UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA ELÉCTRICA - INSTRUMENTACIÓN

INSTRUMENTACIÓN, ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SENSOR DE DESPLAZAMIENTO A BASE DE REJILLAS BRAGG EN FIBRA ÓPTICA

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
FERNANDO VELÁZQUEZ CARREÓN

TUTOR PRINCIPAL:
DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO,
INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA, UNAM

MÉXICO, CDMX. JUNIO 2022

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Hernández Cordero Juan A.
Secretario:	Dr. Ceballos Herrera Daniel Enrique.
Vocal:	Dr. Sandoval Romero Gabriel Eduardo.
1er. Suplente:	Dra. Sánchez Pérez Celia Angelina.
2do. Suplente:	Dr. Naser Qureshi

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

Al programa de Posgrado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme brindado la oportunidad de continuar con mi preparación académica y profesional.

A mi tutor el Dr. Eduardo Sandoval Romero por darme la oportunidad y la confianza de trabajar en su equipo, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo y por la motivación para continuar con mis estudios de posgrado.

A mis sinodales, el Dr. Juan Hernández Cordero, por los consejos y comentarios puntuales sobre esta tesis, además del apoyo otorgado para mejorar este trabajo experimental, al Dr. Daniel Ceballos por los comentarios y sugerencias para continuar con este trabajo y a la Dra. Celia Sánchez y el Dr. Naser Qureshi por los comentarios y por las aportaciones en clases previas que hicieron mejorar este proyecto.

A mi compañero el M. en I. Abraham Pérez Alonzo por la ayuda para familiarizarme con el laboratorio y así lograr terminar mi proyecto en tiempo y forma y a mi familia que siempre estuvo ahí para motivarme y apoyarme.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado para dedicarme de tiempo completo a mis estudios de maestría.

Resumen

Es este trabajo de tesis se realiza la instrumentación y caracterización de un sensor de desplazamiento bidireccional a base de rejillas Bragg en fibra óptica. Este tipo de sensores se utiliza para aplicaciones de monitoreo estructural, para la identificación de desplazamientos que puedan ser perjudiciales para grandes construcciones tales como puentes, túneles, presas, aeropuertos, etc.

Estos sensores convierten la información de un desplazamiento externo en un cambio en la longitud de onda de Bragg, que puede ser monitoreada mediante analizadores de espectros ópticos para identificar cambios de longitud de onda por factores externos como son curvaturas, inclinaciones, desplazamientos y cambios de temperatura.

El prototipo de sensor propuesto funciona mediante deformación por variación de curvatura es decir, que a desplazamientos externos estos cambian la curvatura de las rejillas Bragg induciendo deformaciones y provocando corrimientos en su longitud de onda reflejada. Este mecanismo de deformación por variación de curvatura permitirá analizar desplazamientos bidireccionales utilizando una sola rejilla de sensado, a diferencia de prototipos de sensor propuestos anteriormente y diferenciándose con sensores comerciales.

Para este sensor se hace un análisis de la sensibilidad a desplazamientos, así como la respuesta al sistema por cambios de temperatura, identificando las contribuciones de cada parámetro en la respuesta de sensor. Se fabricaron dos prototipos de sensor, para el último se consideró utilizar el método de compensación de temperatura para disminuir lo mas posible las contribuciones por cambios de temperatura en las señales de salida del sensor.

Este sensor permite medir desplazamientos bidireccionales utilizando una rejilla de sensado a diferencia de sensores comerciales en fibra óptica. Los resultados obtenidos muestran una sensibilidad de hasta 50 pm/mm en un rango de medición de $\pm$ 50 mm y 74pm/mm en un rango de medición de $\pm$30 mm, con un factor de correlación lineal de $R^2 = 0.999$ lo que permite medir desplazamientos de hasta 15μm utilizando un instrumento de medición con precisión de 1 pm, con el método de compensación de temperatura se reduce la contribución por cambios de temperatura de 15 pm/^oC a un valor de 1.6 pm/^oC.

Índice general

Índice de figuras

Índice de tablas

Introducción

El monitoreo estructural con aplicaciones en ingeniería civil e industrial es una área en reciente crecimiento gracias a las nuevas formas de sensado que se han desarrollado [1]. Este monitoreo en tiempo real es de vital importancia para evaluar las condiciones de grandes estructuras asegurando su integridad física. Los parámetros a evaluar dentro del monitoreo estructural son deformaciones, inclinaciones, curvaturas, fracturas, desplazamientos, temperatura, etc, los cuales pueden ser medidos con sensores de tipo piezoeléctrico, electroquímico, láser y sensores a base de fibra óptica [2]. Estos últimos han demostrado tener ventajas sobre otro tipo de sensores para monitoreo estructural por la versatilidad, sensibilidad, rápida respuesta y ser un método no invasivo para monitorear deformaciones [3]. Además, tienen la ventaja de no ser afectados por interferencias electromagnéticas y con la capacidad de realizar sensado remoto. La medición de desplazamientos es un objetivo importante para el monitoreo estructural. Estas mediciones deben de hacerse con buena precisión y con rápida respuesta para realizar mantenimientos predictivos asegurando la integridad de la estructura.

Los sensores a base de rejillas Bragg en fibra óptica (FBG por sus siglas en inglés de *Fiber Bragg Grating*) han demostrado recientemente ser una herramienta eficaz principalmente para el sensado de deformaciones y desplazamientos, gracias a su sensibilidad tanto a deformaciones mecánicas como a cambios de temperatura [4]. Debido a que estas rejillas en fibra óptica presentan micro modulaciones en el índice de refracción del núcleo de la fibra, reflejan una longitud de onda especifica llamada *longitud de onda de Bragg*. Esta longitud de onda sufrirá cambios debido a variaciones en el índice de refracción y el periodo de las micro modulaciones de la FBG, causadas ya sea por deformaciones o cambios de temperatura [5].

Para medir desplazamientos el mecanismo del sensor debe estar diseñado para convertir desplazamientos externos en deformaciones en la FBG. Varios de este tipos de sensores se han desarrollando aplicando distintos mecanismos de deformación que resultan en mayor sensibilidad ante desplazamientos externos, con las finalidad de sensar movimientos del orden de milímetros y micrómetros principalmente [6]. Es por esta razón que se propone un nuevo diseño de sensor de desplazamiento, con un mecanismo de deformación por variación de curvatura.

El trabajo de tesis se basa en el estudio y caracterización de un sensor de desplazamiento bidireccional a base de rejillas Bragg en un laboratorio para aplicaciones en monitoreo estructural. En el capitulo 1 se parte del marco teórico de las rejillas Bragg, su funcionamiento y distintas aplicaciones. En el capitulo 2 se muestra el diseño de dos prototipos experimentales realizados, así como los materiales y equipos utilizados para su caracterización. En el capitulo 3 se muestran los resultados obtenidos para ambos prototipos, haciendo un análisis de las contribuciones por desplazamientos, así como una compensación para reducir efectos por temperatura. Por ultimo se muestran las conclusiones del trabajo realizado.

Objetivos

El objetivo de este trabajo de investigación es la fabricación, estudio y caracterización del funcionamiento de un sensor de desplazamiento a base de rejillas de Bragg en fibra óptica para aplicaciones de monitoreo estructural.

Desarrollar la parte de sensado a partir de deformación por variación de curvatura, analizando las señales obtenidas aplicando desplazamientos milimétricos y micrométricos bidireccionales controlados.

Caracterizar las contribuciones por temperatura que presente el sensor con variaciones de temperatura controladas y utilizar el método de compensación por temperatura para reducir estas contribuciones.

