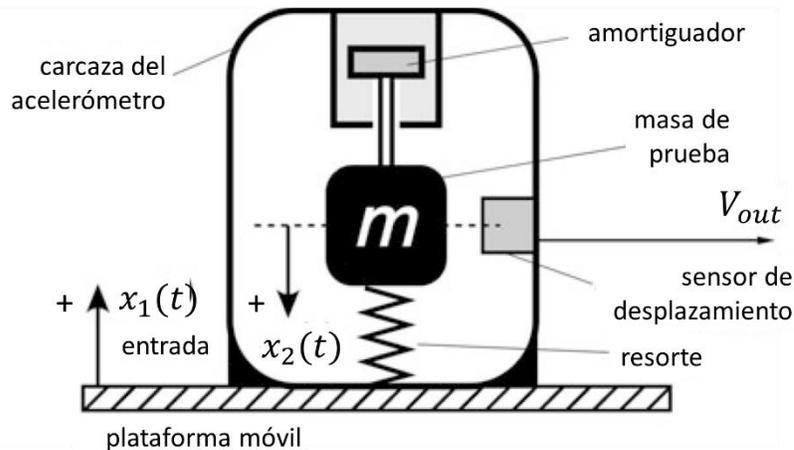


Fig. 2.6. Concepto de un acelerómetro mecánico lineal [1].

La masa de prueba se soporta por un resorte que permite que la masa se desplace. Además, la masa está sujeta de dos componentes adicionales: un amortiguador y un sensor de desplazamiento.

CAPÍTULO 2 Marco teórico

Cuando el movimiento inicia, debido a su inercia, la masa de prueba tiende a permanecer en su lugar y por esto ejerce una fuerza F en el resorte, desplazándolo una distancia $\Delta x = x_2 - x_1$. El resorte se caracteriza por su rigidez k . El resorte contrarresta a la fuerza F de tal forma que se tiene la siguiente ecuación:

$$F = ma = k\Delta x = k(x_2 - x_1) \quad (2.18)$$

de la cual podemos determinar el desplazamiento de la masa de prueba como:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \frac{m}{k} a \quad (2.19)$$

donde la relación

$$S = \frac{m}{k} = \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2} \quad (2.20)$$

es llamada la “sensibilidad estática” de un acelerómetro. La sensibilidad S es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia natural (resonante) f_0 en Hz del ensamble de la masa de prueba, incluyendo todos los componentes adjuntos. ω_0 es la frecuencia circular en rad/s [1].

Ahora se necesitan considerar las características dependientes del tiempo de la masa de prueba. El amortiguador ejerce en la masa una fuerza de amortiguamiento proporcional a la velocidad del desplazamiento de la masa:

$$F_b = b \frac{d(x_2 - x_1)}{dt} = b \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) \quad (2.21)$$

donde, b es el coeficiente de amortiguamiento el cual se define a través de un parámetro llamado tasa de amortiguamiento ζ como:

$$b = 2\zeta\sqrt{km} \quad (2.22)$$

Para tomar en cuenta todas las fuerzas que actúan en la masa de prueba (fuerza inercial, fuerza del resorte y fuerza de amortiguamiento se debe escribir una ecuación diferencial lineal de segundo orden:

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + k(x_2 - x_1) = 0 \quad (2.23)$$

Si llamamos $x_2 - x_1 = z$ el cual es un desplazamiento relativo de la masa de prueba. Entonces, considerando (2.17) que es la segunda Ley de Newton, la ecuación (2.23) se puede reescribir como sigue:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + b \frac{dz}{dt} + kz = -ma = -F \quad (2.24)$$

Su solución para un desplazamiento relativo $z(t)$ es:

$$z(t) = B e^{-\zeta\sqrt{\frac{k}{m}}t} \sin(2\pi f_d t + \varphi) - Sa \quad (2.25)$$

donde, el factor B y el cambio de fase φ dependen de la posición de la masa de prueba al momento de iniciar la aceleración.

La frecuencia amortiguada f_d es diferente de la frecuencia natural f_0 y se define como:

$$f_d = f_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \text{ solo para } \zeta < 1 \quad (2.26)$$

2.3.2.2. Sensores sísmicos

Las masas terrestres (por ejemplo las placas tectónicas) debido a su enorme masa se caracterizan por movimientos de frecuencias muy bajas en el rango infrasonido [1]. A los eventos físicos causados por la liberación repentina de energía en forma de ondas elásticas u ondas sísmicas debido a una dislocación o desplazamiento en la corteza terrestre se les denomina sismos [22]. Para la medición de los movimientos de la tierra, dado que son muy lentos, un sensor sísmico debe ser muy sensible, por esto emplea una masa de prueba grande y un resorte suave [22]. La medición de la aceleración de las ondas es una medida cuantitativa e instrumental de la intensidad de un sismo junto con la velocidad o el desplazamiento del terreno [10].

Existen dos tipos principales de ondas sísmicas, las que se propagan a través del medio sólido de la Tierra, llamadas *ondas internas o de cuerpo* y las *ondas de superficie* que se propagan por la superficie terrestre [22].

Las ondas internas o de cuerpo se clasifican en dos tipos. El primero son las ondas P longitudinales elásticas también llamadas compresionales, son desplazamientos horizontales manifestados por la compresión y rarefacción del suelo cuando su densidad varía, similarmente a las ondas de sonido (Fig. 2.7a). “P” viene de *primario* porque debido a su mayor velocidad la onda de un terremoto remoto llega primero. En las ondas P, el suelo vibra a lo largo de la dirección de propagación de la onda. El segundo tipo de ondas son las ondas S, “S” viene de *secundario*, son desplazamientos transversales sin cambio en la densidad del suelo. Vibran formando un ángulo recto con la dirección de la propagación (Fig. 2.7b). Las ondas P pueden viajar a través de sólidos y líquidos, mientras que las ondas S pueden viajar solo a través de sólidos [1].

Las ondas de superficie se propagan en forma análoga a como se propagan las ondas sobre el agua; el movimiento producido por las ondas de superficie está restringido a la parte superior de la corteza, a una profundidad de unos 30 km. Se dividen en dos tipos:

Ondas Love u *ondas L*, cuyo movimiento es similar al de las ondas S, haciendo vibrar la partícula horizontalmente en sentido perpendicular a la dirección de propagación, sin movimiento vertical (Fig. 2.8a). *Ondas Rayleigh* u *ondas R*, cuyo movimiento es similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimiento elíptico horizontal y vertical simultáneamente (Fig. 2.8b).

La orientación que el elemento sensor debe tener depende del tipo de onda a sensar [1]. La primera onda que se percibe y registra en el sismograma es la onda P, cuya velocidad de

propagación es mayor; cierto tiempo después, segundos o decenas de segundos según la distancia, se observa un cambio radical en el registro: la amplitud de las oscilaciones aumenta e igualmente aumenta su periodo; este punto marca el arribo de las ondas S. Otros tipos de ondas, como las ondas de superficie L y R, pueden ser diferenciados en el sismograma por su arribo posterior con una amplitud y periodo característicos.

El periodo predominante de las ondas está asociado a la magnitud del evento y a la distancia epicentral. Así, las ondas de cuerpo P y S causan cerca del epicentro vibraciones de mayor amplitud y de alta frecuencia, del orden de 5 a 20 Hz. A distancias epicentrales grandes las ondas de cuerpo P y S pueden tener periodos predominantes de 2.0 a 3.0 segundos; y las ondas de superficie L y R, en cambio, son de frecuencia muy baja, o sea los periodos de onda son mayores, en el orden de 20.0 segundos [22].

En el diseño sismorresistente de edificios y obras civiles se requiere un conocimiento adecuado de las características e intensidad del movimiento del terreno durante sismos destructivos. El parámetro más frecuentemente empleado para designar la intensidad de la sacudida sísmica es la **aceleración máxima del terreno**, expresada en cm/s^2 o en porcentaje de la gravedad (%g). Otro parámetro importante lo constituye la velocidad del terreno en cm/s, pero a diferencia de la aceleración que es registrada instrumentalmente, la velocidad y el desplazamiento del terreno se determinan de forma indirecta mediante un proceso de integración del registro de aceleraciones.

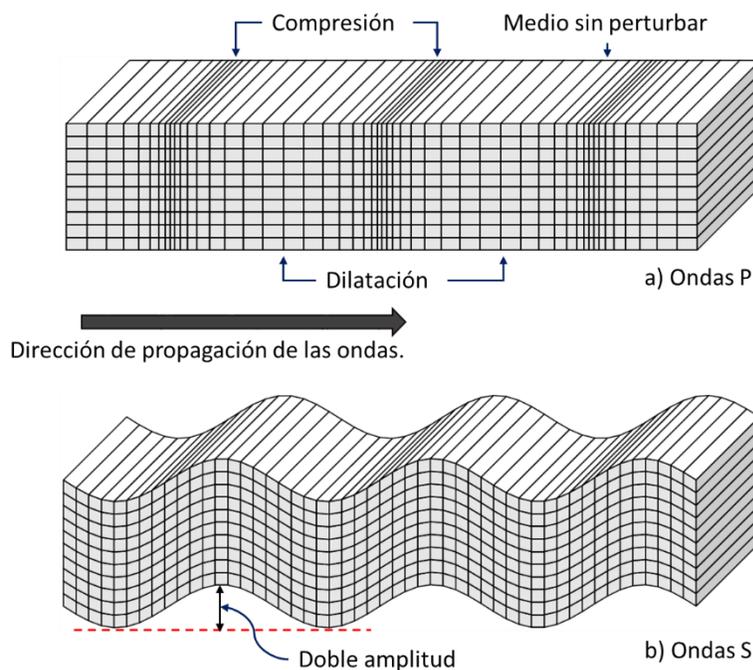
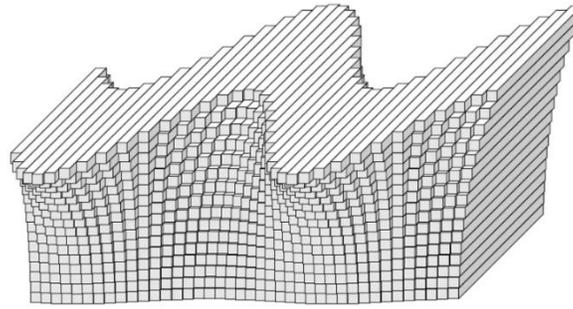
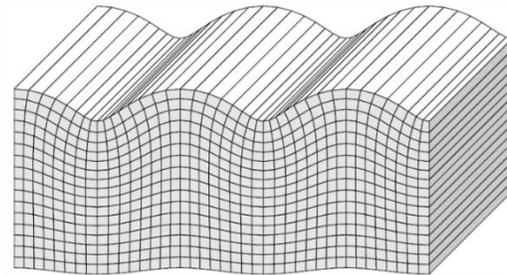


Fig. 2.7. Desplazamientos que ocurren de una onda armónica plana P (a) y onda S (b) viajando horizontalmente a lo largo de la página. La propagación de la onda S es cortante sin cambio de volumen con movimiento de la partícula transversal a la dirección de propagación, mientras que las ondas P implican cambio de volumen y también cambio en la forma del material en la dirección de propagación [23].



a) Ondas de superficie Love



b) Ondas de superficie Rayleigh

Fig. 2.8. Ondas de superficie Love (a) con movimiento de la partícula perpendicular a la trayectoria, y ondas de superficie Rayleigh (b) con movimiento horizontal y vertical en un plano elíptico orientado en la dirección de propagación [23].

3. Marco metodológico

En este capítulo se describe el principio de funcionamiento del dispositivo diseñado, también se incluye su esquema estructural, su esquema óptico y el método de calibración llamado “Método de deflexión del haz láser” (*Optical Beam Deflection Method* - OBDM, por sus siglas en inglés). En primer lugar se hizo la instrumentación de un dispositivo uniaxial para hacer una prueba de concepto, posteriormente se procedió a la instrumentación de un dispositivo biaxial, ambos dispositivos sensores se describen en este capítulo.

En la Fig. 3.1 se muestra un esquema estructural tridimensional del dispositivo experimental uniaxial, el esquema consta de tres partes: (1) el dispositivo experimental que lo integran el poste fijo, la placa metálica flexible, las dos pinzas que sujetan a la fibra óptica, la rejilla de Bragg, el circulador y demás elementos ópticos que se describen en la sección 3.4, (2) el método de calibración para determinar el desplazamiento δ_A que se compone del láser rojo cuyo haz incide formando un ángulo de 45° con respecto al eje horizontal del espejo, el espejo fijado a la superficie de la pinza para fibra óptica y el fotodetector de volumen y (3) el electroimán que tiene la función de inducir una vibración a la estructura del sensor, la vibración causa el desplazamiento δ_A . El electroimán sustituye a una mesa vibratoria. En las secciones siguientes se describe cada una de estas partes.

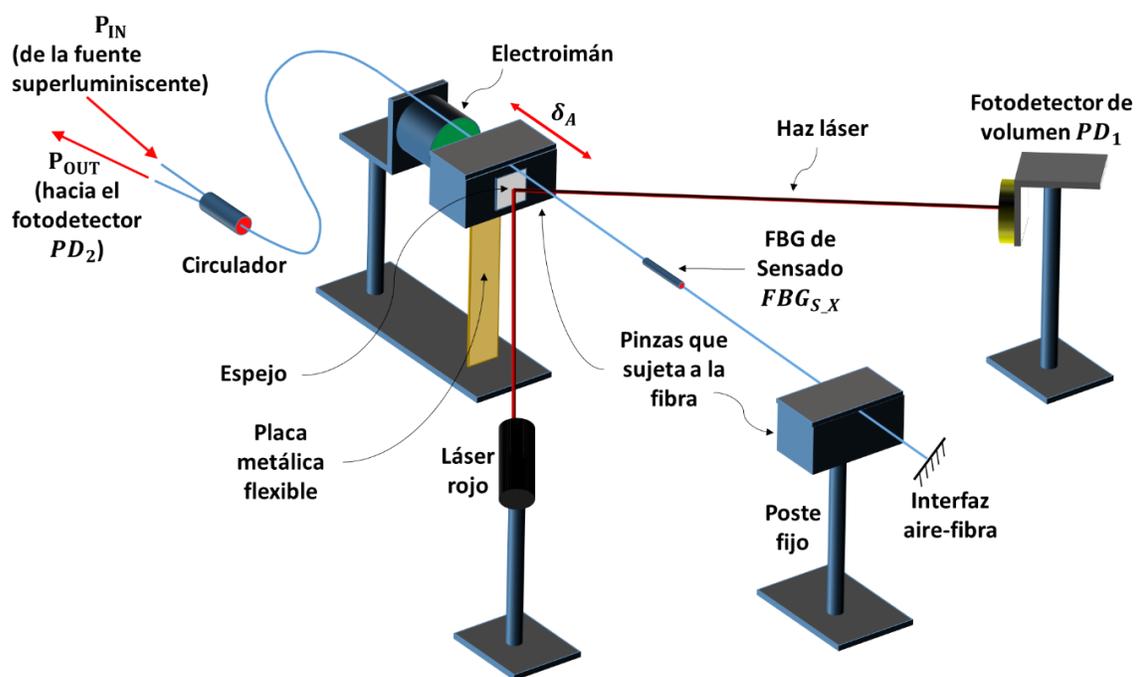


Fig. 3.1. Esquema del dispositivo experimental uniaxial en el que también se muestra el método usado para calibración llamado de “deflexión del haz láser” y que está integrado por el láser rojo, el espejo adherido a la superficie de la pinza que sujeta a la fibra y el fotodetector de volumen.

La fotografía del esquema mostrado en la Fig. 3.1 se muestra en la Fig. 3.2, es una mesa óptica sobre la que se fijan todos los elementos.

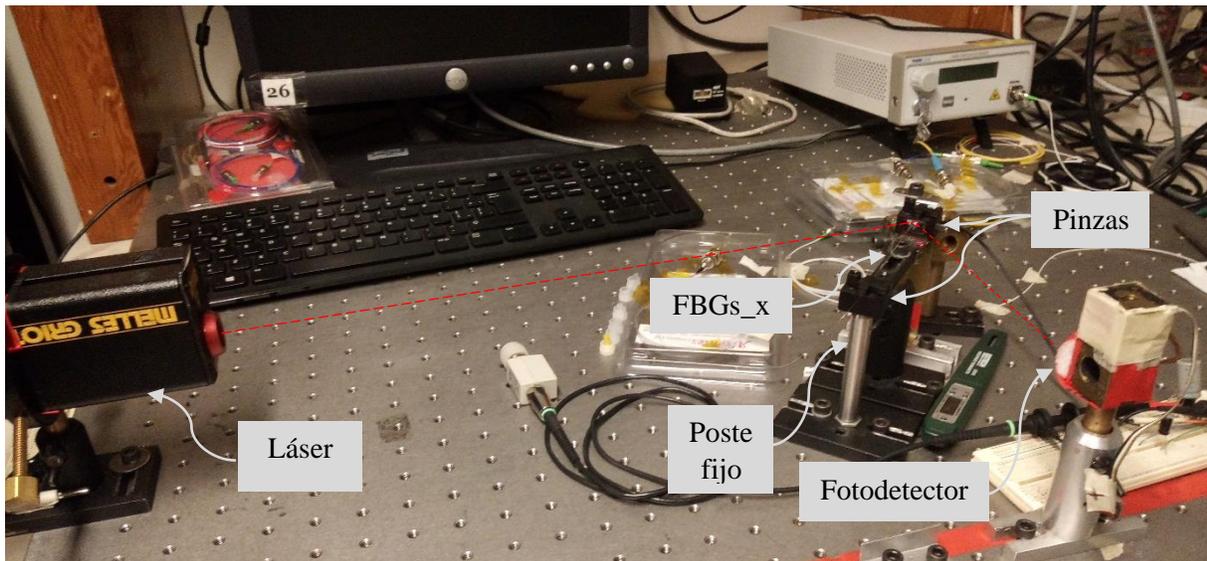


Fig. 3.2. Fotografía del dispositivo experimental uniaxial, en el que además se aprecia el láser y el fotodetector de volumen utilizado para medir desplazamiento por medio del OBDM.

3.1. Acelerómetro basado en FBG

Se han desarrollado algunas técnicas para medir deformación usando sensores en fibra óptica. Los tres enfoques más usados incluyen configuraciones interferométricas, esparcimiento de Rayleigh y la utilización de rejillas de Bragg [12].

Los sensores de deformación ópticos en rejillas de Bragg proporcionan muchas ventajas sobre los sistemas eléctricos convencionales tales como inmunidad a la interferencia electromagnética y a la interferencia de radio frecuencia, por lo tanto, son libre de problemas de ruido eléctrico. También son a prueba de explosiones. Son muy adecuados para aplicaciones que requieren capacidades de largo alcance en términos de distancia, así como aplicaciones que requieren largos periodos de tiempo sin degradación. Además, estos sensores son adecuados para condiciones ambientales difíciles debido a su inmunidad a los relámpagos y resistencia a la corrosión.

3.1.1. Metodología del funcionamiento del sensor

Como se mencionó en la sección 2.3.2.1 un acelerómetro incluye (1) una masa de prueba, (2) un sistema de soporte tipo resorte y (3) un sensor de desplazamiento, también vimos en la sección 2.3.1.1 que la rejilla Bragg es sensible tanto a la deformación como a la temperatura.

En el sensor que se diseña aquí la rejilla de Bragg se usa como sensor intrínseco de desplazamiento al medir la deformación que se provoca en la rejilla a lo largo de su dirección axial por medio del cambio en su longitud de onda que es proporcional al desplazamiento aplicado [12]. Para una fibra típica, el 1% de deformación está en el nivel de prueba, y el límite práctico de deformación está alrededor del 2%.

En la Fig. 3.3 se muestra el esquema de un sensor de desplazamiento basado en FBG. Un extremo de la fibra de la rejilla está fijada al cuerpo del sensor, el cual también sirve de anclaje o punto de referencia del dispositivo. El otro extremo de la fibra se conecta vía un resorte al objeto que se desplaza relativamente con respecto al punto de referencia [12].

La fuerza efectiva, y en consecuencia la deformación, vista por la FBG se ajusta por la constante del resorte. La masa de prueba se desplaza, esto tensiona a la fibra resultando en un cambio espectral de su longitud de onda pico hacia una longitud de onda mayor. Este dispositivo es muy lineal y repetible.

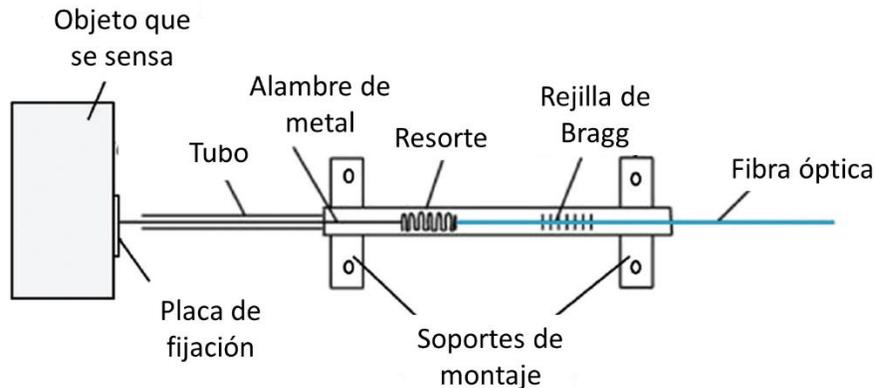


Fig. 3.3. Esquema de un sensor de desplazamiento basado en FBG [12].

Para corregir posibles efectos de la temperatura, se conecta una segunda rejilla en serie y se aísla de cualquier deformación mecánica posible de tal forma que el cambio relativo de la longitud de onda entre las dos rejillas se deba solo a la deformación de la rejilla y no a la temperatura, se debe tener en cuenta que ambas rejillas deben situarse físicamente cerca para que estén prácticamente a la misma temperatura.

3.1.2. Comportamiento mecánico de la FBG

En la sección anterior se vio que la rejilla de Bragg funciona como un sensor de desplazamiento, en esta sección se muestra que además la FBG junto con su fibra óptica funciona como resorte, el segundo elemento necesario en un acelerómetro.

Para un análisis sencillo del comportamiento mecánico de una fibra óptica con FBG, a esta se le considera como una varilla sólida que cuando se carga axialmente presenta una deformación elástica [24], esto es, que la fibra recupera su forma original al eliminar la fuerza que provoca la deformación, en la Fig. 3.4 se muestra la sección transversal de una barra que representa a la fibra óptica. Se recurre a la ley de Hooke y a las definiciones de esfuerzo y deformación unitaria [25] para describir la deformación elástica de una barra sólida sometida a cargas axiales.

En la barra mostrada en la Fig. 3.4 la línea punteada representa a la barra sin elongación. Al someter la barra a una deformación esta presenta una sección transversal circular que varía gradualmente a lo largo de su longitud L_3 . Las fuerzas F_1 y F_2 son iguales porque la barra está sometida a fuerzas concentradas en sus extremos y una carga variable distribuida a lo largo de

su longitud representada por F lo que le produce un cambio δ_A en la longitud original de la barra.

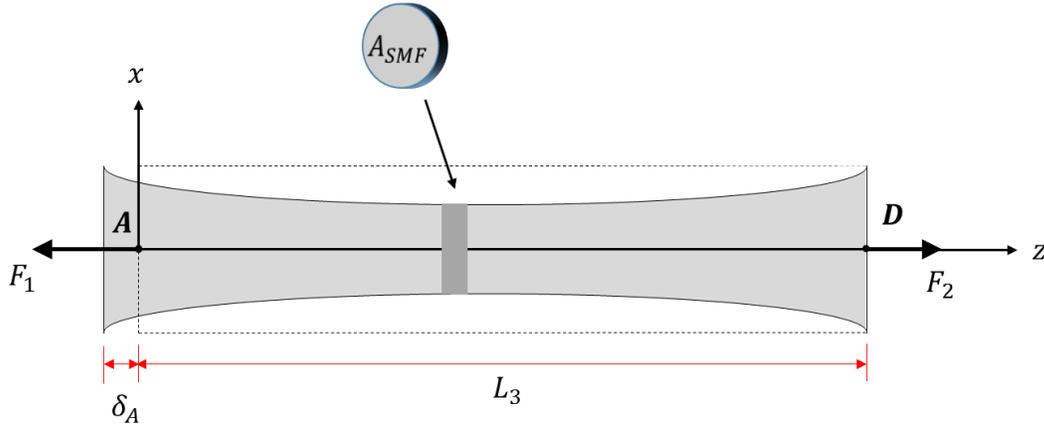


Fig. 3.4. Sección transversal de una barra deformada por elongación [25].

En este análisis se desprecian las deformaciones localizadas que ocurren en puntos de carga concentrada y en donde la sección transversal de la barra cambia repentinamente. Estos efectos ocurren dentro de pequeñas regiones de la longitud de la barra y por lo tanto solo tendrán una pequeña influencia en el resultado final. En su mayor parte, la barra se deforma uniformemente y por tanto se considera que el área de la sección transversal A_{SMF} circular es constante a lo largo de la barra. El esfuerzo σ_{FBG} y la deformación unitaria ε en la barra son

$$\sigma_{FBG} = \frac{F}{A_{SMF}} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta_A}{L_3} \text{ [u. a]} \quad (3.2)$$

A la rejilla de Bragg con su fibra óptica se le puede considerar como un resorte, siempre y cuando su deformación sea pequeña como para no dañarla internamente, debido a que su material es linealmente elástico siendo δ_A proporcional a la carga.

$$F = k_2 \delta_A \text{ [N]} \quad (3.3)$$

donde, la constante k_2 es la constante de proporcionalidad o constante del resorte, denominada rigidez de la FBG. De aquí en adelante a la FBG se le tratará como un resorte en el análisis de cuerpo libre. La constante de proporcionalidad se define como la fuerza necesaria para producir un alargamiento unitario, es decir

$$k_2 = \frac{F}{\delta_A} \text{ [N/m]} \quad (3.4)$$

Como la barra está cargada axialmente, se alarga cuando se tensiona y se acorta con la compresión, como un resorte. Para analizar este comportamiento, en la Fig. 3.4 se muestra una barra cilíndrica. Una barra cilíndrica es un elemento estructural que tiene un eje longitudinal recto y una sección transversal uniforme en toda su longitud, así mismo tiene una sección transversal sólida y circular debido a que es una FBG.

3.2 Esquema estructural de los dispositivos experimentales

Si la carga actúa en el centro de la sección transversal extrema, el esfuerzo es normal uniforme en secciones transversales alejadas de los extremos y además la barra está hecha de un material homogéneo, entonces la deformación será unitaria axial. Como se ha mencionado, el material de la FBG es linealmente elástico, lo que significa que obedece a la Ley de Hooke, en la ecuación (3.5) se muestra la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria.

$$\sigma_{FBG} = E_{SMF} \varepsilon \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (3.5)$$

En donde E_{SMF} es el módulo de elasticidad del material de la fibra óptica que contiene a la FBG, esto incluye la cubierta protectora de acrilato. Al combinar las relaciones mostradas en las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.5), se obtiene la ecuación para el alargamiento de la barra:

$$\delta_A = \frac{FL_3}{E_{SMF}A_{SMF}} \text{ [m]} \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) indica que el alargamiento es directamente proporcional a la carga F y a la longitud L_3 , y que es inversamente proporcional al módulo de elasticidad E_{SMF} y a la sección transversal A_{SMF} .

Aunque la ecuación (3.6) se dedujo para un elemento en tensión, también es aplicable para compresión. Si se toma una convención de signos para representar un alargamiento o compresión de la barra, el alargamiento se toma como positivo y la compresión se toma como negativo.

A continuación, a partir de las ecuaciones (3.4) y (3.6) se obtiene la constante elástica del material (fibra óptica) k_2 . La aproximación es válida para perturbaciones cuyos valores sean menores que el límite elástico de la fibra óptica de tal forma que las perturbaciones mecánicas sean reversibles.

$$k_2 = \frac{E_{SMF}A_{SMF}}{L_3} \text{ [N/m]} \quad (3.7)$$

3.2. Esquema estructural de los dispositivos experimentales

La FBG cumple la función de un sensor de desplazamiento, al mismo tiempo, junto con su fibra óptica cumple la función de un resorte. El otro elemento necesario para obtener un acelerómetro es una masa de prueba. Aquí se describen los esquemas de la estructura mecánica del dispositivo experimental uniaxial y del biaxial.

El esquema del montaje del dispositivo experimental uniaxial se muestra en la Fig. 3.5, la FBG está atada entre un poste fijo y una placa flexible de metal por medio de dos pinzas para fibra óptica modelo T711-250. La placa de metal junto con la pinza PO_1 están unidas, ambas forman la masa de prueba del sensor; la FBG funciona como un resorte y a su vez como sensor de desplazamiento. Con estos tres elementos principales ya se tiene el dispositivo propiamente. A un lado de la pinza PO_1 se encuentra un electroimán cuya función es inducir un desplazamiento δ_A que es el mismo efecto de genera una vibración sobre el dispositivo experimental, el electroimán sustituye entonces a una mesa de vibración. El desplazamiento δ_A se mide utilizando el método de deflexión del haz láser y utilizando la ecuación (3.8) que se

obtiene a partir de (2.19) y (3.7) se obtiene la aceleración que se ejerce sobre el sensor a partir del desplazamiento δ_A .

$$a = \frac{k_2}{m} \delta_A \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (3.8)$$

En la Fig. B.6 del apéndice B se muestra el circuito de amplificación para alimentación del electroimán. Las señales que se aplican al electroimán provienen de un generador de funciones y pueden ser de cualquier forma, la que se aplica para evaluar el comportamiento del sensor en este trabajo es una señal sinodal variable tanto en amplitud como en frecuencia, se eligió una señal senoidal por la similitud a la forma de las ondas sísmicas, aplicación a la cual está destinada principalmente este dispositivo. La pinza que sujeta a la fibra óptica es de aluminio, por eso se le pegó una pequeña placa hierro para que sea atraída por el electroimán.

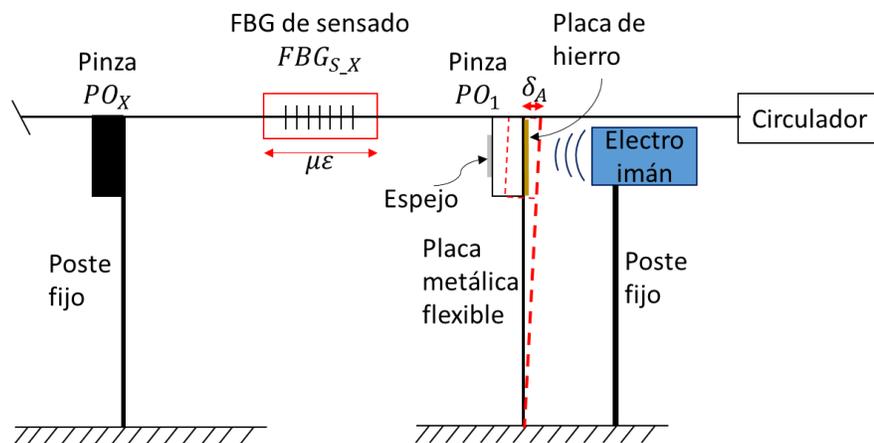


Fig. 3.5. Esquema estructural del sensor uniaxial.

La fotografía de la Fig. 3.6 corresponde al sensor experimental uniaxial al que hace referencia la Fig. 3.5.

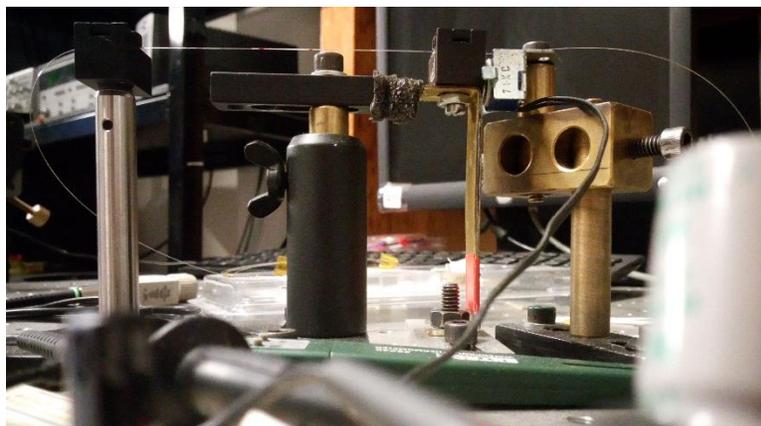


Fig. 3.6. Fotografía del sensor experimental uniaxial

El esquema del montaje del sensor experimental biaxial se muestra en la Fig. 3.7, se utilizaron tres pinzas para fijar las dos FBG's que forman un ángulo de 90° entre sí. Las pinzas PO_X y PO_Y están fijas, la pinza PO_1 del dispositivo uniaxial, que es la pinza que se desplaza

3.2 Esquema estructural de los dispositivos experimentales

con respecto al resto de los componentes, se cambia por la pinza PO_2 en el sensor biaxial. Ahora se tienen dos sensores de desplazamiento intrínsecos FBG_{S_X} y FBG_{S_Y} una para cada eje, las FBG's también actúan como resortes, la masa de prueba está formada por la pinza PO_2 , el espejo, la placa de hierro y la placa metálica flexible.

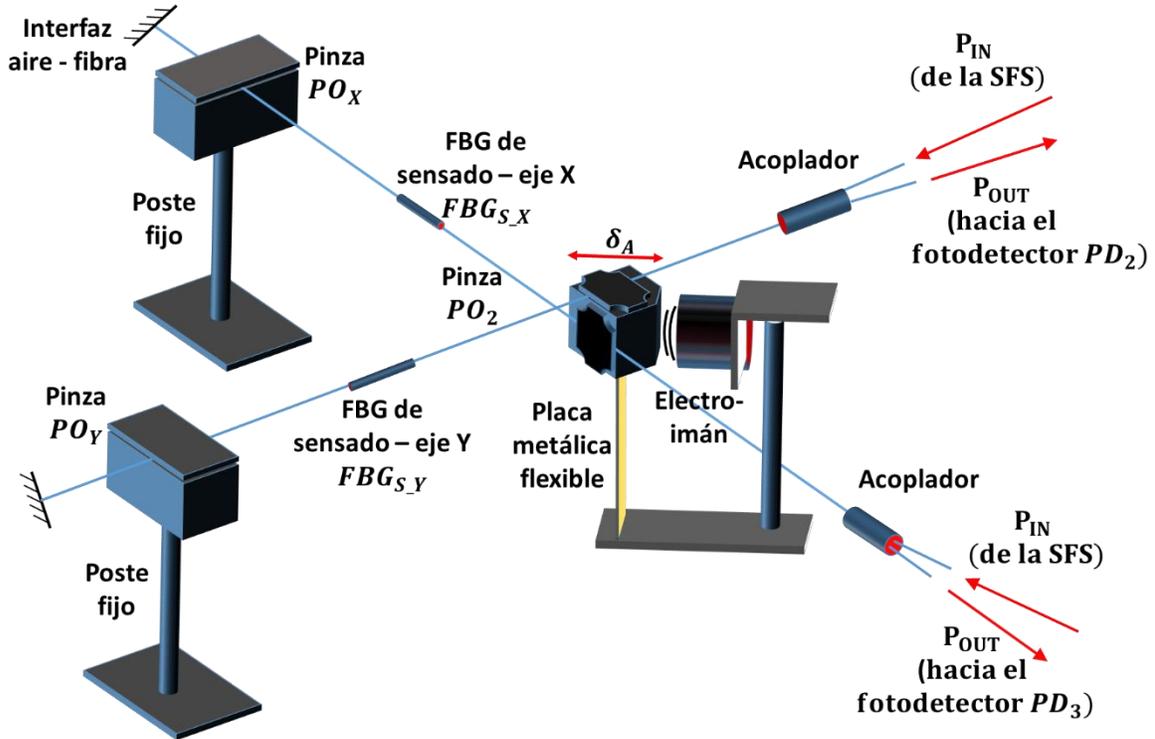


Fig. 3.7. Esquema estructural del sensor experimental de dos ejes: x e y .

La pinza para fibra óptica PO_2 se diseñó e imprimió en polímero, ácido poli láctico (*Polylactic Acid* - PLA, por sus siglas en inglés), en una impresora 3D. Esta pinza sujeta en un mismo punto a un extremo de cada FBG, el diseño de la pinza se muestra en la Fig. 3.8 sujeta un extremo de cada rejilla formando un ángulo de 90 grados entre ellas. La pinza tiene una cara que forma 45 grados con cada eje, en la que se pega una placa pequeña de hierro para que sea atraída por el electroimán.

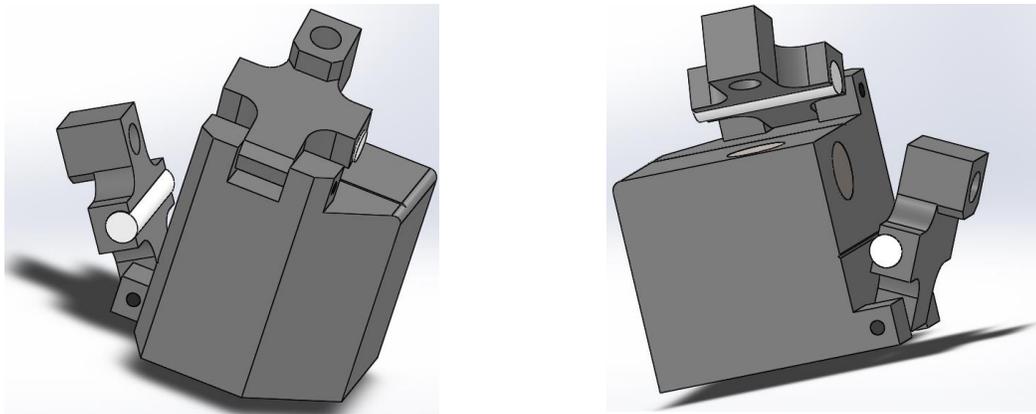


Fig. 3.8. Dos vistas de la pinza para sujetar dos fibras ópticas formando un ángulo de 90 grados entre ellas.

CAPÍTULO 3 Marco metodológico

Por otro lado, se unió a la pinza un espejo como en el caso del dispositivo uniaxial para medir el desplazamiento δ_A de la masa de prueba. El espejo forma 45 grados con cada uno de los ejes. El OBDM mide el desplazamiento δ_A , pero el desplazamiento de cada eje es δ_{AX} que es igual a δ_{AY} (Fig. 3.9), se dice que los desplazamientos de los dos ejes son iguales considerando que ambas rejillas tienen las mismas propiedades elásticas. La magnitud de los desplazamientos δ_{AX} y δ_{AY} son iguales a $1/\sqrt{2}$ veces el desplazamiento δ_A que se obtiene con el OBDM.

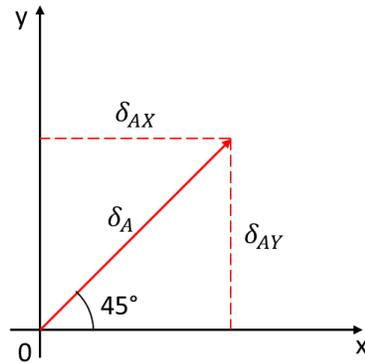


Fig. 3.9. Gráfica que ilustra la relación entre el desplazamiento δ_A y $\delta_{AX} = \delta_{AY}$.

La fotografía de la Fig. 3.10 corresponde al sensor experimental biaxial al que hace referencia la Fig. 3.7.

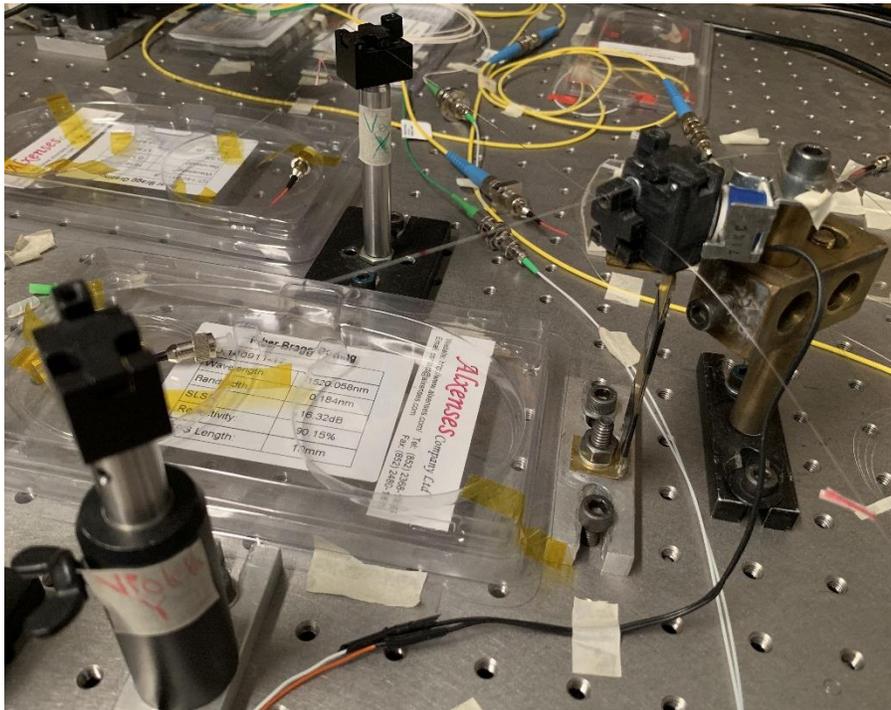


Fig. 3.10. Fotografía del sensor experimental de dos ejes.