Elaborar un prototipo final con protección metálica con la finalidad de desarrollar un sensor capaz de medir desplazamientos por deformaciones estructurales en condiciones ambientales.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Teoría de las fibras ópticas

El uso de fibra óptica para aplicaciones de sensado ha derivado por décadas en investigación y desarrollo de nuevos tipos de fibras. Las fibras ópticas basadas en sílice son el medio de transmisión más utilizado para aplicaciones de telecomunicaciones, transmisión de datos, sensado de magnitudes físicas, etc [7]. Esto debido a su bajo costo y capacidad de transmisión de información

Una fibra óptica es una guía de onda cilíndrica compuesta por dos materiales dieléctricos con distinto índice de refracción. En la parte central donde la luz es guiada se encuentra el **núcleo** (**core**) con un índice de refracción n_1, cubierto por un **recubrimiento** (**cladding**) con índice de refracción n_2.

La luz dentro de la fibra óptica es guiada debido al fenómeno de reflexión total interna, como una consecuencia de la ley de refracción de Snell. Para que se dé esta reflexión total interna el índice de refracción del recubrimiento de la fibra debe ser menor al del núcleo ($n_2 < n_1$), por lo tanto el ángulo crítico (θ_c) en el cual la luz es reflejada nuevamente al interior de la fibra está dado por:

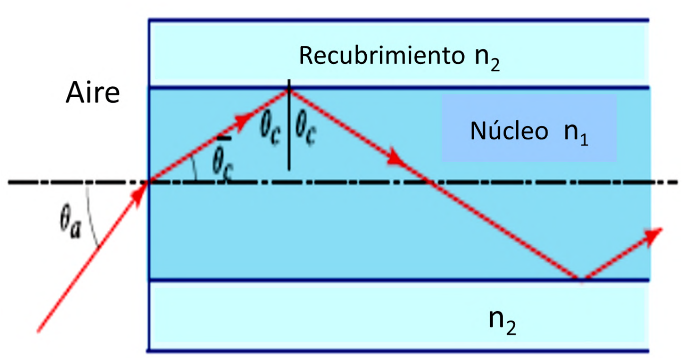


Fig. 1.1. Esquema de reflexión total interna en una fibra óptica [8].

$$\theta_c = sen^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \tag{1.1}$$

Así, a cualquier haz de luz con un ángulo de incidencia $\theta > \theta_c$ no le ocurrirá el fenómeno de reflexión total interna y no se transmitirá dentro de la fibra óptica.

Cuando una fibra óptica es iluminada con una fuente luminosa que puede ser una fuente láser o un diodo, para que la luz se acople a la fibra óptica, es decir que los rayos luminosos de esas fuentes se transmitan a lo largo de la fibra deben cumplir con el ángulo de aceptancia. El ángulo de aceptancia (θ_a) esta definido como el ángulo máximo con respecto al eje de la fibra óptica en el cual un haz luminoso que incide en un extremo de la fibra óptica se propagará dentro de ella . La apertura numérica (NA) de una fibra óptica esta dado por:

$$NA = sen(\theta_a) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \tag{1.2}$$

donde la apertura numérica (NA) se representa por el seno del ángulo de aceptancia (θ_a), que es la capacidad de colección de luz por la guía de onda, en este caso por la fibra óptica.

1.1.1. Clasificación de las fibras ópticas

La luz dentro de una fibra óptica se propaga a través de *modos de propagación*, que pueden entenderse como la configuración que adopten las ondas electromagnéticas que viajan de una guía de onda, en este caso en una fibra óptica. Dependiendo del tipo de fibra óptica, esta permitirá la propagación de uno o más *modos de propagación*. A partir de la característica de la propagación de modos y de la configuración de los índices de refracción así como el diámetro del núcleo de la fibra, Fig. 1.2, a estas se les dá diferentes clasificaciones:

Fibras ópticas multi-modo de índice escalonado

Las fibras ópticas multi-modo se presentan en diámetros de su núcleo que van de los 50 hasta los 100 μm, lo que permite una mayor cantidad de modos de propagación. Una de las desventajas de este tipo de fibra, es que al permitir la propagación de varios modos cada uno mantiene una velocidad de grupo, provocando una extensión de los tiempos de viaje de cada modo de manera que existe una *dispersión modal* dentro de la fibra. El índice de refracción escalonado en estas fibras se refiere a que mantienen un índice de refracción uniforme en el núcleo (n_1) y en el recubrimiento de la fibra (n_2), cumpliendo la condición $n_2 < n_1$.

Fibras ópticas mono-modo

Este tipo de fibras ópticas son fabricadas con diámetros en su núcleo típicos de entre 8 y 10μm que permiten solo un modo de propagación dentro de la fibra. Estas fibras mono-modo son las más comúnmente utilizadas en telecomunicaciones, ya que presentan atenuaciones de apenas $0.19 dB/km$ para fibra óptica mono-modo SMF-28, denominación utilizada por la empresa Corning principalmente [9].

Fibras ópticas multi-modo de índice gradual

Para minimizar la *dispersión modal* que se presenta en las fibras multi-modo de índice escalonado, se emplean las fibras ópticas con índice de refracción gradual, en el cual el índice de refracción aumenta gradualmente al acercarse al centro de la fibra óptica. Esto provoca que las velocidades de grupo sean mínimas en el centro de la fibra y aumenten conforme se alejen los *modos de propagación* del centro, esto compensa la *dispersión modal* evitando las diferencias en los trayectos de los pulsos luminosos, reduciendo las atenuaciones dentro de la fibra.

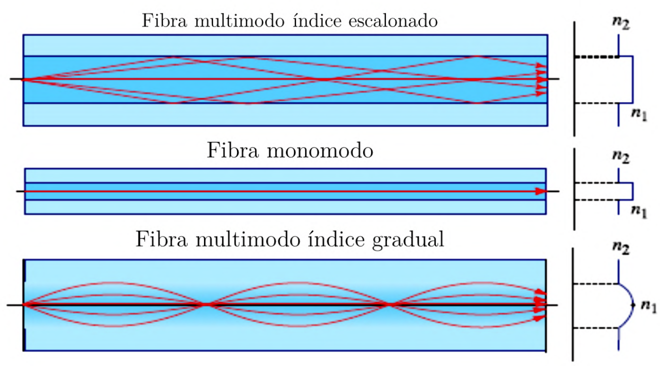


Fig. 1.2. Esquema de la clasificación de las fibras ópticas [8].

1.1.2. Teoría de modos acoplados para reflectores de Bragg

La teoría de modos acoplados es un método para analizar la propagación de modos en guías de ondas homogéneas o con perturbaciones [10]. En el caso de rejillas Bragg, estas presentan modulaciones en el índice de refracción del núcleo, lo cual provoca que se refleje una longitud de onda en particular. Esta propagación dentro de un reflector de Bragg se analiza con la teoría de modos acoplados en estructuras con perturbaciones, para analizar la relación entre la dependencia espectral del reflector y su correspondiente estructura.

La teoría de modos acoplados asume que el campo eléctrico transversal que se propaga por una guía de onda con dirección de propagación en el eje z sin perturbaciones se puede expresar como una superposición de modos guiados en coordenadas cilíndricas (r, θ, z) de la forma [11]:

$$\vec{E_T}(r,\theta,z,t) = \sum_m \left(A_m(z)e^{j\beta_m z} + B_m(z)e^{-j\beta_m z} \right) \vec{T}_m(r,\theta)e^{-j\omega t}, \tag{1.3}$$

donde:

$A_m(z)$ y $B_m(z)$ son las amplitudes de los m-ésimos modos.

ω es la frecuencia angular de los modos

β es la constante de propagación, definida como $2\pi n_{eff}/\lambda$.

n_{eff} es el índice de refracción efectivo del medio de propagación.

$\vec{T}_m(r,\theta)$ describe los modos transversales del campo eléctrico .

Debido a la propagación, habrá un acoplamiento entre el $q-ésimo$ y el $m-ésimo$ modo, por lo tanto las amplitudes $A_m(z)$ y $B_m(z)$ variarán con respecto al eje de propagación z de la forma [11]:

$$\frac{dA_m}{dz} = j\sum_q A_q K_{qm}^T e^{j(\beta_q-\beta_m)z} + j\sum_q B_q K_{qm}^T e^{-j(\beta_q+\beta_m)z}$$

y

$$\frac{dB_m}{dz} = -j\sum_q A_q K_{qm}^T e^{j(\beta_q+\beta_m)z} - j\sum_q B_q K_{qm}^T e^{-j(\beta_q-\beta_m)z}, \tag{1.4}$$

donde K_{qm}^T es el coeficiente de acoplamiento transversal entre los modos q y m, que esta definido como [6]:

$$K_{qm}^T(z) = \frac{\omega}{4}\iint_{2\pi,\infty} \Delta\varepsilon(r,\theta,z)\vec{T}_m(r,\theta)\vec{T}_m^*(r,\theta)drd\theta, \tag{1.5}$$

donde $\varepsilon(r,\theta,z)$ representa la perturbación de la estructura de la guía de onda.

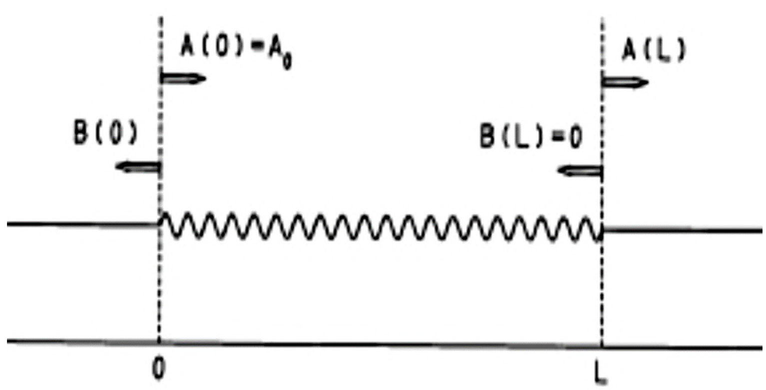


Fig. 1.3. Modulaciones periódicas en un reflector de Bragg .

Para un reflector de Bragg se puede asumir que la perturbación en el índice de refracción efectivo está dado por [11]:

$$\delta n_{eff} = \delta n_o + \delta n_1 cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \varphi(z)\right], \tag{1.6}$$

donde δn_o es la variación promedio del índice de refracción, δn_1 puede verse como una profundidad en las perturbaciones del índice de refracción, Λ es el periodo de las modulaciones en la guía de onda y $\varphi(z)$ es la fase descrita por las modulaciones.

En las rejillas Bragg δn_{eff} se considera uniforme en todo el núcleo de la fibra y no hay modulaciones en el recubrimiento y aproximando la perturbación $\Delta\varepsilon \simeq 2n\delta n$. De esta manera se pueden definir dos nuevos coeficientes [12] de la forma:

$$\sigma_{qm}(z) = \frac{\omega n_{eff}}{2}\delta n_0 \iint\limits_{2\pi,R} \vec{T}_m(r,\theta)\vec{T}_m^*(r,\theta)drd\theta, \tag{1.7}$$

y

$$\kappa_{qm}(z) = \frac{\omega n_{eff}}{4}\delta n_1 \iint\limits_{2\pi,R} \vec{T}_m(r,\theta)\vec{T}_m^*(r,\theta)drd\theta. \tag{1.8}$$

Por lo tanto la ecuación 1.5 para el coeficiente de acoplamiento transversal $K_{qm}^T(z)$, para una guía de onda con modulaciones en su índice de refracción periódicas esta dada como [12]:

$$K_{qm}^T(z) = \sigma_{qm}(z) + 2\kappa_{qm}(z)cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \varphi(z)\right], \tag{1.9}$$

donde $\sigma_{qm}(z)$ y $\kappa_{qm}(z)$ son los coeficientes de acoplamiento, Λ es el periodo de las modulaciones en la guía de onda y $\varphi(z)$ es la fase descrita por las modulaciones.

En el caso de un reflector de Bragg en una fibra óptica, que es más conocido como *rejilla de Bragg en fibra óptica* el acoplamiento ocurre entre dos modos idénticos que se propagan en direcciones opuestas (β_1 y β_2) en el eje de propagación z. De esta manera para un modo con amplitud $A(z)$ habrá un modo idéntico propagándose en dirección contraria $B(z)$, es decir son modos de propagación contra-direccionales, Fig 1.3.

El coeficiente de acoplamiento en este caso que las perturbaciones en el índice de refracción son periódicas, se puede expandir en términos de series de Fourier [13], por lo que la ecuación 1.9 queda de la forma:

$$K_{12}^T(z) = \kappa_G e^{-j(2\pi/\Lambda)z}, \tag{1.10}$$

donde κ_G es la constante de acoplamiento para el reflector de Bragg dada por la relación de reciprocidad:

$$K_{21} = -K_{12}^* = -\kappa_G e^{j(2\pi/\Lambda)z}. \tag{1.11}$$

Las ecuaciones que describen esta propagación están dadas como [14]:

$$\frac{dA}{dz} = -j\kappa_G B e^{\left[j\left(\beta_1 - \beta_2 \frac{2\pi}{\lambda}\right)z\right]}$$

y

$$\frac{dB}{dz} = j\kappa_G B e^{\left[-j\left(\beta_1 - \beta_2 \frac{2\pi}{\lambda}\right)z\right]}, \tag{1.12}$$

para modos propagándose en forma contra-direccional por conservación de energía se debe cumplir:

$$\frac{d}{dz}(|A^2| - |B^2|) = 0 \tag{1.13}$$

usando un parámetro de coincidencia de fase como:

$$\phi = \frac{(\beta_1 - \beta_2 - 2\pi/\Lambda)}{2} \tag{1.14}$$

En una guía de onda de Bragg las constantes de propagación son de la misma magnitud, pero en sentido contrario, es decir:

$$\beta_1 = -\beta_2 = kn_{eff} \tag{1.15}$$

por lo tanto, el parámetro de coincidencia de fase ϕ se puede expresar como:

$$\phi = kn_{eff} - \frac{\pi}{\Lambda} \tag{1.16}$$

donde k es el número de onda $k = 2\pi/\lambda$.

Tomando como condiciones de frontera:

La perturbación periódica en el índice de refracción se encuentra en la región $z = 0$ y $z = L$.