3.3. Técnica de superposición de rejillas Bragg

Una de las técnicas de demodulación para sensores que utilizan rejillas de Bragg se basa en el uso de una segunda rejilla de Bragg como referencia para observar los cambios de longitud de onda de la(s) rejilla(s) de sensado [26].

La primera consideración es que las longitudes de onda de ambas rejillas se deben sobreponer, la potencia óptica total reflejada se calcula de la siguiente manera:

Se considera una fuente de ancho espectral grande, por ejemplo una fuente superluminescente en fibra óptica (*Superluminescent Fiber Source* - SFS, por sus siglas en inglés), cuyo espectro $S(\lambda)$ se puede modelar como una distribución Gaussiana de longitudes de onda con una anchura a la altura media (*Full Width at Half Maximum* - FWHM, por sus siglas en inglés) de $\Delta\lambda_0$ y una longitud de onda central de λ_0 .

El modelo Gaussiano para una fuente está dado por la ecuación (3.9).

$$S(\lambda) = I_{pico} \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_0} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

En donde λ es la longitud de onda en el vacío y I_{pico} es la potencia pico. Aquí $I_{pico} = (P_0/\Delta\lambda_0)[(4\ln(2/\pi))^{1/2}]$, P_0 es la potencia total inyectada al sistema por la SFS.

Para muchas fuentes reales su perfil es más complejo que el descrito por la ecuación (3.9), entonces, es necesario asegurarse que el perfil espectral de la fuente es suave para evitar que se distorsione el perfil espectral de la luz reflejada por una FBG y que no haya errores en la medición del cambio de la longitud de onda.

Para calcular la respuesta espectral de una FBG, se puede usar la teoría de modos acoplados, pero se puede hacer una simplificación considerable si se asume que la función de reflectividad de la rejilla de Bragg se puede modelar como una función Gaussiana con una longitud de onda central de λ_B y un ancho de banda, $\Delta\lambda_B$ a como se muestra en la ecuación (3.10).

$$G(\lambda) = R_0 \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_B} \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

En donde R_0 es la reflectividad máxima que ocurre a la longitud de onda de Bragg.

La curva Gaussiana representa bastante bien al espectro de reflexión de la rejilla, pero no a la medida que se hace con la teoría de modos acoplados. Por tanto la aproximación Gaussiana se debe usar con cuidado. Para las rejillas de Bragg que se utilizaron en este trabajo resulta ser una buena aproximación, para comprobarlo, en la Fig. 3.11 se compara el espectro de reflexión real y el espectro de reflexión teórico obtenido a partir de la ecuación (3.10) de una de las tres rejillas utilizadas en el sensor experimental. Los valores de la rejilla son $\lambda_B = 1519.69$ nm, $\Delta\lambda_B = 0.283$ nm y reflectividad del 58.9%. Se puede ver que la aproximación teórica representa muy de cerca al espectro real por lo que se comprueba que se tiene una buena aproximación.

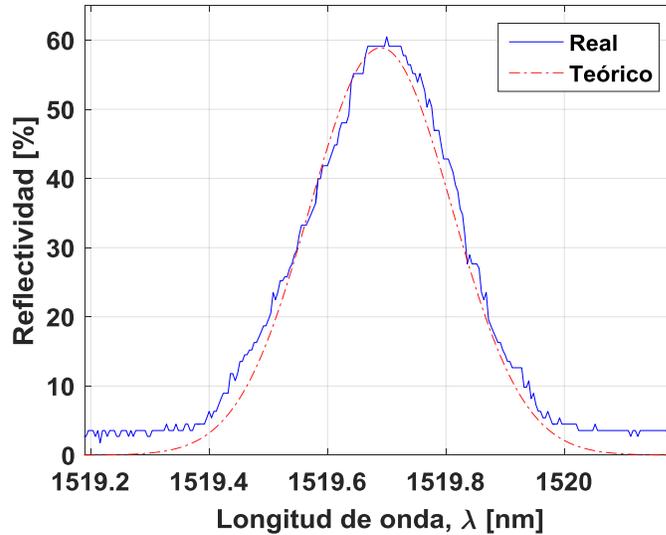


Fig. 3.11. Comparación espectral de la reflectividad de la FBG SN: 140911-18 considerando su espectro real y su espectro teórico por aproximación Gaussiana con $\lambda_B = 1519.69$ nm.

Dado que el ancho espectral de la SFS es mucho mayor que el ancho espectral de la FBG, esto es, $\Delta\lambda_0 \gg \Delta\lambda_B$, es válido establecer que la distribución de las longitudes de onda reflejadas de la rejilla cuando se ilumina por la SFS (sin considerar las pérdidas a través de los elementos ópticos) está dada por la ecuación (3.11).

$$I_s(\lambda) = S(\lambda_{BR})G(\lambda) \quad (3.11)$$

En donde $S(\lambda_{BR})$ está dada por la ecuación (3.9) cuando $\lambda = \lambda_{BR}$ y λ_{BR} es la longitud de onda de Bragg de la FBG_R . La potencia total reflejada por la rejilla es la integral de la ecuación (3.11) sobre todo el rango de longitud de onda.

En la Fig. 3.12 se muestra el esquema de demodulación en el cual se asume que la rejilla de sensado FBG_S , y la rejilla de referencia FBG_R , tienen dependencia de reflectividad idénticas dadas por la ecuación (3.11), en adelante, los índices S y R se refieren a las rejillas de sensado y de referencia respectivamente.

El funcionamiento de la técnica de rejillas superpuestas se describe a continuación [27]:

- La luz proveniente de la fuente superluminiscente entra, por medio de un aislador, a la rejilla de referencia (FBG_R) que actúa como un filtro rechaza banda, ver diagrama de la Fig. 3.12. El aislador tiene la función de prevenir que la luz reflejada se regrese a la fuente.
- La luz filtrada que sale de la FBG_R entra a un circulador óptico por el puerto 1 y sale por el puerto 2 sin sufrir cambios espectrales y llega a la rejilla de sensado (FBG_S).
- La rejilla FBG_S transmite casi toda la luz que le llega, pero refleja una pequeña porción en su longitud de onda λ_B .
- La luz reflejada por la FBG_S llega al circulador por el puerto 2, sale por el puerto 3 y llega al fotodetector.
- La magnitud de la intensidad de la luz que llega a fotodetector lleva la información de la deformación que experimenta la rejilla de sensado.

3.3 Técnica de superposición de rejillas Bragg

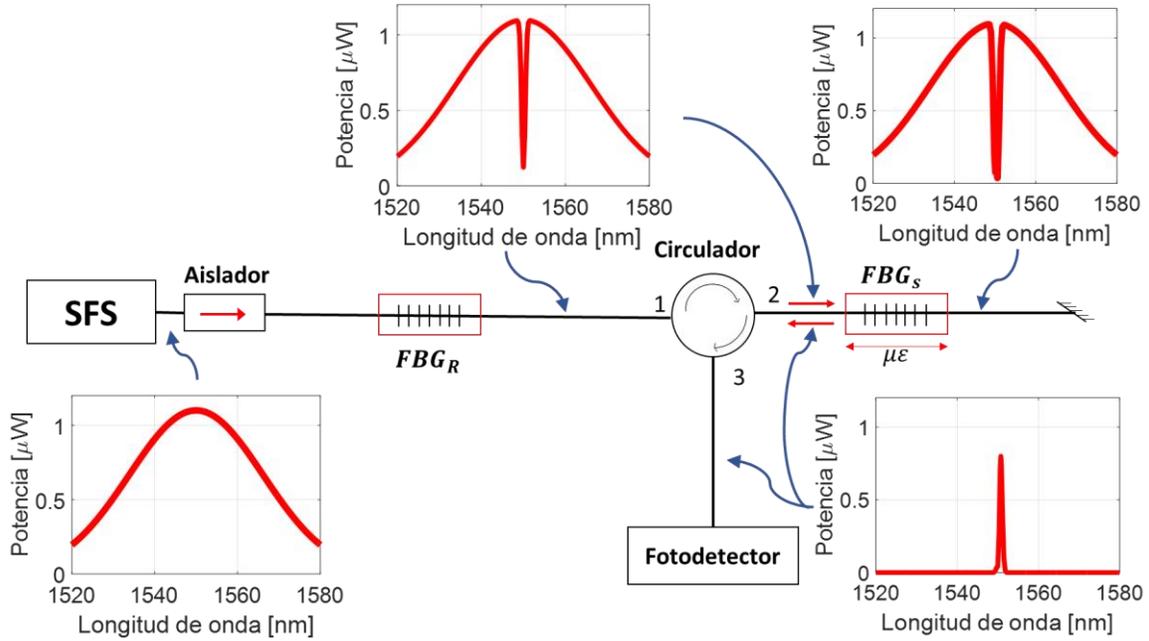


Fig. 3.12. Diagrama del esquema de interrogación por rejillas superpuestas.

Dado que tanto la rejilla de referencia como la rejilla de sensado utilizada en el dispositivo experimental tienen prácticamente la misma longitud de onda de Bragg, la potencia que detecta el fotodetector cuando la FBG_S no está sometida a deformación es mínima, esto se muestra en la Fig. 3.14 cuando la diferencia de las longitudes de Bragg de las FBG 's es cercana a cero. Cuando la longitud de onda de Bragg de la rejilla de sensado (λ_{BS}) cambie, causará un incremento en la luz que llega al fotodetector hasta un límite máximo en el que el espectro de las rejillas ya no se superpongan.

El espectro de reflexión de la rejilla de referencia ($G_R(\lambda)$) de acuerdo con la ecuación (3.10) está dado por:

$$G_R(\lambda) = R_{0R} \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_{BR}}{\Delta \lambda_{BR}} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

Y el espectro de reflexión de la rejilla de sensado ($G_S(\lambda)$) está dado por:

$$G_S(\lambda) = R_{0S} \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_{BS}}{\Delta \lambda_{BS}} \right)^2 \right] \quad (3.13)$$

En donde R_{0R} , λ_{BR} y $\Delta \lambda_{BR}$ son la reflectividad máxima, longitud de onda de Bragg y ancho de banda de la FBG_R respectivamente, y R_{0S} , λ_{BS} y $\Delta \lambda_{BS}$ son la reflectividad máxima, longitud de onda de Bragg y ancho de banda de la FBG_S respectivamente.

Consecuentemente, la potencia total recibida por el fotodetector es el resultado del espectro de transmisión ($1-G_R(\lambda)$) de la FBG_R , con la entrada de la fuente superluminiscente $S(\lambda_{BR})$ y el espectro de reflexión $G_S(\lambda)$ de la FBG_S y expresada en la ecuación (3.14).

$$P_d = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda_{BR}) (1 - G_R(\lambda))(G_S(\lambda))d\lambda \quad (3.14)$$

En la Fig. 3.13 se muestra el espectro de la potencia óptica que incide en el fotodetector con relación a la distancia espectral de las rejillas FBG_R y FBG_S . En la Fig. 3.14 se muestra la característica resultante del sensor. La reflectividad de las dos rejillas debe ser tan cercana como sea posible al 100% [28]. Por un lado esto lleva a un mayor rendimiento y una mejor SNR de la intensidad reflejada por la FBG_S . Además el rango dinámico del sensor incrementa con una mayor reflectividad de las rejillas. Para tener un comportamiento bipolar y lineal del sensor el punto de operación debe ser en la mitad de la región de máxima pendiente en la Fig. 3.14. El ancho espectral de las rejillas también influye en la sensibilidad del sensor. Para mayor sensibilidad, teóricamente el ancho de banda debe ser muy estrecho, esto requerirá una alta exactitud en la distancia espectral de las rejillas. Con respecto a la influencia de la temperatura en el sensor, si las dos rejillas están a la misma temperatura entonces ambas rejillas sufrirán el cambio en su longitud de onda de Bragg en el mismo sentido por lo cual no se afecta la distancia relativa entre las rejillas. Para considerar que ambas rejillas están a la misma temperatura se deben colocar a una distancia cercana y dentro de un mismo sistema termodinámico.

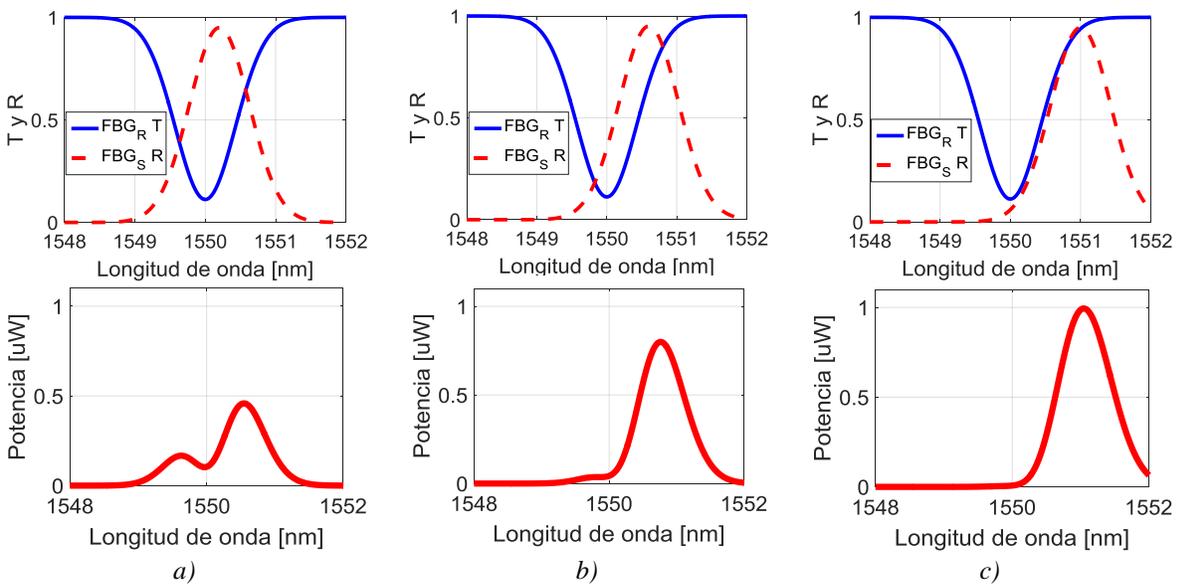


Fig. 3.13. La potencia medida por el fotodetector depende de la diferencia relativa de la longitud Bragg de las rejillas. a) Potencia reflejada mínima, b) Potencia reflejada media, c) Potencia reflejada máxima.

3.4 Esquema óptico de los dispositivos experimentales

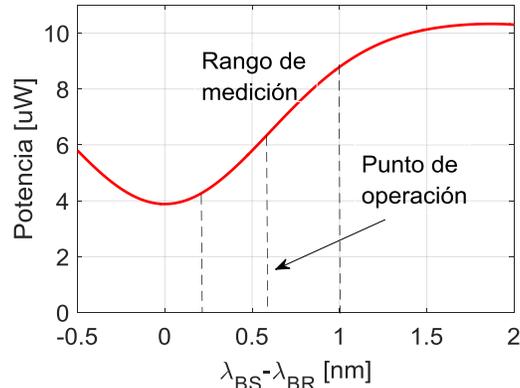


Fig. 3.14. Potencia óptica que incide en el fotodetector vs diferencia relativa de las longitudes de Bragg de las FBG's.

3.4. Esquema óptico de los dispositivos experimentales

En la sección 3.2 se describió el esquema estructural de los dispositivos experimentales, también ya se analizó el método de interrogación por superposición de FBG's que se aplica en esta sección para describir los esquemas ópticos de los dispositivos.

En primer lugar se realizó un dispositivo uniaxial para hacer una prueba de concepto el cual utiliza una FBG de sensado y otra de referencia. La FBG de referencia tiene dos propósitos en el sensor, el primero es compensación por temperatura y el segundo es que se utiliza para la técnica de superposición de FBG's. En la Fig. 3.15 se ilustra el esquema óptico del sensor experimental uniaxial cuyo funcionamiento es muy parecido al descrito en la sección anterior 3.3, agregando solo la parte de conversión de la señal óptica a eléctrica.

La primera etapa del esquema se describe en la Fig. 3.12, la fuente de luz es superluminiscente modelo S5FC1005SXL centrada en 1550 nm, 22mW de potencia máxima y ancho de banda de 50 nm, valores nominales. El fotodetector PD_2 PIN de InGaAs, el circulador y el aislador están diseñados para trabajar a 1550 nm y las longitudes de Bragg de las rejillas son de 1519.788 nm para la de referencia y 1520.058 nm para la de sensado. La segunda etapa que corresponde a la electrónica para visualizar la señal del sensor en un sistema de adquisición de datos (*Data Acquisition System – DAC*, por sus siglas en inglés), que en este caso es un osciloscopio, inicia con el circuito de transimpedancia para el fotodetector mostrado en la Fig. B.1 del apéndice B. Este circuito incluye también un filtro Notch de 60 hz para disminuir el ruido eléctrico proveniente de la fuente de alimentación alterna cuando se utiliza el preamplificador SR560, seguido de un filtro paso bajas que se describe en la Fig. B.2 con frecuencia de corte en 1.59 kHz y finalmente una etapa de amplificación con ganancia de 500 que se realiza por medio de un preamplificador de bajo ruido modelo SR560 de Stanford Research. La señal en voltaje que sale de la etapa de preamplificación se visualiza en un osciloscopio digital de fosforo modelo TDS 3034C marca Tektronix.

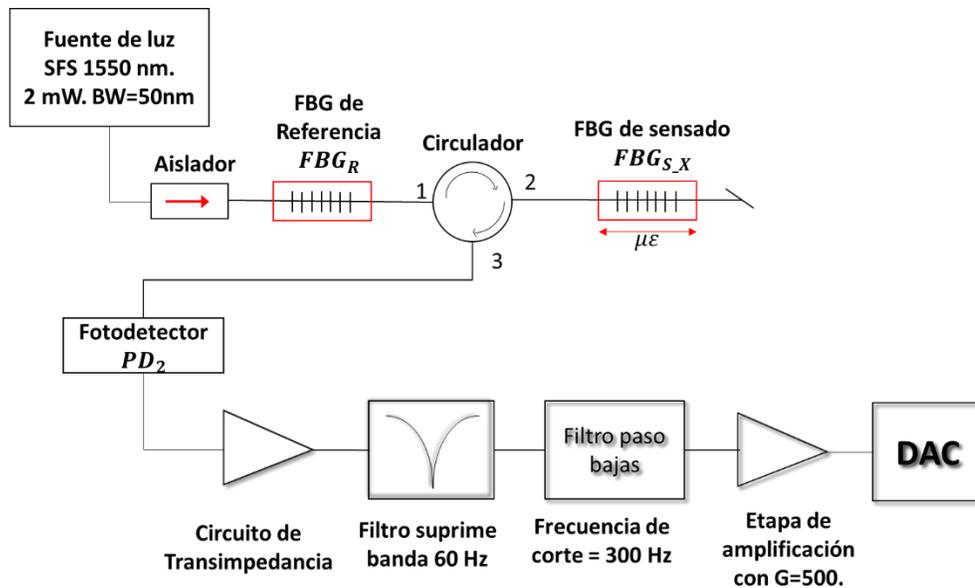


Fig. 3.15. Esquema óptico del sensor experimental uniaxial.

Después de haber instrumentado el prototipo de un sensor uniaxial se procede a realizar un prototipo de un sensor biaxial, el esquema óptico se muestra en la Fig. 3.16 y es aquí donde se hace un cambio de la forma habitual de hacer la interrogación de un acelerómetro de dos y tres ejes, normalmente se utiliza una FBG de referencia para cada eje de sensado [29-31], en el esquema que se propone aquí se utiliza una sola FBG de referencia para ambos ejes de sensado lo que ahorra el uso de una FBG para el caso de un sensor de dos ejes. Se cambió el circulador que se usó en el esquema de la Fig. 3.15 por acopladores 1x2. Se hizo una comparación para determinar si es mejor usar un acoplador o un circulador, los detalles se muestran en los resultados, pero se concluye que se pueden usar de manera indiferente.

El cambio principal en el esquema de la Fig. 3.16, radica en que, la luz que sale de la rejilla de referencia ya no va directamente hacia el acoplador de la FBG de sensado FBG_{S_X} sino que el haz de luz primero se reparte en proporciones iguales por medio de un acoplador 1x2 AC_1 hacia ambos ejes, la condición para que el sensor funcione con el método de superposición de rejillas Bragg es que el espectro de ambas FBG's de sensado, tanto la del eje x como la del eje y se superpongan con el espectro de la FBG de referencia. Dado que el espectro de la FBG de referencia inicialmente no está centrado entre los espectros de las FBG's de sensado, se hace una sintonización por medio de una platina mecánica a la FBG de referencia para dejarla en un punto óptimo de trabajo.

3.5 Determinación del valor del desplazamiento δ_A

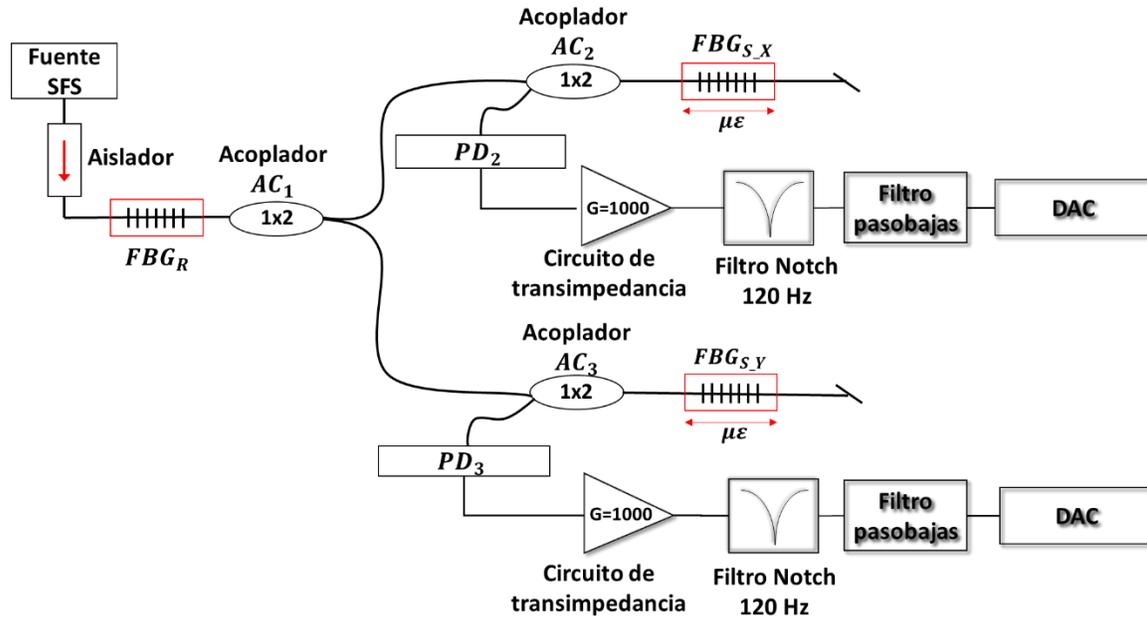


Fig. 3.16. Esquema óptico del sensor experimental de dos ejes implementado.

Para la etapa electrónica ya no se usa el preamplificador SR560, esto elimina la necesidad de usar el filtro Notch de 60 Hz que se usó para el dispositivo experimental uniaxial. La electrónica está integrada por (1) un amplificador de instrumentación con una ganancia de 1000, con esta ganancia se puede ver la señal de salida del sensor con claridad y sin llegar a saturar al amplificador, el diagrama eléctrico se muestra en la Fig. B.4, (2) un filtro Notch en 120 Hz, este filtro disminuye la componente de ruido del segundo armónico de la fuente de alimentación en 60 Hz, (Fig. B.3) y (3) un filtro pasobajas con frecuencia de corte en 1.59 kHz (Fig. B.2), esta frecuencia de corte permite que el filtro elimine las componentes de ruido de altas frecuencias y deje pasar sin atenuar las frecuencias por debajo de 200 Hz, frecuencias en las que se caracterizó el dispositivo. El resultado se obtiene en el osciloscopio.

3.5. Determinación del valor del desplazamiento δ_A

La masa de prueba se somete a un desplazamiento δ_A , mostrado en la Fig. 3.1. Debido a que la fibra óptica de la FBG está sujeta por la masa de prueba, el desplazamiento δ_A tiene la misma magnitud que la elongación de la fibra óptica. Esta elongación hace que la FBG se deforme y que su longitud de Bragg se desplace. Al utilizar la técnica de superposición de rejillas Bragg, el desplazamiento causa una variación en potencia de la luz que llega al fotodetector de fibra óptica

Para determinar el valor del desplazamiento δ_A se utiliza el método de deflexión del haz láser [32, 33], posteriormente ese desplazamiento se convierte a aceleración utilizando la ecuación (3.8) y esta aceleración se relaciona con la señal de salida del dispositivo sensor para determinar su sensibilidad.

En la Fig. 3.17 se muestra un esquema del método, este esquema es solo la parte dos del esquema de la Fig. 3.1.

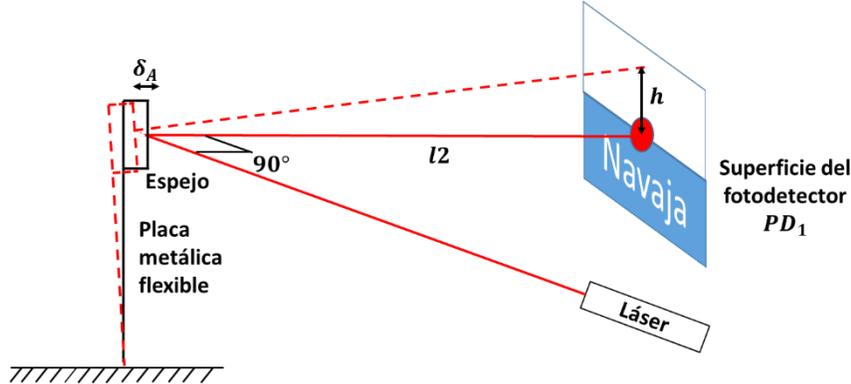


Fig. 3.17. Esquema que muestra las partes que integran el método de deflexión del haz láser: láser, espejo fijado en la superficie de la pinza para fibra óptica y fotodetector.

El OBDM se integra por un láser rojo, el espejo en el que incide y se refleja el haz láser y el fotodetector de volumen. Al haber un desplazamiento δ_A de la masa de prueba, el espejo gira sobre su eje vertical lo que ocasiona que el haz láser se desplace verticalmente sobre la superficie del fotodetector. El espejo no gira horizontalmente, por esto no se contempla un desplazamiento horizontal en la superficie del fotodetector PD_1 .

La magnitud del desplazamiento h de la Fig. 3.17 se exageró para fines ilustrativos. La mitad inferior de la superficie del fotodetector PD_1 se cubre, en este caso con una navaja, el objetivo es para que haya una variación de la potencia óptica que recibe el fotodetector, esto se logra colocando el spot del haz láser inicialmente de tal forma que la mitad incida en la superficie cubierta por la navaja y la otra mitad incida en la superficie no cubierta del fotodetector. Cuando hay un desplazamiento h pequeño, esto es, que el spot siempre incida en ambas superficies aunque en diferentes proporciones, entonces se obtiene una variación en la potencia que recibe el fotodetector. Esta variación de potencia se relaciona con h .

En el esquema que se muestra en la Fig. 3.18 se puede deducir la fórmula que relaciona al desplazamiento h con el desplazamiento δ_A . El haz de luz láser incide de forma horizontal en el espejo e inicialmente el haz sigue el camino trazado por la línea roja sólida después de que incide en el espejo. Cuando el punto rojo, que representa a la masa de prueba del sensor, se desplace una distancia δ_A , el haz láser se desplace una distancia h en el fotodetector de acuerdo con el siguiente razonamiento:

$$\tan \alpha = \frac{\delta_A}{l_1} \therefore \delta_A = l_1 \tan \alpha \approx l_1 \alpha \quad (3.15)$$

En la ecuación (3.15) se usa la condición paraxial para ángulos pequeños aplicada a la función tangente. Por otro lado se tiene que,

$$\tan 2\alpha = \frac{h}{\delta_A + l_2} \approx 2\alpha \therefore \alpha \approx \frac{h}{2(\delta_A + l_2)} \quad (3.16)$$

3.5 Determinación del valor del desplazamiento δ_A

Sustituyendo la ecuación (3.16) en (3.15):

$$\delta_A \approx \frac{l_1 h}{2(\delta_A + l_2)} \quad (3.17)$$

Al ordenar la ecuación (3.17) se obtiene $2\delta_A^2 + 2l_2\delta_A - l_1 h = 0$ que es una ecuación de segundo grado y cuya solución se muestra en la ecuación discriminando la otra solución:

$$\delta_A = \frac{-l_2 + \sqrt{l_2^2 + 2l_1 h}}{2} \quad (3.18)$$

La ecuación (3.18) nos permite obtener del desplazamiento δ_A a partir del desplazamiento h .

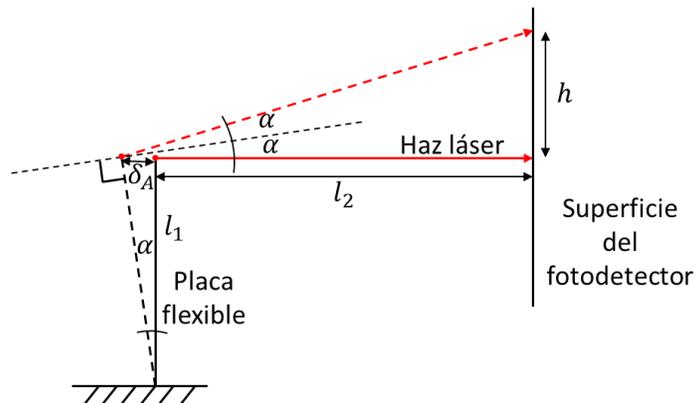


Fig. 3.18. Esquema para determinar la deformación de la fibra óptica, δ_A , a partir del desplazamiento h .

Para encontrar el valor del desplazamiento h del spot del haz láser en la superficie del fotodetector se hace una calibración de dos puntos que consiste en tomar el voltaje proporcionado por el circuito de amplificación para el fotodetector para dos diferentes alturas h_{max} y h_{min} a como se muestra en la Fig. 3.19, y después interpolar el voltaje obtenido del circuito de amplificación. El circuito de amplificación de fotodetector se muestra en la Fig. B.5 del apéndice B.

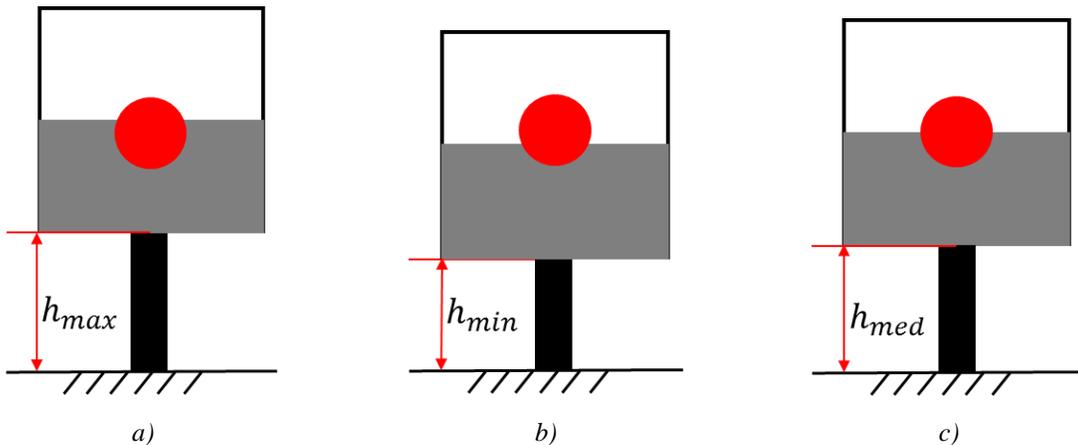


Fig. 3.19. Calibración del desplazamiento h en la superficie del fotodetector. a) Calibración del máximo, b) calibración del mínimo, c) Posición final.

CAPÍTULO 0

En la calibración se tiene considerado que el desplazamiento h entre h_{max} y h_{min} es muy pequeño comparado con el diámetro del spot, esto es para considerar que la interpolación es lineal.

El método de deflexión del haz láser tiene una resolución muy alta y un límite de detección de hasta $10\ \mu\text{m}$, dependiendo de la distancia l_2 , entre mayor es l_2 mayor resolución se tiene.

4. Resultados

4.1. Caracterización de los circuitos eléctricos

4.1.1. Caracterización de filtro Notch a 60 Hz

Después de montar todos los circuitos eléctricos y visualizar las señales en el osciloscopio vimos la presencia de una fuerte componente de ruido proveniente de la alimentación alterna en 60 Hz, aterrizamos todos los equipos y el ruido disminuyó pero aun así, existía esta señal de ruido, por esto procedimos al diseño e implementación de un filtro Notch. En la Fig. 4.1 se muestra la respuesta en frecuencia del filtro Notch, su circuito eléctrico se muestra en la Fig. B.1 del apéndice B. El filtro diseñado incluye una etapa de amplificación previa con ganancia de 9.2 dB, a la frecuencia de 60 Hz su ganancia disminuye a -12 dB, la atenuación total del filtro es de 21.2 dB, esto fue suficiente para visualizar las señales en el osciloscopio sin que el ruido afectara la visibilidad de las mismas.

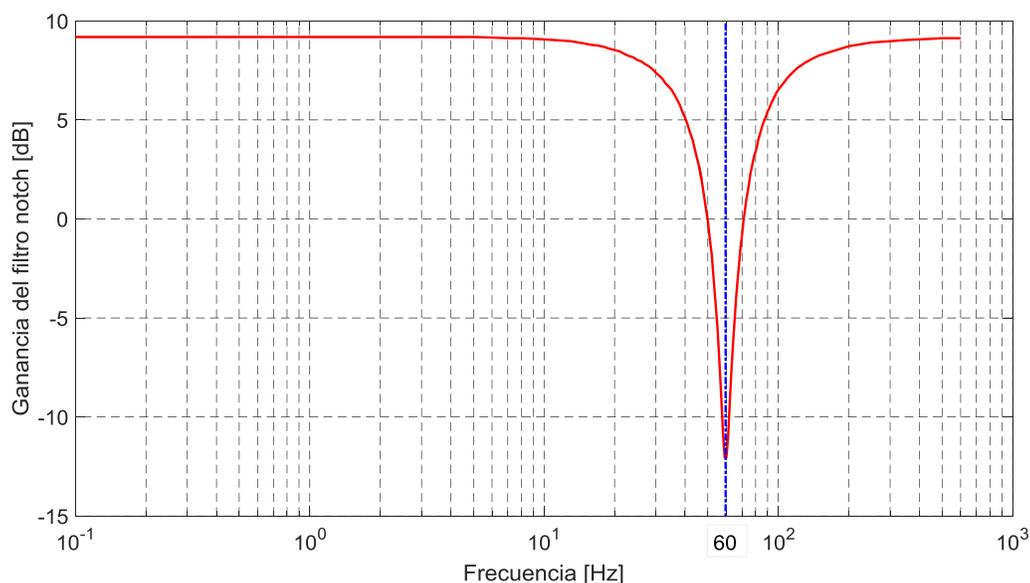


Fig. 4.1. Filtro Notch 60 Hz con amplificación de 9.2 dB y atenuación de 21.2 dB a 60 Hz

4.1.2. Caracterización de filtro Notch a 120 Hz.

Después de que se implementó el sensor uniaxial se agregó una FBG a su estructura para instrumentar el sensor biaxial, el esquema óptico se muestra en la Fig. 3.16. La etapa electrónica del dispositivo biaxial incluye una amplificación que se realiza por medio de un amplificador de instrumentación AD620A en lugar del preamplificador que se utilizó en el dispositivo uniaxial. Aquí ya no existía el ruido eléctrico de 60 Hz pero ahora apareció una componente de ruido en 120 Hz, todos los equipos están aterrizados a tierra física y aun así permanece este ruido, por esto se procedió al diseño de un filtro Notch en 120 Hz cuya respuesta en frecuencia

se aprecia en la Fig. 4.2. El fitro Notch tiene una ganancia de -31.1 dB a 120 Hz, esto es suficiente para visualizar las señales de salida del dispositivo sin que el ruido afecte.

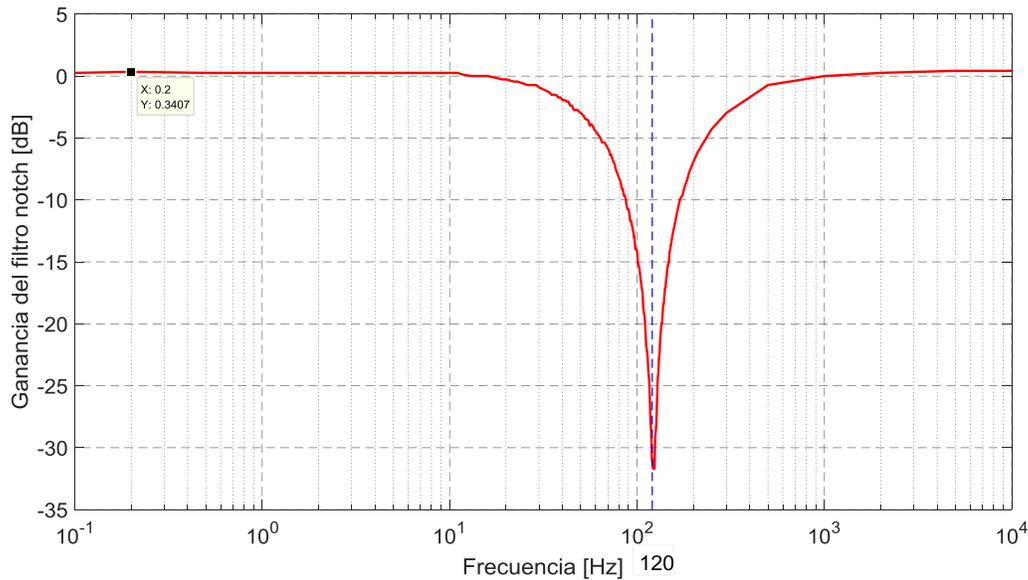


Fig. 4.2. Respuesta en frecuencia del filtro Notch a 120 Hz con ganancia de -31.1 dB a 120 Hz.

4.2. Caracterización de los elementos ópticos

4.2.1. Caracterización espectral de las rejillas de Bragg (FBG)

Para la instrumentación de los sensores se utilizaron en total dos FBG's de sensado y una FBG de referencia. En esta sección se obtienen las características experimentales de las FBG's que comprenden sus longitudes de onda Bragg, ancho de banda, reflectividad, espectros de transmisión y reflexión y la sensibilidad a la deformación de cada FBG.

En la Tabla 4.1 se muestran los datos nominales y también los experimentales de las FBG's, los datos experimentales se obtuvieron con un analizador de espectros ópticos (*Optical Spectrum Analyser - OSA*, por sus siglas en inglés) Q8381 de ADVANTEST.

Tabla 4.1. Valores nominales y experimentales de las FBG utilizadas en el sensor experimental biaxial

	# de serie	140911-1 (Referencia)	140911-18 (Eje x)	140911-17 (Eje y)
Nominal	λ_B [nm]	1519.788	1519.867	1520.058
	$\Delta\lambda_B$ [nm]	0.174	0.188	0.184
	R [%]	88.77	88.95	90.15
Experimental (no montadas)	λ_B [nm]	1519.279	1519.418	1519.602
	$\Delta\lambda_B$ [nm]	0.381	0.389	0.403
Experimental (montadas)	λ_B [nm]	1519.640	1519.690	1519.837
	$\Delta\lambda_B$ [nm]	0.309	0.283	0.288
	R [%]	57.9	59.0	58.5

4.2 Caracterización de los elementos ópticos

De la Tabla 4.1 podemos observar que las longitudes de onda de Bragg λ_B de las FBG's obtenidas experimentalmente son inferiores a las λ_B nominales, en promedio son inferiores en 471 [pm]. También se determina un ancho de banda $\Delta\lambda_B$ experimental superior al nominal y finalmente se observa una reflectividad experimental menor a la reflectividad nominal. La diferencia entre los valores nominales y los experimentales se puede deber a una descalibración o a la falta de resolución en longitud de onda del OSA, la resolución del OSA Q8381 es de 0.1 nm. Para todos los cálculos que se realizan del sensor se utilizan los datos experimentales.

En la Fig. 4.3 se muestran los espectros de reflexión de las FBG's utilizadas en el experimento obtenidos con una resolución de 100 [pm], que las FBG's estén siendo utilizadas en el experimento implica que las FBG's de sensado ya tengan un offset en sus longitudes de onda de Bragg con respecto a sus valores cuando están en sus envolturas.