Las amplitudes están dadas de la forma $A(0) = A_0$ y $B(L) = 0$

Se tiene como solución del sistema de ecuaciones 1.12 el siguiente par de soluciones para $A(z)$ y $B(z)$:

$$A(z) = A_0 \frac{\alpha cosh[\alpha(z-L)] - j\phi senh[\alpha(z-L)]}{\alpha cosh(\alpha L) + j\phi senh(\alpha L)} e^{(j\phi z)}$$

y

$$B(z) = A_0 \frac{j\kappa_G senh[\alpha(z-L)]}{\alpha cosh(\alpha L) + j\phi senh(\alpha L)} e^{(-j\phi z)}. \tag{1.17}$$

$$donde : \alpha = \sqrt{\kappa_G^2 - \phi^2}$$

donde la potencia óptica normalizada transmitida P_T y reflejada P_R esta dada como:

$$P_T(z) = \frac{|A(z)|^2}{|A_0|^2} = \frac{\alpha^2 + \kappa_G^2 senh^2[\alpha(z-L)]}{\alpha^2 + \kappa_G^2 senh^2(\alpha L)}$$

y

$$P_R(z) = \frac{|B(z)|^2}{|A_0|^2} = \frac{\kappa_G^2 senh^2[\alpha(z-L)]}{\alpha^2 + \kappa_G^2 senh^2(\alpha L)}. \tag{1.18}$$

Si el parámetro $\phi = 0$ de la ecuación 1.13, implica que $kn_{eff} = \frac{\pi}{\Lambda}$. La longitud de onda que cumple esta condición es:

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} = \frac{\pi}{\Lambda}$$

por lo tanto:

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \tag{1.19}$$

Una guía de onda con modulaciones periódicas en su índice de refracción funcionará como un filtro de eliminación de bandas, reflejando una longitud de onda especifica denominada *longitud de onda de Bragg* y transmitiéndose las demás a lo largo de la guía de onda.

La reflectancia (R) y transmitancia (T) de una guía de onda con reflector de Bragg esta dada como [15]:

$$R = \frac{|B(0)|^2}{|A_0|^2}$$

y

$$T = \frac{|A(L)|^2}{|A_0|^2} = 1 - R. \tag{1.20}$$

Tomando las ecuaciones 1.17 tenemos:

$$R = \frac{\kappa_G^2 senh^2(\alpha L)}{\alpha^2 cosh^2(\alpha L) + \phi^2 senh^2(\alpha L)}. \tag{1.21}$$

La máxima reflectividad se alcanza cuando $\phi = 0$ por lo tanto:

$$R = tanh^2(\kappa_G L). \tag{1.22}$$

1.2. Rejillas Bragg en fibra óptica

Las rejillas Bragg en fibra óptica (FBG, por sus siglas en inglés de *Fiber Bragg Grating*) son micromodulaciones inscritas mediante técnicas con irradiación láser en el núcleo fotosensible de la fibra, que funcionan como un espejo dicroico reflejando una longitud de onda especifica, llamada *longitud de onda de Bragg* dada por la expresión:

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda, \tag{1.23}$$

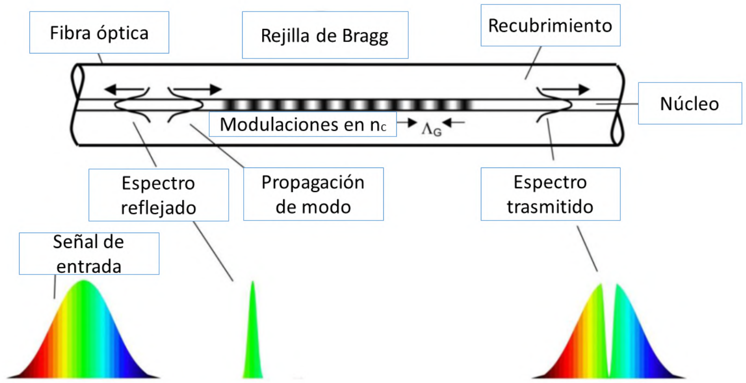


Fig. 1.4. Diagrama de funcionamiento de una rejilla Bragg en fibra óptica [16].

donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo de las modulaciones y Λ es el periodo de las modulaciones en el núcleo de la fibra óptica.

Estas modulaciones en el núcleo de la fibra óptica sirven como un filtro que reflejará una longitud de onda especifica de un espectro luminoso que se hace incidir en la entrada de la fibra. De esta manera tendremos un espectro reflejado λ_b acorde a las características de la rejilla en la fibra y un espectro de transmisión con un corte que corresponde a la λ_b reflejada, Fig. 1.4.

Dependiendo de la estructura de la rejilla (FBG) en la fibra óptica estas pueden tener la siguiente clasificación [10], Fig. 1.5.

FBG uniforme

Estas rejillas son las mas comunes y presentan modulaciones periódicas uniformes en el índice de refracción del núcleo con longitudes de rejillas típicas de 5 y 10 mm.

FBG de periodo largo

Las rejillas de Bragg de período largo (LPFG) tiene un período típicamente en el rango de 100 µm a 1 mm. Las LPFG promueven el acoplamiento entre el modo de propagación en el núcleo de la fibra y los modos de propagación del revestimiento en conjunto. La alta atenuación de los modos en el revestimiento da como resultado que el espectro de transmisión de la fibra contenga una serie de bandas de atenuación centradas en longitudes de onda discretas, cada banda de atenuación corresponde al acoplamiento a un diferente modo del revestimiento.

FBG no periódicas (chirped)

Estas rejillas presentan modulaciones que cambian linealmente con la posición, provocando un espectro de reflexión mas amplio. Utilizadas para obtener bandas de reflexión personalizadas, de gran utilidad en aplicaciones de sensado.

FBG inclinadas (tilted)

Este tipo de rejillas presentan una inclinación de las modulaciones con respecto al eje óptico de propagación. Esto produce un acoplamiento tanto del modo principal que viaja dentro del núcleo de la fibra óptica así como de modos que viajen por el recubrimiento de la fibra que son reflejados por la inclinación de las microestructuras. Obteniendo espectros tanto del modo principal reflejado así como de los modos que viajen por el recubrimiento de la fibra.

FBG de cambio de fase

Estas rejillas presentan una cavidad entre dos secciones con modulaciones de Bragg, esto da como resultado la presencia de un espaciamiento entre el picos λ_b de cada sección de la rejilla de Bragg. Las cuales son utilizadas para sensado de magnitudes como deformaciones o temperatura a bajas escalas.

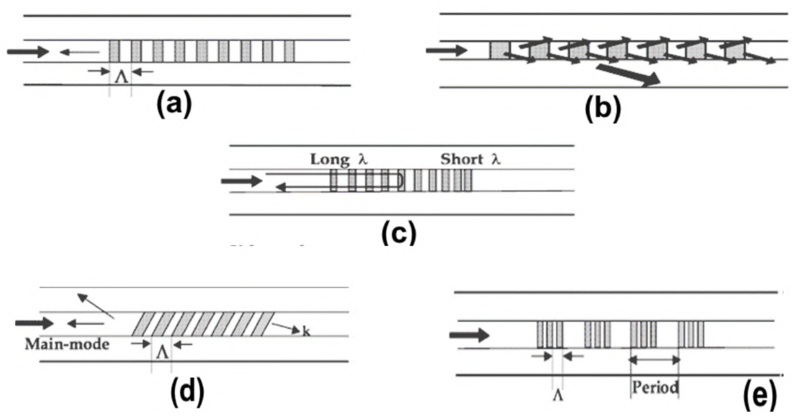


Fig. 1.5. Principales tipos de rejillas Bragg en fibra óptica: a)FBG uniforme, b)FBG de periodo largo, c)FBG no periódica (chirped), d)FBG inclinadas(tilted), e)FBG de cambio de fase [17].

1.2.1. Fabricación de las rejillas Bragg en fibra óptica

La fabricación de las rejillas Bragg consiste en realizar micromodulaciones en el índice de refracción del núcleo de la rejilla que es fotosensible al ser irradiado con láser UV. El núcleo de la fibra óptica es dopado con Germanio, el cual incrementa el índice de refracción del sílice con el que esta hecho la fibra óptica, y sí este es irradiado con láser UV, el índice de refracción aumenta.

Los procesos de fabricación más utilizados son con ayuda de una mascara de fase irradiada con láser UV y con la inscripción láser de pulsos de femtosegundos con laseres infrarrojos IR.

Técnica con mascarilla de fase

Uno de los método mas comunes para inscribir rejillas de Bragg en fibra óptica es con la técnica de mascarilla de fase. En esta técnica se usa un laser UV como fuente luminosa que se hace incidir sobre una mascarilla formando patrones de difracción, Fig. 1.6a. Estos haces difractados generan un patrón de interferencia sobre la fibra óptica, ya que el núcleo de la fibra es fotosensible al estar dopado con Germanio se generan modulaciones en el índice de refracción debido a los patrones de interferencia de la fuente de láser UV. Para inducir cambios en el índice de refracción en el núcleo de la fibra se utiliza una fuente láser UV entre 228 y 253 nm [18].

Técnica con pulsos láser de femtosegundos

Este método de inscripción de modulaciones del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica se basa en irradiar con pulsos láser de femtosegundos. La fuente láser es precisamente enfocada en el núcleo de la fibra con ayuda de un objetivo de microscopio en puntos específicos determinados, Fig. 1.6b. Esta técnica no depende del material con el que se dopa el núcleo de la fibra óptica. Para crear las modulaciones con láser IR es necesaria una alta potencia enfocada sobre la fibra óptica, ya que a altas intensidades el material del que esta hecho el núcleo de la fibra óptica sufre una compactación por el cambio de su estructura molecular del sílice a causa de los pulsos de alta potencia del láser IR, provocando cambios permanentes en el índice de refracción, con características similares a los generados con la técnica de mascarilla de fase irradiada con láser UV.

Una de las diferencias mas significativas entre ambos métodos es que al ser irradiada el núcleo de la fibra con pulsos de femtosegundos, las modulaciones en el índice de refracción se forman mas rápidamente y no hay "daño"mas allá de donde se enfocan los pulsos, a diferencia de usar una mascarilla de fase con láser UV, donde la exposición tiene que ser mas prolongada lo que puede ocasionar daños mas allá de la zona irradiada, es por esta razón que las rejillas elaboradas con pulsos de femtosegundos presentan una mejor estructura en las modulaciones realizadas en el núcleo de la fibra, haciendo las rejillas mas eficientes [19].

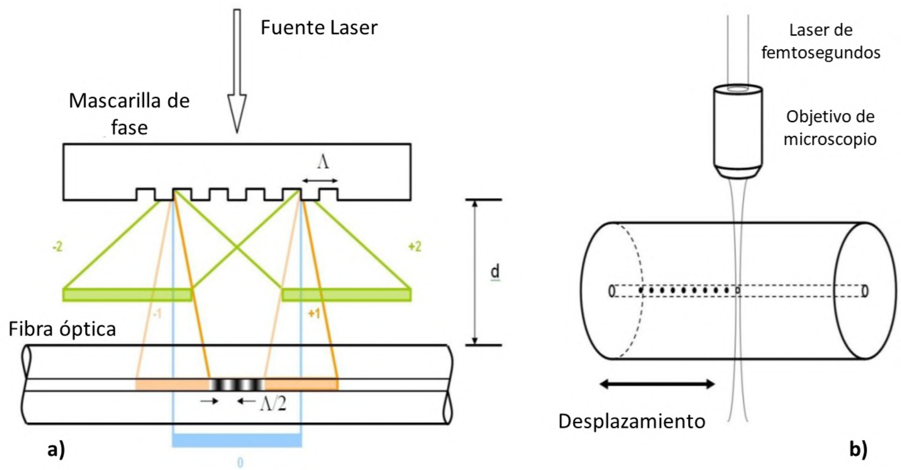


Fig. 1.6. Procesos principales para la fabricación de rejillas Bragg en fibra óptica [19].

1.3. Sensores a base de rejillas Bragg en fibra óptica

En la Sección 1.2 se mencionó que las rejillas Bragg en fibra óptica sirven como un filtro y reflejan una longitud de onda especifica dada por:

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda, \tag{1.24}$$

Esta longitud de onda λ_b puede sufrir variaciones al verse modificado el índice de refracción efectivo de la rejilla (n_{eff}) además, de la longitud del periodo (Λ) de la rejilla. Estos cambios pueden deberse tanto a variaciones en la temperatura (ΔT), así como por deformaciones en la longitud de la rejilla (ΔL), debido a esfuerzos mecánicos.

Analizando primero el cambio de la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_b$) por un cambio de temperatura (ΔT) tenemos la siguiente ecuación con derivadas parciales con respecto a la temperatura de la forma:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\Delta T} = 2n_{eff}\frac{\partial\Lambda}{\partial T} + 2\Lambda\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}, \tag{1.25}$$

sustituyendo la ecuación 1.24 en 1.25 tenemos:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\Delta T} = \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\lambda_b + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\lambda_b, \tag{1.26}$$

reacomodando términos:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\Delta T + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\Delta T, \tag{1.27}$$

donde se puede observar:

El primer término $\frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}$ es el coeficiente de expansión lineal (α) del sílice de la FBG.

El segundo término $\frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ es el coeficiente termo-óptico (η) que representa la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica con la temperatura.

Por lo que la ecuación 1.27 queda de la forma:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (\alpha + \eta)\Delta T. \tag{1.28}$$

Ahora, para obtener $\Delta\lambda_b$ por cambios de longitud de la FBG debido a deformaciones mecánicas debemos aplicar derivación parcial con respecto al desplazamiento L, de la forma:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\Delta L} = 2n_{eff}\frac{\partial\Lambda}{\partial L} + 2\Lambda\frac{\partial n_{eff}}{\partial L}, \tag{1.29}$$

sustituyendo la ecuación 1.24 en la ecuación 1.29 y reacomodando términos tenemos:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial L}\Delta L + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial L}\Delta L, \tag{1.30}$$

dividiendo ambos términos por el factor L_{FBG} que es la longitud de la rejilla :

$$\frac{\Delta\lambda_b}{L_{FBG}\lambda_b} = \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial L}\frac{\Delta L}{L_{FBG}} + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial L}\frac{\Delta L}{L_{FBG}} \tag{1.31}$$

donde $\Delta L/L_{FBG}$ es la deformación que sufre la rejilla, representada como ϵ_{FBG}. La ecuación 1.31 queda de la forma:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{L_{FBG}\lambda_b} = \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial L}\epsilon_{FBG} + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial L}\epsilon_{FBG}, \tag{1.32}$$

reacomodando términos tenemos:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \frac{(\partial/\Lambda)}{(\partial L/L_{FBG})}\epsilon_{FBG} + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{(\partial L/L_{FBG})}\epsilon_{FBG}, \tag{1.33}$$

donde se puede observar:

El primer termino $\frac{(\partial/\Lambda)}{(\partial L/L_{FBG})}$ es el coeficiente de la variación del periodo de la rejilla con la variación de la longitud de la rejilla, ya que el periodo Λ se encuentra dentro de L_{FBG} este cociente es igual a 1.

El segundo termino $\frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{(\partial L/L_{FBG})}$ es el coeficiente foto-elástico (p_e) de la fibra que indica la variación del índice de refracción por deformaciones mecánicas.