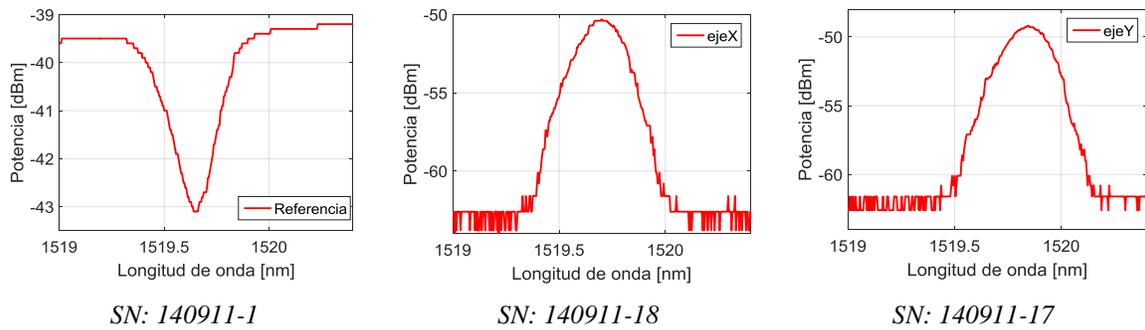


Fig. 4.3. Espectro de reflexión de las FBG's, ya montadas en el experimento.

Para obtener la reflectividad de las FBG's primero se obtienen sus espectros de transmisión y después se utiliza la ecuación (4.1). En la Fig. 4.4 se muestran los espectros de transmisión de las FBG's. La ecuación (4.1) desprecia la absorción en el material de los elementos ópticos.

$$R = 1 - T = 1 - \frac{P_t}{P_T} \quad (4.1)$$

donde R es la reflectividad de la FBG, T es su transmitancia, P_t es la potencia transmitida por la FBG a la longitud de onda de Bragg y P_T es la potencia transmitida por la FBG en la región de longitudes de onda donde no refleja luz. Para la FBG con SN 140911-1: $P_t = 255.3$ nW, $P_T = 606.5$ nW y $R = 57.9$ %. Para la FBG con SN 140911-18: $P_t = 229$ nW, $P_T = 559$ nW y $R = 59.0$ %. Para la FBG con SN 140911-17: $P_t = 244.4$ nW, $P_T = 588.5$ nW y $R = 58.5$ %.

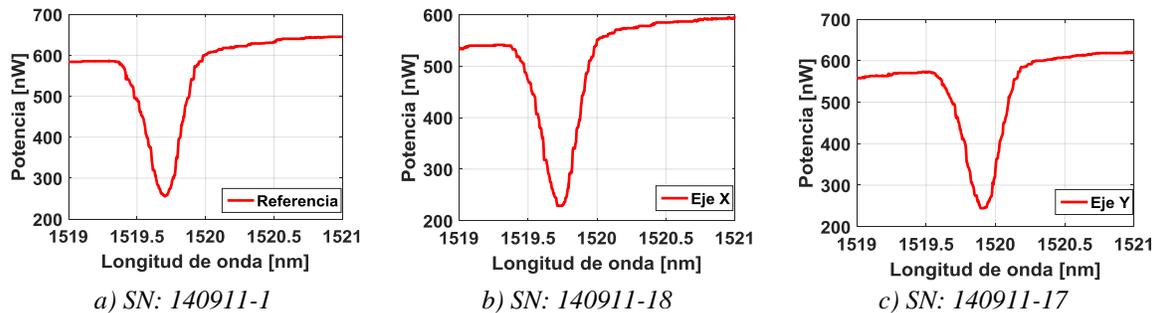


Fig. 4.4. Espectro de transmisión de las FBG's montadas en el experimento.

CAPÍTULO 4 Resultados

También se hizo un análisis de la sensibilidad de las FBG's, es decir, el cambio de su longitud de onda de Bragg respecto a la deformación que se le aplica, la configuración de los elementos utilizados para el análisis se muestra en el diagrama de la Fig. 4.5. Se colocó cada una de las FBG's entre dos postes, uno fijo sobre la mesa óptica y uno móvil sobre una platina, cada una de las FBG's se elongó desde 0 hasta 140 μm en paso de 20 μm . La platina tiene marcas de graduación a cada 10 μm .

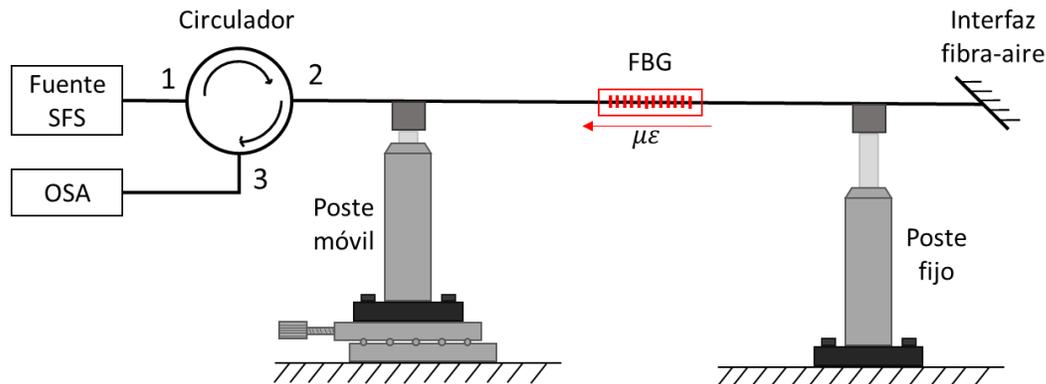


Fig. 4.5. Diagrama utilizado para el análisis de la sensibilidad de las FBG's.

La deformación aplicada a la rejilla se calcula utilizando la ecuación (3.2) donde L_3 , la distancia entre los dos postes, es igual a (86.0 ± 0.05) mm

En la Fig. 4.6 se muestra la gráfica del desplazamiento de la longitud de Bragg de las FBG's con respecto a la deformación que se le aplica. Se obtuvo una sensibilidad, utilizando el método de ajuste de mínimos cuadrados para aproximar linealmente los datos obtenidos, de $0.44 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $0.41 \text{ pm}/\mu\epsilon$ y $0.43 \text{ pm}/\mu\epsilon$ para las FBG's con SN: 140911-17, 140911-18 y 140911-01 respectivamente, y sus coeficientes de determinación R^2 fueron 0.99, 0.99, 0.93, estos coeficientes, como se vio en la sección 2.1.3.2 indican que la regresión lineal representa de manera perfecta a la sensibilidad de las FBG's 17 y 18, y de manera fuerte a la FBG 01. Se hicieron tres repeticiones de cada punto medido. La sensibilidad teórica vista en la sección 2.3.1.1 de $\Delta\lambda_B/\Delta\epsilon = 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ para una FBG a 1550nm no se cumple. La sensibilidad encontrada experimentalmente es la que se utiliza en los cálculos de aceleración del sensor.

4.2 Caracterización de los elementos ópticos

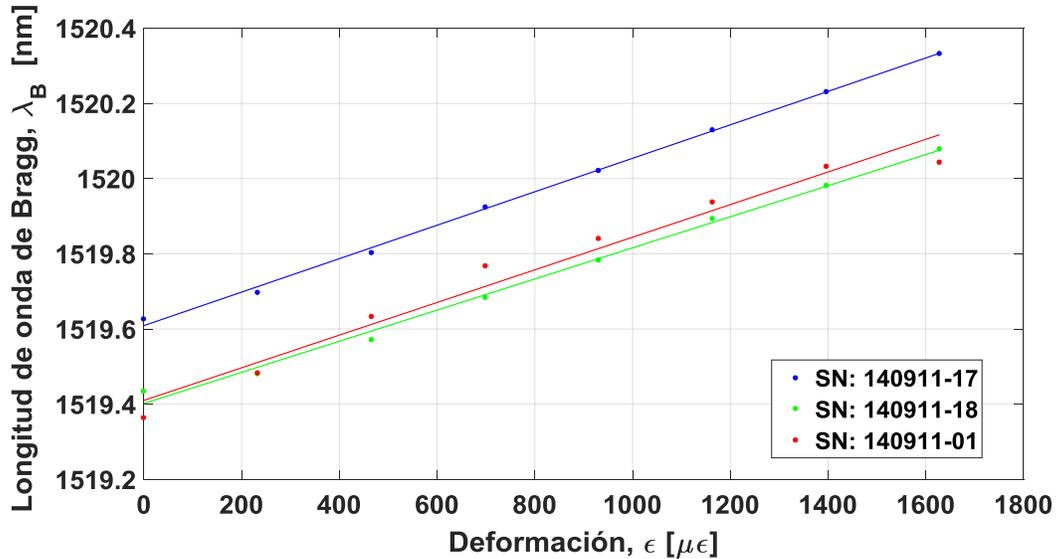


Fig. 4.6. Desplazamiento de la longitud de onda Bragg de las FBG's utilizadas en el dispositivo experimental con respecto a la deformación que se le aplica.

Por último, se hizo una comparación entre tres diferentes configuraciones ópticas para determinar si hay variación en la reflectividad de las FBG's cuando se utilizan diferentes elementos ópticos entre la fuente de luz y las FBG's, esto se realizó para saber si el hecho de que hubiera un aislador entre la fuente y la FBG afectaba de alguna forma a la reflectividad de la FBG. Una menor reflectividad de la FBG implica menor sensibilidad del sensor.

El experimento se hizo con una misma rejilla. En el primer caso se colocó un aislador, en el segundo un circulador y en el tercero se hizo conexión directa de la fuente de luz a la FBG. En la Fig. 4.7 se muestran los espectros de transmitancia de la FBG de referencia con SN: 140911-1 tomados con una resolución de 0.1 nm en el OSA. A partir de dichos espectros se obtiene una reflectividad de 57.3 % con el aislador, 56.6 % con el circulador y 57.4 % cuando se hace la conexión directa de la fuente a la FBG, por esto se concluye que no hay influencia de éstos elementos en la reflectividad de la FBG aunque si se nota que hay mayor potencia transmitida utilizando el aislador.

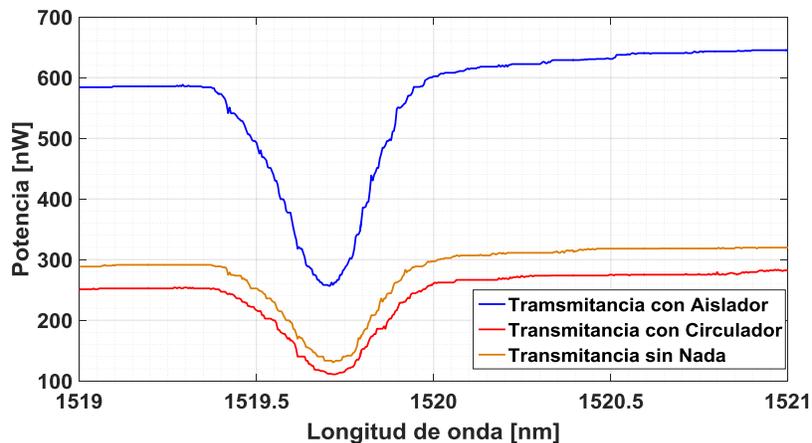


Fig. 4.7. Espectros de transmitancia de la FBG de referencia SN: 140911-1.

4.2.2. Caracterización de acopladores 1x2

Para la implementación del sensor biaxial, de acuerdo con el esquema de la Fig. 3.16, se utilizaron 3 acopladores 1x2 como el que se muestra en la Fig. 4.8. Cada uno de ellos fue caracterizado y los resultados se muestran en la Tabla 4.2. El fabricante especifica 0.1-0.15 dB como pérdida por exceso y 3.4-3.6 dB en pérdidas por inserción, la pérdida por inserción si está dentro del rango especificado por el fabricante pero las perdidas por exceso son mayores que las especificadas, esto puede deberse a las pérdidas que existen en los conectores que unen las fibras ópticas a los acopladores 1x2, aun así se determina que son aptos para utilizarse dado que la fuente SFS tiene suficiente potencia para compensar las pérdidas.

Tabla 4.2. Caracterización de los acopladores 1x2 utilizados en el sensor biaxial.

Número de serie	14009605N	140051585	-
P_{in} (puerto 1) [μ W]	871.4 \pm 29.7	778.3 \pm 1.7	1010
P_{out1} (puerto 2) [μ W]	395	276	444
P_{out2} (puerto 3) [μ W]	399	355	448.6
Pérdidas por exceso [dB]	0.40	0.91	0.54
Pérdidas por inserción [dB]			
puerto 1 \rightarrow puerto 2	3.44	4.50	3.57
puerto 1 \rightarrow puerto 3	3.39	3.41	3.52
Tasa de acoplamiento [%]			
puerto 1 \rightarrow puerto 2	49.7	43.7	50.3
puerto 1 \rightarrow puerto 3	50.3	56.3	49.7

La medición de las potencias ópticas se hizo con el multímetro óptico OMM-6810B de ILX LIGHTWAVE con una cabeza de detección sensible en el rango de 950 a 1650 [nm].

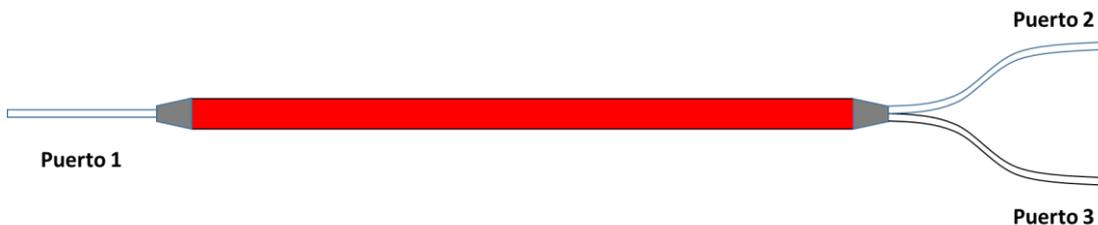


Fig. 4.8. Acoplador 1x2 modelo SWB-1550-1x2-P-50/50-1-FA

Comparación de sensibilidad del circulador de 3 puertos y el acoplador 1x2

En el dispositivo uniaxial de la Fig. 3.15 se utilizó un circulador, pero en el dispositivo biaxial se necesitaban dos circuladores, teniendo uno en existencia, por esto se optó por utilizar en su lugar dos acopladores 1x2. Para determinar si se tenía el mismo resultado en cuanto al voltaje de salida del sensor al usar los acopladores que cuando se usaba el circulador, se hizo

4.2 Caracterización de los elementos ópticos

una medición con cada uno de estos elementos usando el mismo esquema de la Fig. 3.15 intercambiando el circulador y el acoplador, los resultados se muestran en la Fig. 4.9.

Para hacer la comparación se utilizó un circulador modelo CIR-3-1550-P-1-FA de OeMarket con SN: 16001188 y luego un acoplador 1x2 de OeMarket modelo SWB-1550-1x2-P-50/50-1-FA con SN: 14009605.

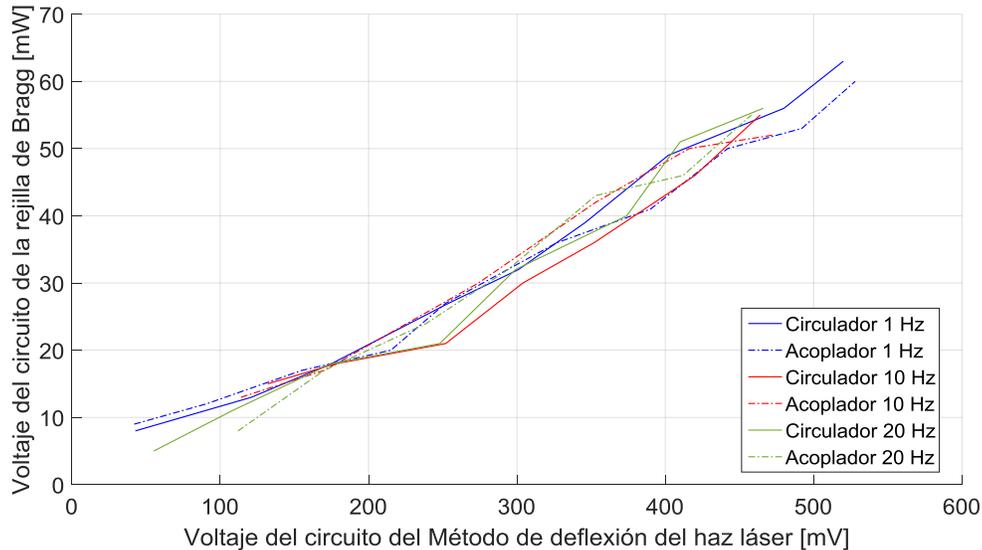


Fig. 4.9. Comparación de la sensibilidad del circulador con respecto a la de un acoplador en el sensor experimental.

En la Fig. 4.9 se observa que no hay cambio en el voltaje de salida del circuito de la FBG cuando se intercambia el circulador y el acoplador. Esto nos prueba que podemos utilizar acopladores en lugar de circuladores para implementar el dispositivo biaxial sin afectar sus características de funcionamiento.

4.2.3. Espectro de emisión de la fuente superluminiscente S5FC1005SXL

Se utilizó una fuente superluminiscente en fibra óptica (*Superluminescent Fiber Source* - SFS, por sus siglas en inglés) como parte de los equipos necesarios para integrar el dispositivo, la SFS tiene ventaja sobre un láser en que se presenta menos ruido en las señales de salida del sensor.

El espectro de emisión de la fuente se puede obtener a diferentes resoluciones en longitud de onda con el OSA, en todos los casos la potencia total emitida por la fuente debe ser la misma, para mostrar esto, el espectro de la fuente se obtuvo a resoluciones de 0.1, 0.2 y 0.5 nm.

En la Fig. 4.10 se muestran los espectros de emisión de la SFS obtenidos con el OSA Q8381, en escala lineal.

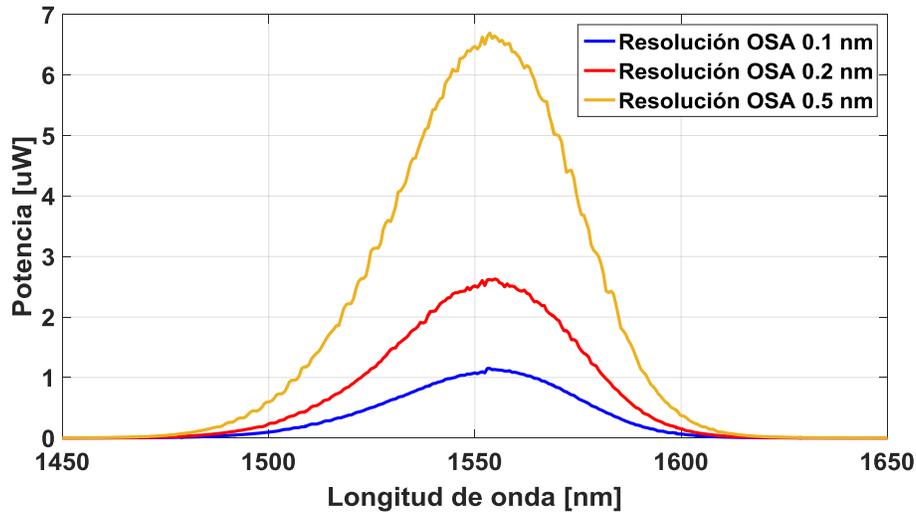


Fig. 4.10. Espectro de emisión de la fuente SFS modelo S5FC1005SXL.

En la Tabla 4.3 se muestra la potencia total proporcionada por la fuente calculada con un programa creado en Matlab, el código se encuentra en el Anexo A, en la tabla también se muestra el ancho de banda de la fuente.

Tabla 4.3. Valores experimentales de la fuente superluminiscente modelo S5FC1005SXL.

Resolución [nm]	λ_c [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$P_{emitida}$ [mW]
0.1	1554.28	50.78	0.6051
0.2	1554.25	50.55	0.7006
0.5	1554.27	50.90	0.7226

Según el analizador de espectros, la potencia emitida por la fuente superluminiscente es en promedio de (680 ± 40) μW , cabe aclarar que la conexión entre la SFS y el OSA se hizo con un cable de fibra óptica que por naturaleza presenta pérdidas, por lo que la potencia de la fuente es mayor. La potencia de la fuente calculada a partir del espectro obtenido con el OSA es consistente con la potencia medida con el Multímetro óptico OMM-6810B, en donde se lee en promedio (880 ± 120) μW , la variación entre la potencia leída con el OSA y la potencia leída con el multímetro óptico se debe también a que la potencia de la fuente no es perfectamente estable sino que tiene variaciones dentro del rango mencionado.