Cuando un medio transparente se expande, como una fibra óptica, el índice de refracción disminuye debido a la disminución de la densidad del material, haciendo p_e negativo, por lo que la ecuación 1.33 queda de la forma:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 - p_e)\epsilon_{FBG}, \tag{1.34}$$

así, combinando las ecuaciones 1.28 y 1.34 tenemos que $\Delta\lambda_b$ por cambios de temperatura y deformaciones mecánicas es de la forma:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 - p_e)\epsilon_{FBG} + (\alpha + \eta)\Delta T. \tag{1.35}$$

La ecuación 1.35 es la base de los sensores en rejillas Bragg en fibra óptica, ya que demuestra que se pueden medir magnitudes como temperatura y deformaciones mecánicas por medio del cambio de la longitud de onda de Bragg λ_b.

Para fibras ópticas dopadas con Germanio se tienen los siguientes valores: $p_e = 0.22$, $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}/^oC$ y $\eta = 8.6 \times 10^{-6}/^oC$, tomando estos valores tenemos las siguientes sensibilidades para una FBG en una longitud de onda de operación de 1550 nm [20]:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\Delta T} \approx 10pm/^oC,$$

y

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\Delta\epsilon} \approx 1.2pm/\mu\epsilon. \tag{1.36}$$

Los sensores a base de rejillas Bragg en fibra óptica FBG se han adoptado recientemente para aplicaciones de sensado principalmente de deformaciones y temperatura [21], además de otras aplicaciones para el sensado de presión, humedad, etc. Con las ventajas de inmunidad a interferencia electromagnética, alta sensibilidad, fácil integración y transmisión remota.

Para la medición de temperatura en zonas de difícil acceso como túneles, minas o pozos de petroleo es indispensable la medición de temperatura de manera precisa y con opción a ser remota [22]. Donde se han propouesto termómetros con rejillas Bragg con rangos de 0 a 800^oC.

Para medir presión de gas se utiliza la sensibilidad del sensor FBG ante deformaciones mecánicas, en este caso el gas a alta presión entra dentro del arreglo de fibras deformando las rejillas que hay en ellas en proporción a la presión de gas provocando corrimientos de longitud de onda $\Delta\lambda_b$, Fig. 1.7. Este tipo de sensores presenta sensibilidades de hasta 1.68nm/MPa [23].

Para la medición de humedad relativa, necesaria para monitorear procesos químicos, acondicionamiento de aire, conservación de alimentos etc, se puede desarrollar con sensores a base de rejillas Bragg. Para medir humedad relativa se utiliza la variación del índice de refracción del recubrimiento de la fibra con la FBG con configuración de modulaciones inclinadas (Tilted), provocando variaciones en la intensidad de los modos

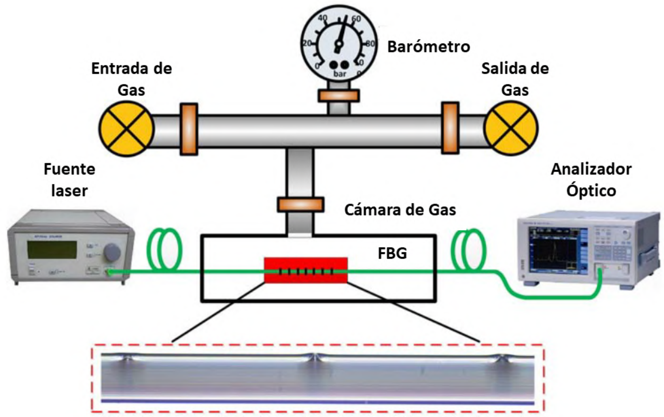


Fig. 1.7. Arreglo experimental para la medición de presión de gas con sensores FBG [23].

reflejados que viajen por el recubrimiento de la fibra, Fig. 1.8. Midiendo humedades relativas entre el 20 y 86 % [24].

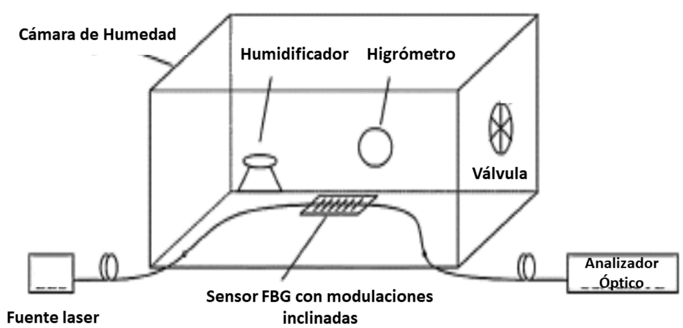


Fig. 1.8. Diagrama experimental para la medición de humedad relativa [24].

Una de las aplicaciones que más se usa en sensores FBG es para la medición de deformaciones para distintas aplicaciones: Para la fabricación de hidrófonos a base de FBG para la medición de ondas acústicas bajo el agua [25], aplicaciones de monitoreo de movimientos sísmicos [26] y para aplicaciones biomédicas, en el monitoreo tanto del pulso cardiaco como frecuencia respiratoria [27].

En la actualidad una de las aplicaciones con mayor desarrollo de los sensores de deformación a base de rejillas Bragg en fibra óptica es para el monitoreo estructural, el cual se basa en monitorear las condiciones estructurales en tiempo real de zona de interés, para realizar un mantenimiento preventivo, el cual se detalla en la siguiente sección.

1.4. Aplicaciones en monitoreo estructural

El monitoreo de salud estructural (SHM por sus siglas en inglés de *Structural Health Monitoring*) es la identificación de daño en la infraestructura tanto para ingeniería civil, industrial, aeroespacial y mecánica. Estos daños se definen como cambios tanto en la geometría de la estructura así como en el material debido a factores externos [28].

Este proceso envuelve la observación de la estructura para identificar el daño acumulado por factores ya sea por su funcionamiento o por procesos ambientales. La finalidad de este monitoreo es que se puedan identificar los parámetros que puedan afectar la estructura como son: curvaturas, fracturas, inclinaciones, cambios de temperatura, etc. Con la finalidad de realizar mantenimientos predictivos para asegurar la integridad física de la estructura de interés en tiempo real.

Los sensores para aplicaciones de monitoreo estructural se utilizan principalmente para grandes estructuras como túneles, puentes, presas, aeropuertos, etc. Clasificándose como: sensores piezoeléctricos, sensores electroquímicos sensores inalámbricos, sensores estructurados de autosensado, sensores en fibra óptica y rejilla de Bragg. Cada tipo de sensor cumple una función única en el proceso de monitoreo, Fig. 1.9.

Sensor piezoeléctrico

Un sensor piezoeléctrico puede medir variaciones en deformación, fuerza, presión y temperatura. Los materiales piezoeléctricos pueden transformar estos parámetros en un voltaje eléctrico capaz de medirse. Por esta razón los sensores piezoeléctricos se utilizan para medición de dislocaciones y aparición de fracturas para monitoreo estructural [29]. Algunas desventajas que presentan estos sensores es que además de presentar variaciones por cambios de temperatura es que algunos piezoeléctricos no son aptos para ambientes húmedos y pueden sufrir degradación de las propiedades electromecánicas del material.

Sensor electroquímico

Un sensor electroquímico responde acorde a la composición y/o cantidad de un elemento, así como a la presencia de alguna reacción química. Estos sensores se utilizan principalmente para detectar la aparición de corrosión en las estructuras a vigilar, midiendo el potencial electroquímico entre un electrodo de referencia y un electrodo de trabajo [30]. Como la calidad en la medición de estos sensores depende en gran medida de la calidad del electrodo de referencia, los sensores de gran calidad pueden ser de alto costo a comparación de otro tipo de sensores.

Sensor inalámbrico

Los sensores inalámbricos son principalmente sensores piezoeléctricos acoplados a unidades de transmisión inalámbricas (nodos) con aplicaciones de monitoreo estructural

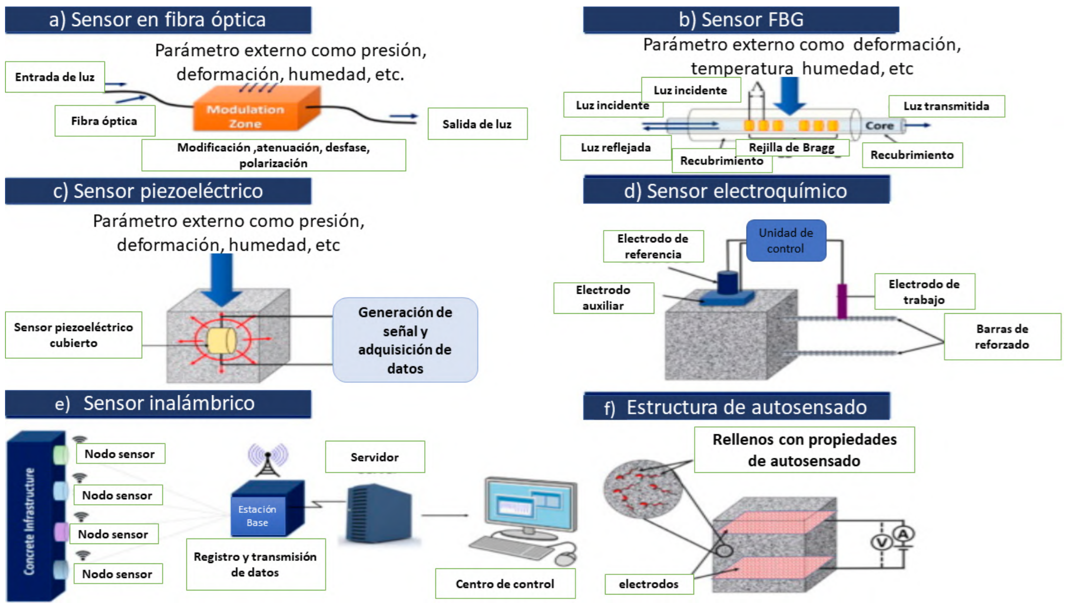


Fig. 1.9. Tipos de sensores utilizados para monitoreo estructural (SHM) [31].

remoto [32] . Estos sensores pueden ser de alto costo debido al consumo eléctrico de las unidades inalámbricas así como ser afectados por interferencias electromagnéticas.

Sensores estructurados de autosensado

En este tipo de sensores se le añaden materiales al construir la estructura para actuar como sensor y transductor simultáneamente. Materiales basados en fibras y nanotubos de carbono que se mezclan con el material con el que se construye la estructura, principalmente concreto presentan propiedades piezoresistivas, midiendo la resistividad eléctrica del material cuando hay presencia de deformaciones y fracturas en el material [33]. Este tipo de sensores se encuentra en desarrollo, estudiando el comportamiento de este sistema de sensores en diversas condiciones ambientales con variaciones de temperatura y humedad relativa.

Sensores en fibra óptica y FBG.

Estos sensores son los que han tenido un incremento en su aplicación debido a la versatilidad para sensar múltiples variables. La respuesta de estos sensores ante alguna deformación que afecte a la estructura de interés se traduce en cambios de intensidad, polarización, frecuencia o corrimiento de la luz reflejada. Estos sensores tienen la ventaja de ser altamente sensibles, inmunes a interferencias electromagnéticas, de fácil colocación y con la capacidad de sensado remoto gracias a las bajas atenuaciones de hasta 0.19dB/km que presenta la fibra óptica de estos sensores.

Para el caso de sensores basados en rejillas Bragg para aplicaciones de monitoreo estructural, son los que más enfoque han presentado en la actualidad para el monitoreo, diagnostico y control en grandes estructuras, debido a su versatilidad y gran sensibilidad, combinando desarrollos en láseres, fibra óptica, optoelectrónica, etc [34].

La aplicación con mas auge de los sensores a base de rejillas Bragg es para el sensado de deformaciones de puentes, túneles, presas, etc. Dependiendo del mecanismo de acción de estos sensores se pueden sensar parámetros como inclinación [35], curvaturas [36] y desplazamientos [37], que va a ir relacionado con la deformación que sufran las FBG, asociadas a fuerzas externas que afecten las estructuras.

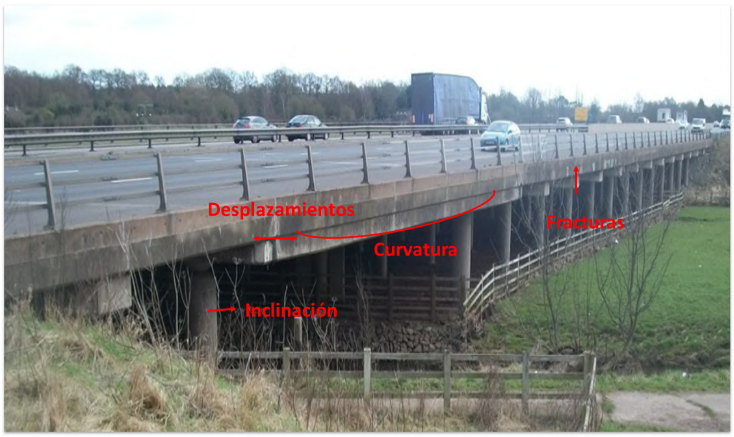


Fig. 1.10. Aplicaciones de medición en monitoreo estructural [37].

1.5. Sensores de desplazamiento

A raíz de que las construcciones en el área de la ingeniería civil e industrial y aeronáutica en años recientes son de mayor volumen y costo, estos requieren de sistemas que mantengan en vigilancia la integridad de su estructura, en este caso de monitorear desplazamientos estructurales que puedan ser perjudiciales para tales construcciones.

Para monitorear estos desplazamientos se han desarrollado varios tipos de monitoreo de desplazamientos para SHM, entre los mas utilizados se encuentran:

Sensor de desplazamiento láser

Los sensores de desplazamiento laser (LDS por sus siglas en inglés de *Laser Displacement Sensor*) miden desplazamientos a través de la diferencia de fase entre el haz emitido por el láser y el reflejado. Para este tipo de sensores se requiere tanto de la fuente láser así como de un modulo sensor que determinara el desplazamiento, Fig. 1.11. Estos módulos sensores son susceptibles a interferencias electromagnéticas y en conjunto requieren gran consumo de energía, lo que aumenta su costo, Estos sensores se utilizan para medir en rangos de desplazamiento de cientos de milímetros y presentan resoluciones típicas de 0.5 mm [38].