4.2.4. Potencias en las diferentes secciones del circuito óptico del dispositivo experimental biaxial

Se hizo una medición de las potencias con el multímetro óptico OMM-6810B en cada parte del esquema óptico del dispositivo biaxial, los resultados se muestran en la Fig. 4.11.

4.3 Caracterización de los dispositivos experimentales

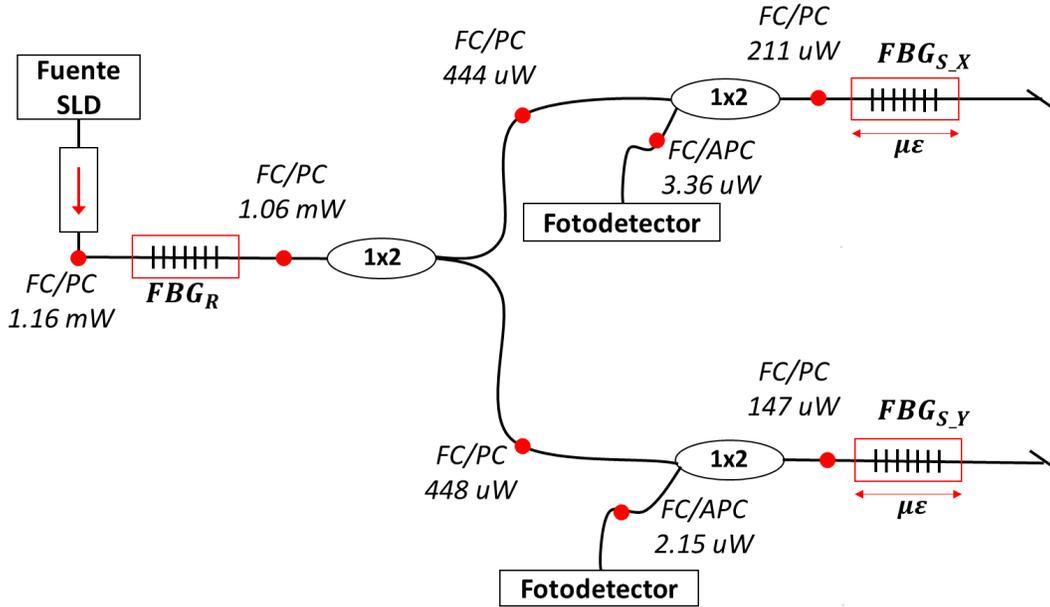


Fig. 4.11. Potencias en las diferentes secciones del circuito óptico del dispositivo experimental biaxial.

4.3. Caracterización de los dispositivos experimentales

4.3.1. Deducción de la aceleración g a partir del desplazamiento δ_A de la FBG de sensado

Para obtener el valor de la aceleración a la que se somete el sensor cuando se le induce una vibración con el electroimán se utiliza el OBDM descrito en la sección 3.5. Primero se hace la calibración (descrita en la Fig. 3.19) en el fotodetector de volumen PD_1 para obtener el valor del desplazamiento del haz láser en la superficie del fotodetector h a partir del voltaje de salida del mismo. Después se colocan los valores de los parámetros constantes en la ecuación (3.18) para obtener el valor de δ_A a partir de h previamente calculado. Finalmente se utiliza la ecuación (3.8) para determinar la aceleración a partir de δ_A .

4.3.1.1. Asignación de valores a los parámetros a usar en el OBDM para determinar el valor del desplazamiento δ_A

En la Tabla 4.4 se muestran los valores de los parámetros constantes necesarios para determinar el valor del desplazamiento δ_A de la masa de prueba del sensor. Se utiliza la ecuación (3.7) para determinar la rigidez elástica k_2 de la fibra.

Tabla 4.4. Parámetros constantes para el sensor experimental uniaxial.

Dispositivo uniaxial			
l_1 (altura del poste)	(90.1±0.05) mm	k_2	8412 N/m
l_2 (distancia del espejo al fotodetector)	(164.8±0.05) mm	Calibración de h	
l_3 (distancia entre los postes)	(92.8±0.05) mm	V_{max}	(4.33±0.005) V
m_{eff} (masa de prueba)	(23.068±0.0005) gramos	V_{min}	(2.63±0.005) V

CAPÍTULO 4 Resultados

E_{SMF} (rigidez de la fibra óptica)	16.56±0.39 GPa	h_{min}	(10.24±0.005) mm
A_{SMF} (sección transversal de la fibra)	(47.14±0.02)x10 ⁻⁹ m ²	h_{max}	(12.90±0.005) mm

El desplazamiento h se obtiene usando la ecuación (4.2) con el método de calibración descrito en la sección 3.5.

$$h = \frac{h_{max} - h_{min}}{V_{max} - V_{min}} V_{láser} = 1.565 * V_{láser} [mm] \quad (4.2)$$

En donde $V_{láser}$ es el voltaje variable que se obtiene del fotodetector PD_1 del circuito del OBDM. Para calcular δ_A a partir de h utilizamos la ecuación (3.18) y los valores de la Tabla 4.4:

$$\delta_A = \frac{-164.8 + \sqrt{164.8^2 + 2 * 90.1h}}{2} [mm] \quad (4.3)$$

La ecuación (4.3) es válida para el sensor uniaxial. En la Tabla 4.5 se encuentran los parámetros para el sensor biaxial.

Tabla 4.5. Parámetros constantes para el sensor biaxial.

Dispositivo biaxial			
l_1 (altura del poste)	(95.2±0.05) mm	k_{2X}	6456.9 N/m
l_2 (distancia del espejo al fotodetector)	(186.9±0.05) mm	k_{2Y}	6326.1 N/m
l_{3X} (distancia entre los postes, eje x)	(120.9±0.05) mm	Calibración de h	
l_{3Y} (distancia entre los postes, eje y)	(123.4±0.05) mm	V_{max}	(+9.50±0.005) V
m_{eff} (masa de prueba)	(17.200±0.0005) gramos	V_{min}	(-9.30±0.005) V
E_{SMF} (rigidez de la fibra óptica)	16.56±0.39 GPa	h_{min}	(123.01±0.005) mm
A_{SMF} (sección transversal de la fibra)	(47.14±0.02)x10 ⁻⁹ m ²	h_{max}	(123.64±0.005) mm

El desplazamiento h se obtiene a partir de la calibración con los valores de la Tabla 4.5 usando la ecuación (4.2):

$$h = \frac{h_{max} - h_{min}}{V_{max} - V_{min}} V_{láser} = 0.0335 * V_{láser} [mm] \quad (4.4)$$

Como se vio en la sección 3.2, en la Fig. 3.9, el desplazamiento de la masa de prueba para el caso del dispositivo biaxial no es δ_A sino $\delta_A/\sqrt{2}$ que aquí se nombra como δ_{AXY} . Primero determinamos δ_A y después aplicamos el factor $1/\sqrt{2}$ para obtener δ_{AXY} .

Para calcular δ_A utilizamos nuevamente la ecuación (3.18), δ_{AXY} es entonces:

$$\delta_{AXY} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{-186.9 + \sqrt{186.9^2 + 2 * 95.2h}}{2} [mm] \quad (4.5)$$

4.3 Caracterización de los dispositivos experimentales

La ecuación (4.5) nos permite calcular el desplazamiento de la masa de prueba en los ejes x e y del dispositivo biaxial. El desplazamiento mínimo calculado para $h=3.8 \mu\text{m}$ es de $0.68 \mu\text{m}$ y el desplazamiento máximo obtenido con $h=647 \mu\text{m}$ es de $116.4 \mu\text{m}$.

4.3.1.2. Obtención del desplazamiento de la longitud de Bragg de la FBG $\Delta\lambda_B$ a partir de δ_A

La medición de δ_A se obtuvo mediante el OBDM, ahora se obtiene $\Delta\lambda_B$ a partir de δ_A que están relacionados por la ecuación (2.15). No se toma en cuenta el cambio en $\Delta\lambda_B$ debido a la temperatura ya que se usa una FBG de referencia en el sensor que compensa los cambios en la longitud de onda de Bragg. La compensación se logra porque las FBG's sufren el desplazamiento de su longitud de Bragg en el mismo sentido y magnitud cuando la temperatura cambia, manteniendo constante la diferencia de las mismas.

Para el dispositivo uniaxial primero se encuentra la deformación que se ejerce a la FBG a partir de la ecuación (3.2):

$$\varepsilon = \frac{\delta_A}{92.8 * 1e6} [\mu\varepsilon, u. a] \quad (4.6)$$

El cambio de la longitud de onda de Bragg de FBG de sensado se obtiene usando la ecuación (2.15) y los datos experimentales de la Fig. 4.6 donde resultó que $\Delta\lambda_B/\Delta\varepsilon = 0.44 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ para la FBG 140911-17 que se usó en el dispositivo uniaxial, por tanto, para el sensor uniaxial:

$$\Delta\lambda_B = 0.44 * \frac{\delta_A}{92.8 * 1e6} [\text{pm}] \quad (4.7)$$

Para el sensor biaxial hay dos ecuaciones para obtener $\Delta\lambda_B$, uno para cada eje y corresponden a las ecuaciones (4.8) y (4.9) para el eje x y el eje y respectivamente.

$$\Delta\lambda_{BX} = 0.41 * \frac{\delta_{A2}}{120.9 * 1e6} [\text{pm}] \quad (4.8)$$

$$\Delta\lambda_{BY} = 0.44 * \frac{\delta_{A2}}{123.4 * 1e6} [\text{pm}] \quad (4.9)$$

Los factores 0.41 y 0.44 se obtuvieron experimentalmente para las FBG's en la sección 4.2.1.

4.3.1.3. Obtención de la aceleración a , aplicada al sensor como estímulo, a partir de δ_A

La aceleración, a , que se ejerce al dispositivo a través del electroimán se calcula utilizando la ecuación (2.19), δ_A en milímetros, por eso el factor 1×10^3 .

$$a = \frac{k_2}{m} \delta_A = \frac{8412}{0.023068 * 1 \times 10^3} \delta_A [m/s^2] \quad (4.10)$$

La ecuación (4.10) es válida para el dispositivo uniaxial, $1g=9.8m/s^2$. Para el dispositivo biaxial, se utilizan los valores de la Tabla 4.5 y se obtiene la aceleración en el eje x , a_x , y en el eje y , a_y .

$$a_x = \frac{k_{2X}}{m} \delta_{AXY} = \frac{6456.9}{0.0172 * 1 \times 10^3} \delta_{AXY} \left[\frac{m}{s^2} \right]; a_y = \frac{6326.1}{0.0172 * 1 \times 10^3} \delta_{AXY} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (4.11)$$

A partir que aquí se procede a graficar los resultados basados en los valores de esta sección.

4.3.2. Relación señal a ruido de las mediciones del voltaje de salida del sensor experimental

Los voltajes de salida del sensor se leyeron en el osciloscopio, el diagrama óptico y eléctrico que se muestra en la figura Fig. 3.16. Toda medición tiene cierto nivel de ruido. Para la determinación del nivel de ruido aquí presente, antes de realizar las mediciones, se obtiene una gráfica sin estímulo de entrada al sensor, ésta gráfica se muestra en la Fig. 4.12 y representa el ruido presente a la salida del mismo. Se determinó una amplitud pico-pico de 14.8 mV de ruido.

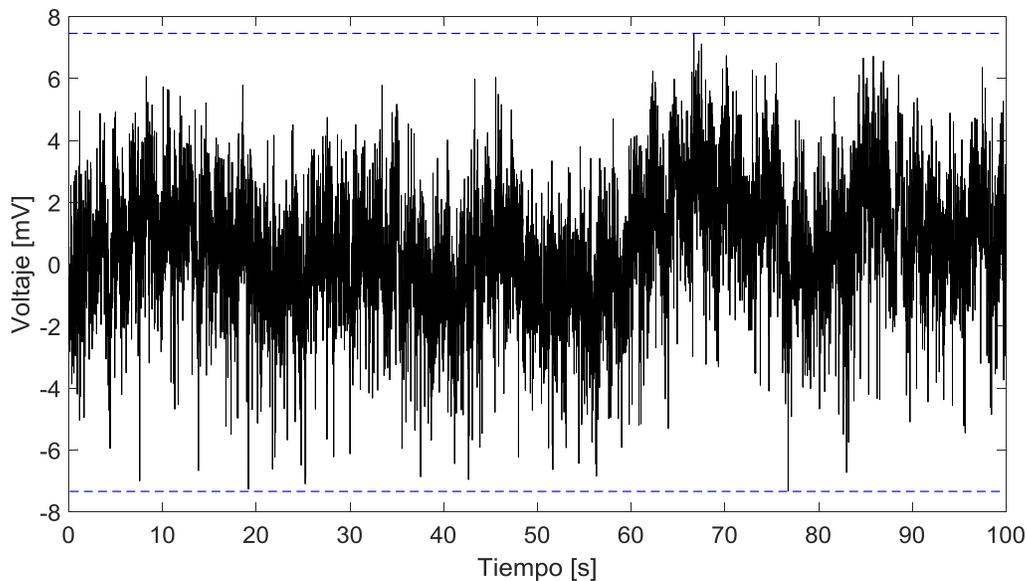


Fig. 4.12. Gráfica del ruido presente en las mediciones de la señal del voltaje de salida del sensor. El ruido tiene una amplitud de 14.8 mVpp.

Adicional a la señal de ruido, en la Fig. 4.13 se encuentra un ejemplo de las señales obtenidas a la salida del sensor. El voltaje medido alcanza los 5 Vpp en el caso del dispositivo uniaxial, y 550 mVpp en el caso del dispositivo biaxial.

Esto significa una relación señal a ruido en potencia, como se vio en la sección 2.17, para el sensor uniaxial de 50.6 dB:

$$SNR = 20 \log(V_S/V_R) = 20 \log(5/0.0148) = 50.6 [dB] \quad (4.12)$$

La relación señal a ruido para el dispositivo biaxial es de 31.4 dB:

$$SNR = 20 \log(V_S/V_R) = 20 \log(0.55/0.0148) = 31.4 [dB] \quad (4.13)$$

4.3 Caracterización de los dispositivos experimentales

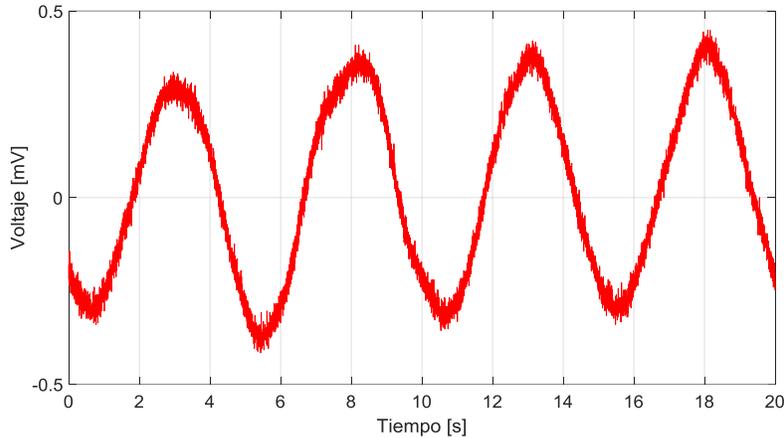


Fig. 4.13. Ejemplo de una señal en tiempo obtenida a la salida del dispositivo sensor.

4.3.3. Características del dispositivo experimental uniaxial

4.3.3.1. Barrido en frecuencia

En la gráfica de la Fig. 4.14 se aprecia un rango en frecuencia de 5 a 50 Hz en el que el dispositivo tiene una respuesta plana, esto significa una sensibilidad constante para ese rango de frecuencias cuando el voltaje de alimentación del electroimán es de 1 Vpp. La frecuencia de resonancia está en 74 Hz, de medición en frecuencias tiene que estar por debajo de la frecuencia de resonancia, se puede decir que el dispositivo determina la aceleración de movimientos periódicos cuyo rango de frecuencias sea de 5 a 50 Hz.

De acuerdo con la ecuación (2.20) y los datos de la Tabla 4.4, la frecuencia de resonancia teórica del dispositivo sensor es de $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_2}{m_{eff}}} = 96 \text{ Hz}$. Para este cálculo se utilizan los valores nominales de los parámetros de la fibra óptica y en base a ello se determina k_2 , como se puede ver no coinciden exactamente las frecuencias de resonancia teórica y práctica pero se encuentran cercana una de otra.

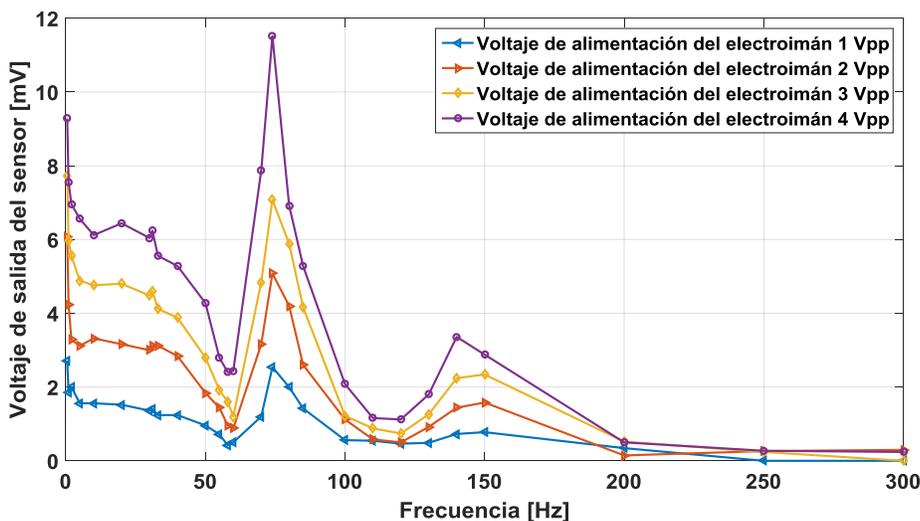


Fig. 4.14. Respuesta en frecuencia del dispositivo uniaxial obtenida experimentalmente a 1, 2, 3, y 4 Vpp de alimentación del electroimán.

4.3.3.2. Barrido en amplitud

En la gráfica de la Fig. 4.15, se muestra la respuesta del dispositivo sensor cuando se deja fija una frecuencia y se varía la amplitud de la aceleración que se ejerce sobre el sensor, en la figura se aprecia que para ciertas frecuencias se puede medir hasta 3.5 g, pero el rango de operación en amplitud, que abarca a todo el rango de frecuencias va de 0 a 1.2 g, el rango es de 0.5 a 50 Hz.

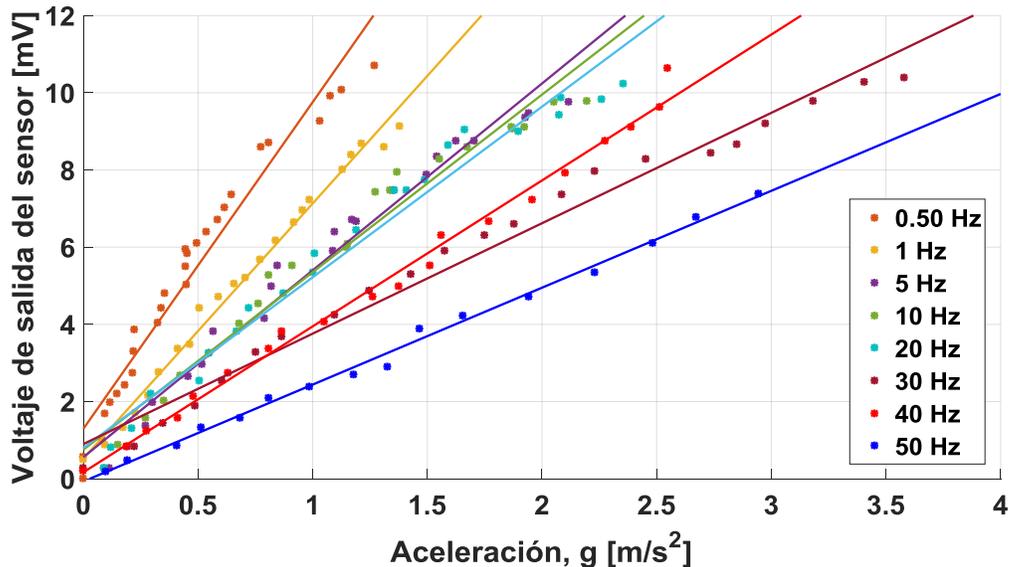


Fig. 4.15. Voltaje de salida del sensor con respecto a la aceleración ejercida sobre el a diferentes frecuencias fijas de excitación.

Los coeficientes de determinación de las aproximaciones lineales de la Fig. 4.15 son 0.95, 0.99, 0.97, 0.97, 0.97, 0.98, 0.99, y 0.99 para la lista de frecuencias de la figura, estos coeficientes indican que se tiene una excelente aproximación. Un coeficiente de determinación muy cercano a 1 (uno) indica que la regresión lineal predice muy bien el voltaje de salida del sensor.

4.3.4. Características del dispositivo experimental biaxial

4.3.4.1. Barrido en frecuencia

Se hizo un barrido en frecuencia del dispositivo biaxial. La frecuencia se varió desde 0.1 hasta 110 Hz y la prueba se repitió para voltajes de alimentación del electroimán de 1 V, 2 V, 3 V y 4 V. La frecuencia de resonancia está en 47 Hz, el voltaje de salida del eje x del sensor da una respuesta plana de 0.1 a 20 Hz, Fig. 4.16; el eje y mostrado en la Fig. 4.17 no da una respuesta plana pero se puede utilizar algún dispositivo de linealización para tener una respuesta plana en el mismo rango que el eje x del sensor.

4.3 Caracterización de los dispositivos experimentales

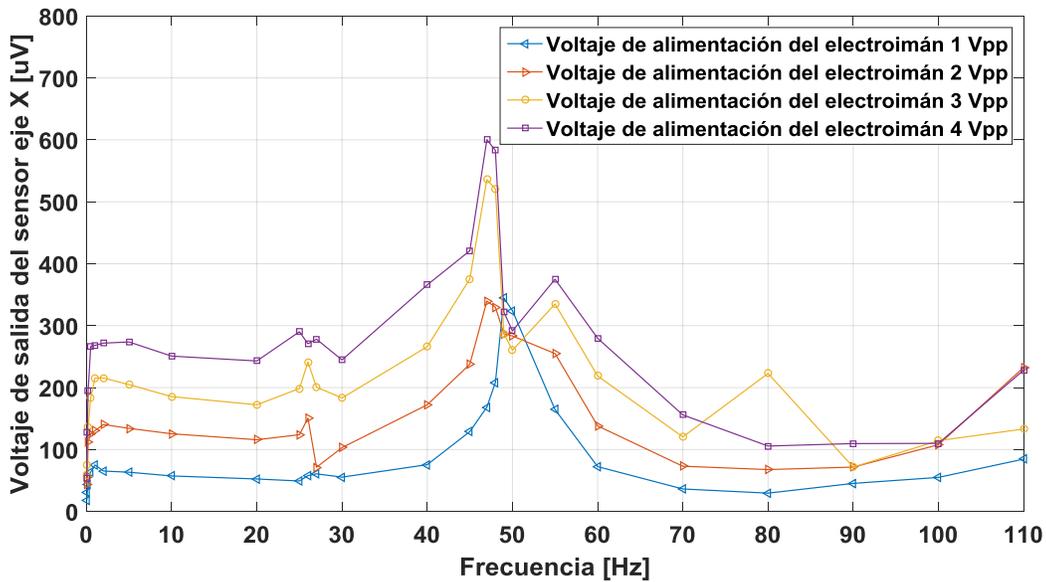


Fig. 4.16. Respuesta en frecuencia del eje x del sensor biaxial.

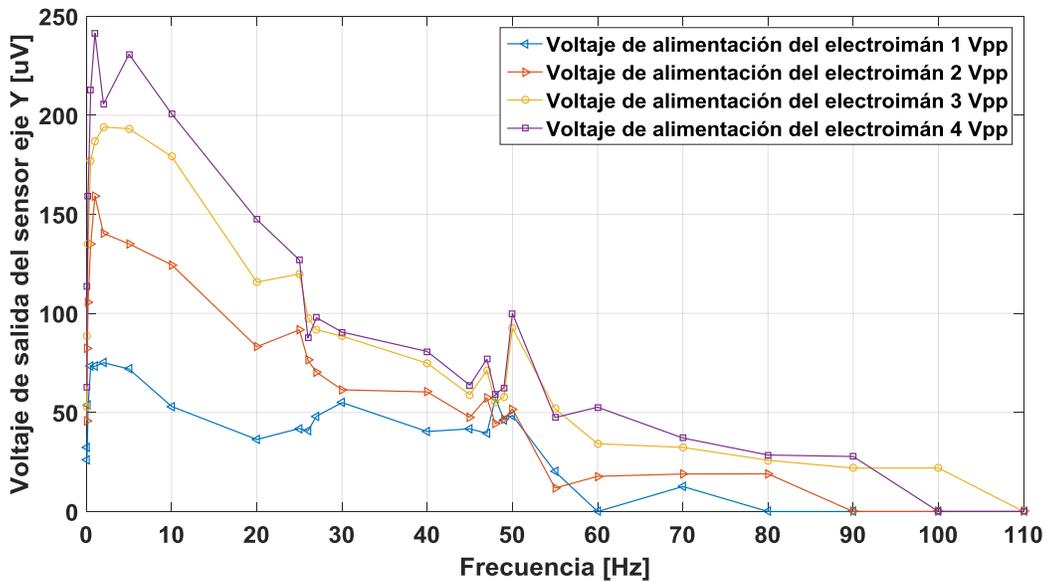


Fig. 4.17. Respuesta en frecuencia del eje y del sensor biaxial.

4.3.4.2. Barrido en amplitud

En las Fig. 4.18 y Fig. 4.19 se muestran los resultados para el barrido en amplitud del dispositivo biaxial, se establecieron diferentes frecuencias fijas y se varió el voltaje de alimentación al electroimán para cada una de estas frecuencias. Se aprecia que su amplitud no varía del todo en forma lineal, después de hacer unas pruebas de ajuste en Matlab, la aproximación necesaria para tener una curva excelente de ajuste es un polinomio de quinto grado, es un polinomio complicado.

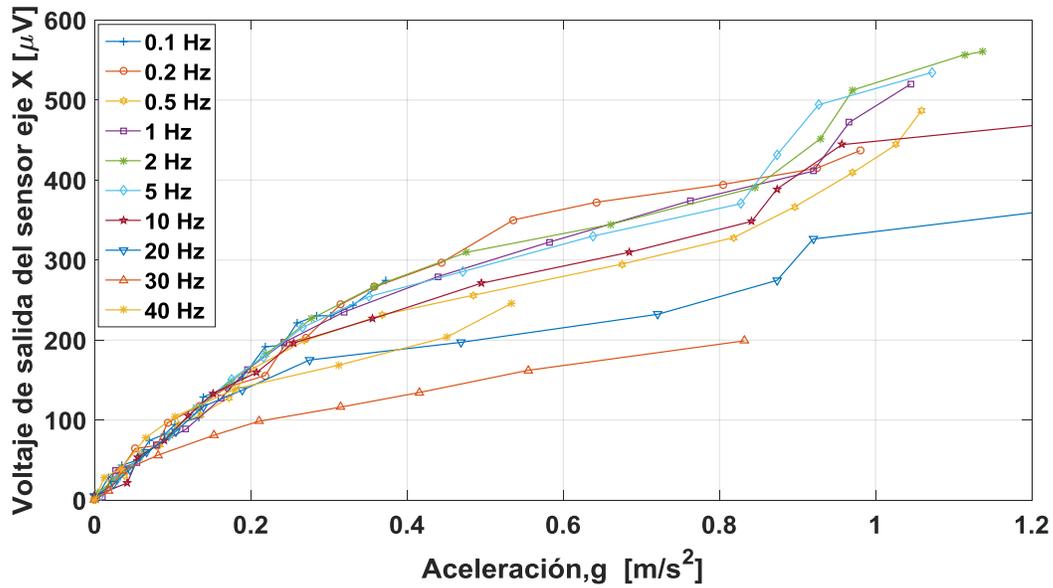


Fig. 4.18. Respuesta en amplitud del dispositivo biaxial, eje x.

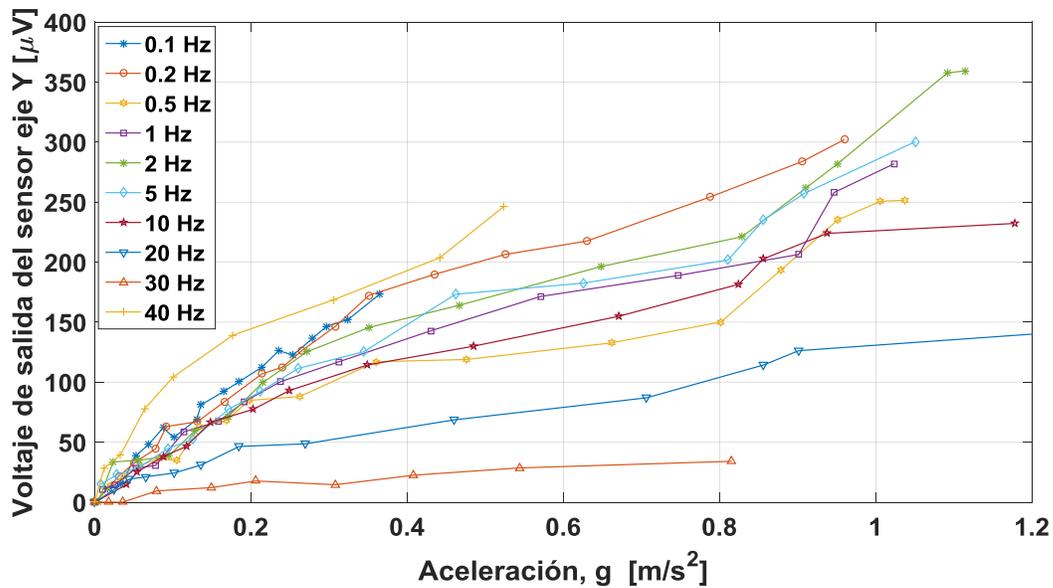


Fig. 4.19. Respuesta en amplitud del dispositivo biaxial, eje y.

En la gráfica de la Fig. 4.20 se calculó la línea de regresión lineal para la respuesta del eje y del dispositivo biaxial a 2 Hz, la sensibilidad es de 285.1 mV/g. El coeficiente de determinación es de 0.97 lo que indica que es una muy buena aproximación. Aunque una aproximación mediante un polinomio de quinto orden sería excelente, sería más complicado obtener el valor de la aceleración, por eso la aproximación lineal es una buena elección.

4.3 Caracterización de los dispositivos experimentales

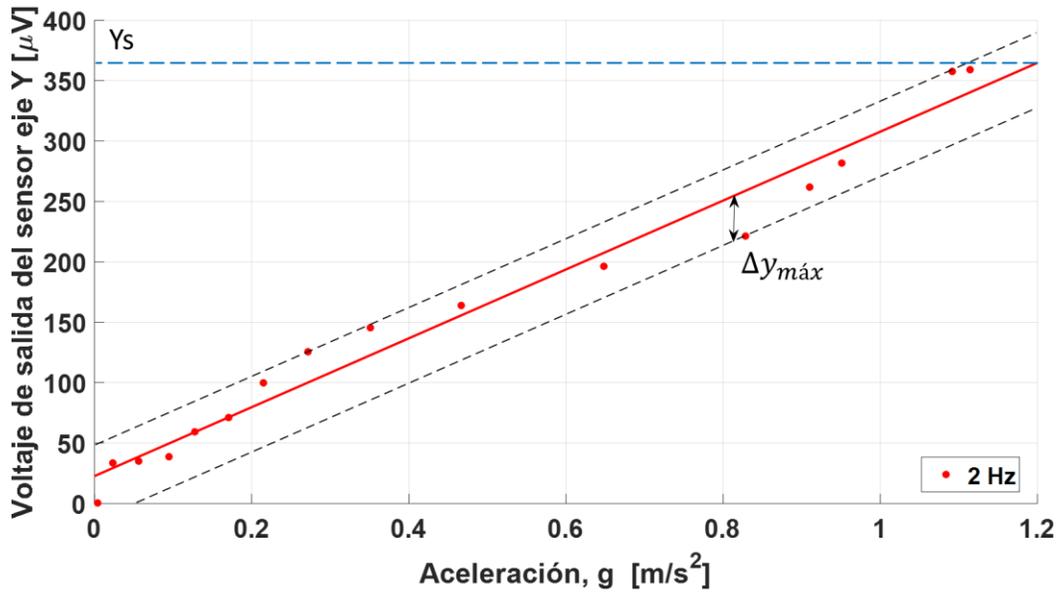


Fig. 4.20. Ajuste por mínimos cuadrados lineal de la respuesta del eje y del dispositivo biaxial a 2 Hz. El coeficiente de determinación es de 0.97.

Para determinar la linealidad de la gráfica de la Fig. 4.20, la referimos a la línea de mínimos cuadrados, esta es la más utilizada hoy en día.

La linealidad referida a la salida del sensor especificada en porcentaje (%) sobre la escala completa se calcula utilizando la ecuación (4.14).

$$Linealidad = \frac{\Delta y_{m\acute{a}x}}{Y_s} * 100 [\%] \quad (4.14)$$

Para la gráfica de la Fig. 4.20, $\Delta y_{m\acute{a}x} = (258.9 - 221.2)\mu V = 37.7\mu V$ e $Y_s = 364.8\mu V$. El valor de la linealidad es del 10.3%.

Conclusiones

Un acelerómetro se usa para medir la aceleración del objeto al se fija el sensor. Un elemento muy importante de un acelerómetro es un sensor para medir desplazamiento, en este trabajo la FBG es el sensor intrínseco de desplazamiento. Los dos dispositivos que se instrumentaron, el uniaxial y el biaxial, son sometidos a una vibración, por ejemplo de una onda sísmica y tienen la capacidad de determinar la magnitud de la aceleración que dicha vibración ejerce sobre el objeto al que está sujeto el acelerómetro; por lo anterior, a estos dispositivos los podemos nombrar acelerómetros, uniaxial y biaxial.

Los dos prototipos de acelerómetros diseñados cumplen con los requerimientos en frecuencia y amplitud para posibles aplicaciones sísmicas, la frecuencia de estos eventos se encuentran en el rango del infrasonido, por debajo de los 20 Hz; el dispositivo uniaxial resultó tener un rango operativo desde 0.01 Hz hasta 50 Hz, el sensor es sensible a mayores frecuencias pero su frecuencia de resonancia en 74 Hz no permite su uso para frecuencias más altas. Si se requiere medir frecuencias más altas, se puede disminuir la masa de prueba para incrementar la frecuencia de resonancia del sensor y tener un rango operativo mayor, pero un sensor para aplicaciones sísmicas requiere de una masa de prueba grande porque los movimientos de la tierra son lentos.

La amplitud de las ondas sísmicas está en el rango, en aceleración, de 0 a 1 g normalmente, el rango de los dispositivos aquí analizados es de 0.1 a 1.2 g. Debido a los resultados anteriormente expuestos, los dos dispositivos son aptos para aplicaciones sísmicas.

Por otro lado, se utilizó una sola FBG como referencia para decodificar el cambio en la longitud de onda de Bragg de las FBG's de sensado de los dos ejes del dispositivo biaxial instrumentado. Se logró ver de manera satisfactoria el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg de las FBG's.

La sensibilidad, esto es, el voltaje de salida del sensor con respecto a la aceleración, de cada eje del dispositivo experimental biaxial es diferente. Es deseable que la sensibilidad fuera la misma en ambos ejes pero aquí esta diferencia se debió a que el espaciado espectral de las dos FBG's de sensado con respecto al espectro de la FBG de referencia no es el óptimo, además se presenta una no linealidad mayor que en caso del dispositivo uniaxial, aun así, cuando el voltaje de salida del sensor se aproxima linealmente, el coeficiente de determinación de la regresión lineal es igual a 0.97, lo indica que la aproximación lineal representa muy bien al voltaje de salida del sensor. Si se quisiera tener una mejor aproximación, sería una aproximación polinomial de quinto orden, determinar la aceleración a partir del voltaje de salida del sensor usando este polinomio sería complicado y requiere de un procesador con buenas características

Conclusiones

técnicas de cálculo al momento de la lectura de la salida del acelerómetro directamente en aceleración y no en voltaje en el osciloscopio como se hizo en este trabajo.

La FBG es sensible tanto al desplazamiento como a los cambios de temperatura, en los dispositivos instrumentados se desprecia la influencia de los cambios en temperatura en las mediciones realizadas porque la FBG de referencia actúa como un elemento que compensa los cambios de temperatura a la que se somete el dispositivo sensor, esto es cierto siempre y cuando la FBG de referencia y las FBG's de sensado se encuentren a la misma temperatura, por esto se colocaron todas las FBG's a una distancia muy cercana.

Debido a que se usa el método de interrogación por FBG's superpuestas, se evita el uso de un equipo analizador de espectros y esto hace que el dispositivo sea más pequeño y se pueda instalar de forma más segura en lugares remotos por ejemplo. Esto muestra la viabilidad de fabricar acelerómetros localmente de bajo costo para aplicaciones en lugares con alta actividad sísmica como la Ciudad de México y tener una independencia tecnológica.

Para la calibración del sensor se usó el OBDM el cual resultó ser muy buen referente ya que es muy estable y tan sensible como la FBG, la ventaja del sensor basado en FBG's con respecto al método de deflexión del haz láser es que es más fácil de instalar en campo ya que no tiene partes de volumen sino que todo es en fibra óptica.

Los prototipos que se diseñaron requieren de un análisis completo de su estructura mecánica y óptica para añadir un tercer eje de sensado, colocar todos los componentes del acelerómetro en un mismo marco de referencia y calibrarlo directamente en una mesa vibratoria para posteriormente colocarlo en campo y realizar mediciones reales.

Bibliografía

- [1] **Fraden, J.** (2016). Sensor Characteristics. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* (pp. 35-65, 392-395). San Diego, CA, USA: Springer.
- [2] **Morikawa, S. R. K. Ribeiro, A. S. Regazzi, R. D. et al.** (2002). Triaxial Bragg Grating Accelerometer. En *15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS IEEE*, 1, 95-98. Doi: 10.1109/OFS.2002.1000510
- [3] **Antunes, P. Domingues, F. Granada, M. et al.** (2012). Mechanical Properties of Optical Fibers. En *Selected Topics on Optical Fiber Technology, Moh. Yasin, Sulaiman W. Harun and Hamzah Arof, IntechOpen*. doi: 10.5772/26515
- [4] **Chen, F. Salcic, Z. Wang, J. H.** (2006). Modelling and Performance Evaluation of a Novel Optical Accelerometer, En *Proceedings of SPIE*, 6352. doi: 10.1117/12.688179
- [5] **Tai, S. Kyuma, K. Nunoshita, M.** (1982). Fiber-optic acceleration sensor based in the photoelastic effect. En *Applied Optics*, 22, 1771-1774. doi: 10.1364/AO.22.001771
- [6] **Müller, M. S. Buck T. C Koch A W.** (2009). Fiber Bragg Grating-based Acceleration Sensor. En *2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies, IEE*. doi: 10.1109/ISOT.2009.5326111
- [7] **Gagliardi, G. Salza, M. Lam, T. et al.** (2005). 3-axis accelerometer based on lasers locked to π -shifted fibre Bragg gratings. En *Proceedings of SPIE*, 7503. doi: 10.1117/12.835163
- [8] **Abushagur, O. M. Mustafa, A. G. Karthik, N.** (2005). Novel three-axis fiber Bragg grating accelerometer. En *Proceedings of SPIE*, vol. 5877. doi: 10.1117/12.614946
- [9] **Jiang, Q. Yang, M.** (2013). Simulation and experimental study of a three-axis fiber Bragg grating accelerometer based on the pull-push mechanism. En *Meas. Sci. Technol.*, 24, 1-9. doi:10.1088/0957-0233/24/11/115105
- [10] **De Silva, C. W.** (2017). Estimation from Measurements. *Sensor Systems: Fundamentals and Applications* (pp. 165-174). Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press.
- [11] **Sinclair, I. R.** (2001). Introduction. *Sensors and Transducers* (p. xi). Great Britain: Newnes.
- [12] **Krohn, D. MacDougall, T. Mendez, A.** (2014). Wavelength-Modulated Sensors. *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications* (pp. 63-77, 107, 142, 151). Bellingham, Washington, USA: SPIE PRESS.
- [13] **De Silva, C. W.** (2016). Instrumentation of an Engineering System. *Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation* (pp. 8-27). New York: Taylor & Francis, CRC Press.
- [14] **Pardo, A. Ruiz, M. A.** (2005). Análisis de regresión lineal; el procedimiento de regresión lineal. *Análisis de datos con SPSS 13 Base*. (340-343). España: McGraw-Hill/ Interamericana.

Bibliografía

- [15] **Ott, H. W.** (1988). Active device noise. *Noise reduction techniques in electronic systems*. (pp.4, 244-249). USA: WILEY.
- [16] **Yu, F. T. S. Yin, S.** (2001) Overview of Fiber Optic Sensors. *Fiber Optic Sensors* (pp.1-4). New York: Marcel Dekker, Inc.
- [17] **Kashyap, R.** (2010). Fabrication of Bragg Gratings. *Fiber Bragg Gratings* (pp. 53-64). USA: Academic Press.
- [18] **Okamoto, K.** (2006). Coupled Mode Theory. *Fundamentals of Optical Waveguides*. (p. 171). USA: Elsevier Academic Press.
- [19] **Haus, J.** (2010). Optical Sensor Concepts *Optical Sensors: Basics and Applications* (pp. 86-90). Weinheim, Germany: WILEY-VCH.
- [20] **Grattan, K. T. V. Meggitt, B. T.** (2000). Bragg Gratings in Optical Fibers: Fundamentals and Applications. *Optical Fiber Sensor Technology: Advanced Applications – Bragg Gratings and Distributed Sensors* (pp. 79-85). City University, London, UK: Springer Science+Business Media, LLC.
- [21] **De Nazaré, F. V. B. Werneck, M. M. De Oliveira, R. et al.** (2013). *Development of an Optical Sensor Head for Current and Temperature Measurements in Power Systems*. 2013, 1-12. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/393406>
- [22] **Sauter, F.** (1989). Naturaleza del movimiento del terreno. *Fundamentos de Ingeniería Sísmica I, Introducción a la sismología* (pp. 53-64). Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- [23] **Shearer, P. M.** (2009). The seismic wave equation. *Introduction to Seismology* (pp. 49, 220). USA: Cambridge University Press.
- [24] **Hibbeler, R. C.** (2011). Esfuerzo. *Mecánica de materiales*. (5-27). México: PEARSON EDUCACIÓN.
- [25] **Casas, M. A.** (2016). *Implementación de un acelerómetro uniaxial en fibra óptica con rejilla Bragg*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, Mexico.
- [26] **Lobo, A. B. Ferreira, L. A. Santos J. L. Jackson D. A.** (1997). Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme. En *Applied Optics*, 36, 934-939. doi: 10.1364/AO.36.000934
- [27] **Casas, M. A. Sandoval-Romero, G. E.** (2018). Strain detection and measurement using a matched fibre Bragg grating. En *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 32, 1519-1526. doi: 10.1080/09205071.2018.1446366
- [28] **Willsch, M. Kraemmer, P. Theune, N. M. et al.** (2000). Highly sensitive micro-mechanical fiber Bragg grating acceleration sensor combined with a new multiplexable interrogation principle. En *Proceedings of SPIE*. 4074, 45-53. doi: 10.1117/12.397904
- [29] **Long, L.** (2010). FBG Accelerometer. *Multi-axis fiber Bragg grating accelerometer*. (29-32). Nova Scotia: Dalhousie University.
- [30] **Li, K.** (2015). Review of the Strain Modulation Methods Used in Fiber Bragg Gating Sensors. En *Hindawi Publishing Corporation Journal of Sensors*. 2016, 1-8. doi: 10.1155/2016/1284520

- [31] **Moreira, R. De Siqueira, J. L. Caldas, T de B. et al.** (2009). Improvement of Fiber Bragg Grating Interrogator Sensitivity for Triaxial Accelerometer. En *2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. 660-663. doi: 10.1109/IMOC.2009.5427499
- [32] **Putman, C. A. J. De Groot, B. G. Van, N. F. Greve, J.** (1992). A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy. En *Journal of Applied Physics*, 72, 6-12. doi: 10.1063/1.352149
- [33] **Beaulieu, L. Y. Godin, M. Laroche, O. et al.** (2007). A complete analysis of the laser beam deflection systems used in cantilever-based systems. En *Ultramicroscopy*, 107, 422-430. doi: 10.1016/j.ultramic.2006.11.001

Anexo A: Programas en Matlab utilizados para simulación.

1. Programa para simulación del espectro de luz que llega al fotodetector después de pasar por los elementos ópticos cuando se usa el método de interrogación por superposición de FBG's.

```
%Con este programa se obtienen las gráficas de las Fig. 3.12 y 3.13.
%Vector de longitud de onda
lb=1430e-9:0.01e-9:1730e-9; %para una rango de operación centrado en 1550
nm

%Valores de fuente
R0bF=1.1; l0bF=1550e-9; d10bF=38e-9; %Potencia de la fuente a 1550nm con
ancho de banda de 38 nm. En uW, nm, nm
RF=R0bF*exp(-4*log(2)*((lb-l0bF)/d10bF).^2); %Espectro de emisión de la SFS

%Valores de rejilla de referencia
R0bR=0.888; l0bR=1550e-9; d10bR=1e-9; %reflectividad, longitud de onda
central [nm], ancho de banda [nm]
RR=R0bR*exp(-4*log(2)*((lb-l0bR)/d10bR).^2); %Espectro de reflexión de la
FBG
TR=1-RR; %Espectro de transmisión

%Valores de la rejilla de sensado
R0bS=0.95; l0bS=1550.6e-9; d10bS=1e-9; %l0bS se varía.
RS=R0bS*exp(-4*log(2)*((lb-l0bS)/d10bS).^2);
TS=1-RS;

%Vector de salida
RTotal=RF-RR;
Out=TR.*RS;
Pt=sum(Out)*(1.1e-6)/10; %[nm] a resolución de 0.01 nm, el factor 0.1 es
para convertir a resolución de 0.1 nm

%Impresión de gráficas fig. 3.12.
%plot(lb*1e9,RF.*TR.*TS); %imprimir a letra 26, grueso 8.
xlabel('Longitud de onda [nm]');
ylabel('Potencia [\muW]');
%axis([1520 1580 0 1.2]);

%Impresión de gráficas fig. 3.13 inferiores
plot(lb*1e9,Out*1.1,'linewidth',7); %el factor de 1.1 um es la potencia
de la fuente Res 0.1nm a 1550nm.
xlabel('Wavelength [nm]','fontsize',18);
ylabel('Power [uW]','fontsize',18);
xlabel('Longitud de onda [nm]','fontsize',18);
ylabel('Potencia [uW]','fontsize',18);
axis([1548 1552 0 1.1]);

%impresión de gráficas fig. 3.13 superiores
```

Anexo A: Programas en Matlab utilizados para simulación.

```
%plot(lb*1e9,TR,lb*1e9,RS,'LineWidth',4);
%legend('FBG_R T','FBG_S R');
%xlabel('Longitud de onda [nm]','fontsize',22);
%ylabel('T y R','fontsize',22);
%axis([1548 1552 0 1]);
grid on;
```

2. Programa para obtención de la potencia total de la fuente SFS a diferentes resoluciones.

```
%Progama para mostrar y calcular la potencia total proporcionada por la
%fuente mod. S5FC1005SXL SN: TP00442955-100. Primero se obtienen los
%archivos con los espectros de la SFS a diferentes resoluciones del OSA.

lo=1400:6e-1:1700; %Vector de longitud de onda, la fuente está centrada en
1550 nm

nm01lineal=10.^(nm01/10); %mW, conversión a escala lineal, hay que
insertar el vector "nm01" del block de notas con los datos experimentales
nm02lineal=10.^(nm02/10); %mW, conversión a escala lineal, hay que
insertar el vector "nm02" del block de notas con los datos experimentales
nm05lineal=10.^(nm05/10); %mW, conversión a escala lineal, hay que
insertar el vector "nm05" del block de notas con los datos experimentales

%suma de todas las potencias
pt01=0; pt02=0; pt05=0; % inicialización de los acumuladores en cero.
for a=1:1:2004 %en la resolución de 0.1 nm se tiene 2004 datos a sumar
    pos=round(83+a/6); %
    pt01=pt01+nm01lineal(pos); %mW
end
for a=1:1:1002 %en la resolución de 0.2 nm se tiene 1002 datos a sumar
    pos=round(83+a/3);
    pt02=pt02+nm02lineal(pos); %mW
end
for a=1:1:401 %en la resolución de 0.5 nm se tiene 401 datos a sumar
    pos=round(83+a/1.2);
    pt05=pt05+nm05lineal(pos); %mW
end

plot(lo,nm01lineal*1e3,lo,nm02lineal*1e3,lo,nm05lineal*1e3,'linewidth',2);
%plot(lo,nm01lineal);
grid on;
legend('Resolución OSA 0.1nm','Resolución OSA 0.2nm','Resolución OSA
0.5nm');
axis([1450 1650 0 7]);
xlabel('Longitud de onda [nm]');
ylabel('Potencia [uW]');
```

Anexo B: Diagramas eléctricos de los circuitos utilizados.

1. Filtro Notch a 60 hz

Es un filtro rechaza banda, suprime banda o Notch (en inglés) activo de segundo orden en configuración doble T a 60 Hz. El circuito, de izquierda a derecha, inicia con el fotodetector en fibra óptica PD-A-25-9-1-FA y su resistencia de carga R1, el fotodetector se conecta a la entrada no inversora del amplificador OP1. El amplificador OP1 está en configuración no inversor, tiene una ganancia de 10. La salida del amplificador OP1 se conecta a la entrada del filtro suprime banda y finalmente la salida de este filtro es Vout.

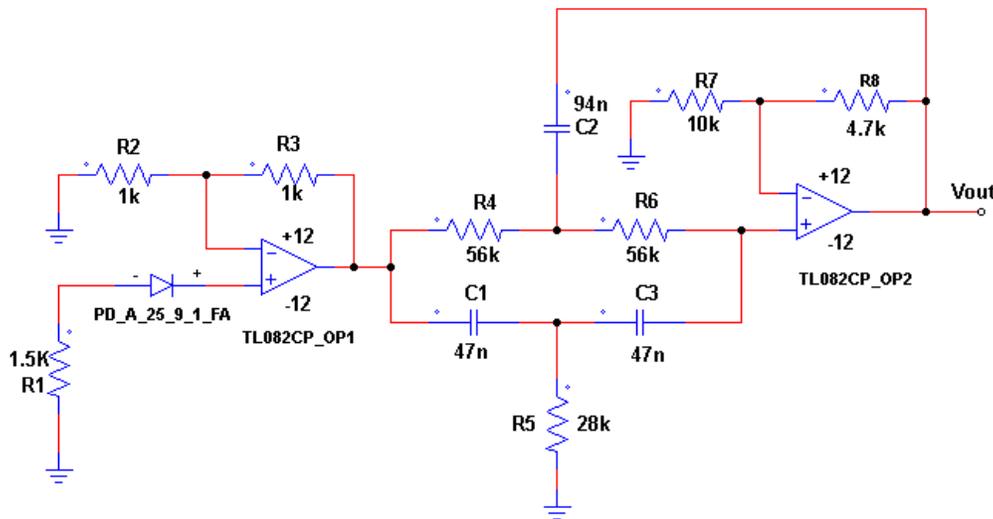


Fig. B.1. Circuito del filtro Notch en 60 Hz.

2. Circuito del Filtro pasobajas

Filtro pasobajas pasivo de primer orden, con frecuencia de corte en 1.59 kHz.

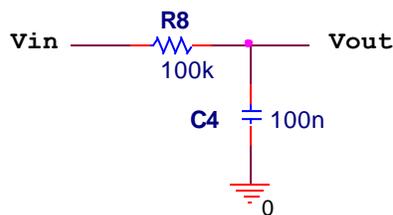


Fig. B.2. Filtro paso bajas con frecuencia de corte = 1.59 kHz

3. Filtro Notch a 120 Hz.

Es un filtro rechaza banda activo de segundo orden en configuración doble T sintonizado a 120 Hz.

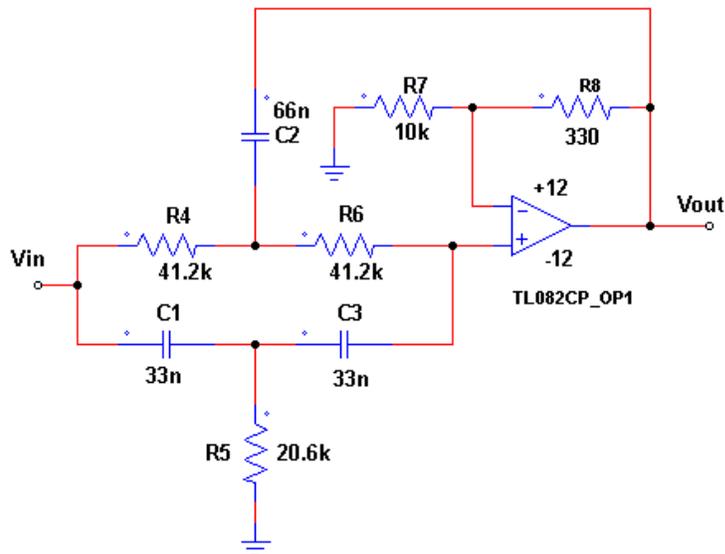


Fig. B.3. Circuito del filtro Notch en 120 Hz.

4. Circuito del amplificador de instrumentación para fotodetectores de rejilla

Circuito amplificador activo con ganancia de 1085 o 60.7 dB. Su elemento principal es el amplificador de instrumentación AD620. Se utilizó para amplificar el voltaje de salida de los fotodetectores en fibra óptica.

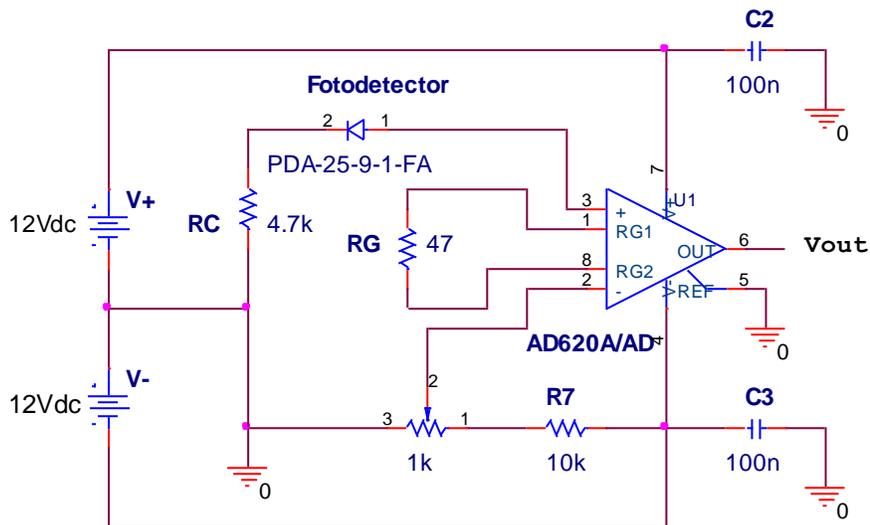


Fig. B.4. Circuito del amplificador de instrumentación- rejilla.

5. Circuito el amplificador de instrumentación para fotodetector del láser.

Circuito amplificador activo con ganancia de 108 o 40.7 dB. Su elemento principal es el amplificador de instrumentación AD620. Se utilizó para amplificar el voltaje de salida del fotodetector de volumen en el OBDM.

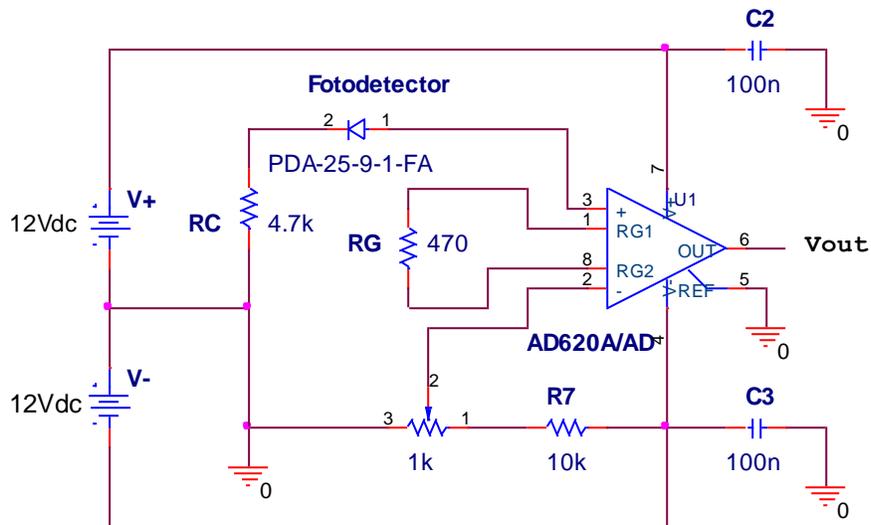


Fig. B.5. Circuito del amplificador de instrumentación-deflexión del haz

6. Circuito de alimentación para el electroimán.

Es un circuito amplificador de corriente en configuración de colector común. La señal de entrada se aplica a la base y la salida se toma del emisor. Se usa cuando se quiere conectar una fuente de entrada de alta impedancia, como el generador de funciones, a una carga de salida de baja impedancia, como el electroimán, que requiere una alta ganancia de corriente. Está basado en un transistor de potencia en configuración Darlington TIP120.

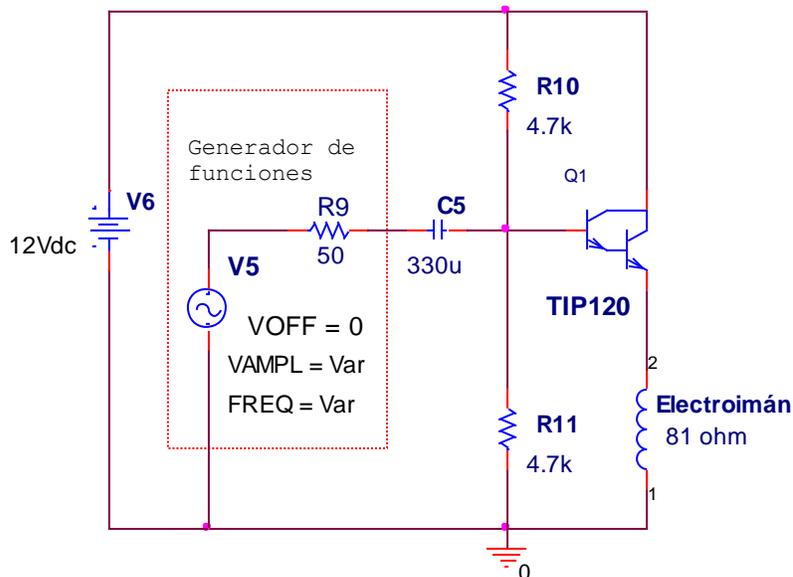


Fig. B.6. Circuito de alimentación para el electroimán

Anexo B: Diagramas eléctricos de los circuitos utilizados.

Anexo C: Lista de equipos y materiales utilizados en los sensores.

MATERIALES

1. Rejilla de Bragg en fibra óptica de Alxenses, $\lambda_B=1519.788$ nm, ancho de banda de 0.174 nm, 88.77% de reflectividad, 10 mm de longitud, en fibra óptica SMF-28e, conectores FC/PC macho. SN140911-1.
2. Rejilla de Bragg en fibra óptica de Alxenses, $\lambda_B=1519.867$ nm, ancho de banda de 0.188 nm, 88.95% de reflectividad, 10 mm de longitud, en fibra óptica SMF-28e, conectores FC/PC macho. SN140911-18.
3. Rejilla de Bragg en fibra óptica de Alxenses, $\lambda_B=1520.058$ nm, ancho de banda de 0.184 nm, 90.15% de reflectividad, 10 mm de longitud, en fibra óptica SMF-28e, conectores FC/PC macho. SN140911-17.
4. Circulador óptico monomodal CIR-3-1550-P-1-FA de OeMarket, longitud de onda de trabajo 1550 ± 30 nm, conectores FC/APC macho.
5. 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 sin conectores.
6. 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
7. 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 @ 1550nm.
8. Láser HeNe de Melles Griot, longitud de onda 632.8 nm, potencia máxima 1 mW.
9. Fotodetector de volumen PIN Si, rango de detección de 400-1100 nm.
10. 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, y 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 máxima de 0.1 nm.
4. Multímetro óptico, OMM-6810B de ILX LIGHWAVE con una cabeza de detección para medición de longitudes de onda en el rango de 950 – 1650 nm.

Anexo C: Lista de equipos y materiales utilizados en los sensores.

5. Preamplificador de bajo ruido SR560 de Stanford Research Systems, tiene un filtro pasobajas variable de 0.03 Hz – 1 MHz, un filtro paso altas variable de 0.03 Hz – 1 MHz y una etapa de amplificación con una ganancia variable desde 1 hasta 5×10^4 . Los filtros se pueden configurar a 6 db/oct o 12 db/oct. Entrada máxima de 1 VCC y 3 Vpp max para acoplamiento AC. Salida máxima dde 10 Vpp. Ruido de $4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz.
6. Generador de funciones de 30 MHz modelo 33521A de Agilent.