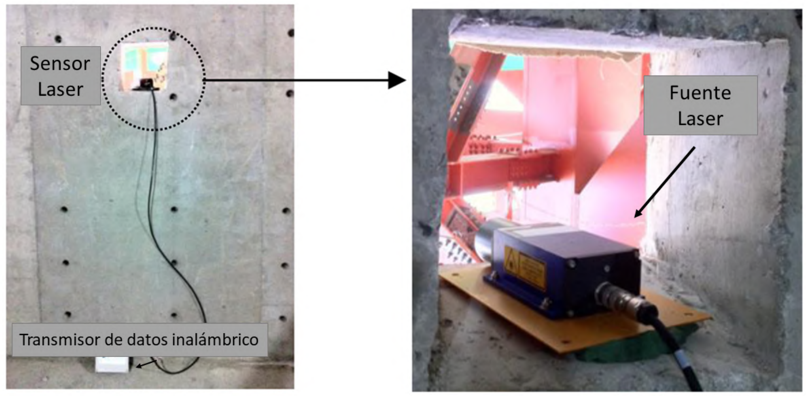


Fig. 1.11. Sensor de desplazamiento láser [38].

Sensor de desplazamiento por procesamiento de imágenes

El principio básico de este tipo de sensado es a base del procesamiento de imágenes por cuadro de una plantilla colocada en la estructura a analizar y por medio de una videocámara se monitoréa el desplazamiento cuadro por cuadro de la plantilla. El desplazamiento a medir estará dado en número de píxeles y este se convertirá a milímetros aplicando factores de escala, Fig. 1.12. La resolución de este método de sensado depende de la resolución de la videocámara con la que se tomen las imágenes. Es un método reciente de monitoreo de desplazamientos para SHM el cual sigue en desarrollo para estudiar su viabilidad [39].

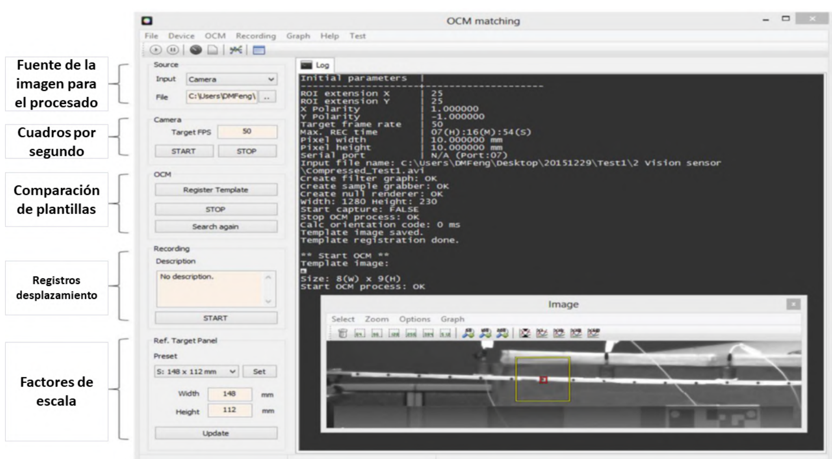


Fig. 1.12. Análisis de cuadros para monitoreo de desplazamiento por procesamiento de imágenes [39].

Sensor de desplazamiento por GPS

Este tipo de sensado de desplazamiento se basa en la estimación del posicionamiento de los receptores GPS por sus siglas en inglés de *Global Positioning System*. En los cuales se estima el desplazamiento relativo por la diferencia de tiempo de las señales entre el sistema receptor y emisor. Este método de sensado se aplica para grandes construcciones y presentan precisiones dependiendo del fabricante entre 3 y 10 mm de desplazamiento [40]. Teniendo como desventaja principal los altos costos del equipo utilizado.

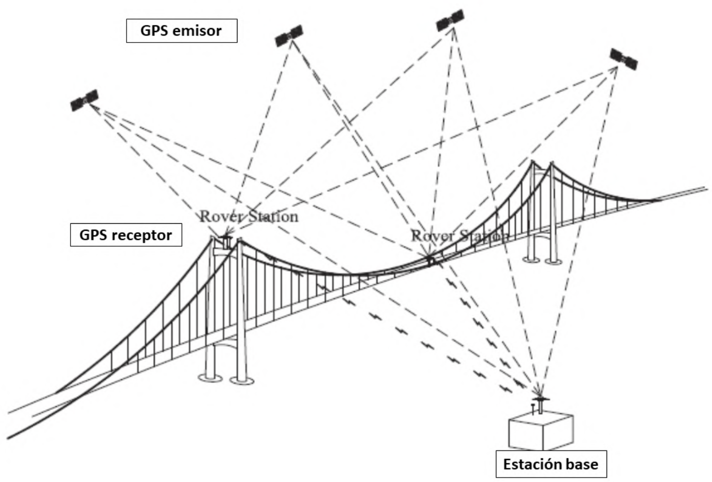


Fig. 1.13. Monitoreo de desplazamientos por GPS [40].

1.5.1. Sensores de desplazamiento a base de rejillas Bragg en fibra óptica.

Los sensores de desplazamiento a base de rejillas Bragg en fibra óptica, convierten la información de un desplazamiento externo en un cambio de longitud de onda $\Delta\lambda_b$ de la FBG. El mecanismo de acción se basa en que al haber algún desplazamiento este inducirá una deformación en la rejilla de sensado.

Esta tensión que se ejerce sobre la FBG, provocará cambios en la información sobre longitud de onda, ancho de banda, intensidad de la luz, etc. Después de realizar una calibración experimental, el desplazamiento externo podrá obtenerse mediante la detección de los cambios de tensión en la fibra óptica, Fig. 1.14.

Varios sensores de desplazamiento se han desarrollado, mejorando la sensibilidad al desplazamiento además de hacerlos insensibles a cambios de temperatura. Algunos ejemplos de sensores de desplazamiento desarrollados se muestran en la figura 1.15.

El mecanismo de acción que es el que deforma la FBG al aplicar un desplazamiento principalmente en un cantiliever o voladizo, Fig. 1.15b, el cual en combinación de un

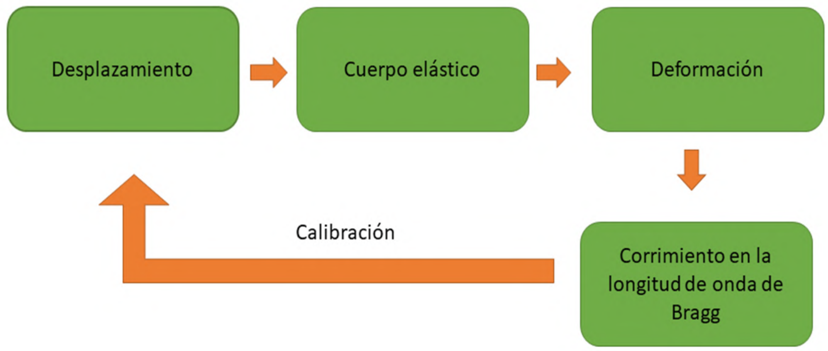


Fig. 1.14. Diagrama del funcionamiento de un sensor de desplazamiento FBG.

resorte puede medir rangos de desplazamiento en una dirección de 0 a 70 mm, con sensibilidad de hasta 29pm/mm.

Para tomar mediciones que no sean afectadas por temperatura se han desarrollado sensores que utilizan más de una FBG para compensar los cambios por temperatura que sufra la FBG de sensado, Fig 1.15a, Este tipo de sensor presentan sensibilidades de hasta 20.11 pm/mm, con un rango de medición de 0-100mm.

Un ejemplo de sensor para medir desplazamientos micrométricos se muestra en la Figura 1.15c, en el cual un cantiliever en forma de T deforma la FBG, teniendo una sensibilidad de 2086 pm/mm, pero acortando el rango de medición que es de 0-2 mm [41], esto se debe a que para obtener mayor sensibilidad en el sensor se requiere deformar en mayor magnitud a la rejilla, pero estas presentan cierta tolerancia a la deformación, típicamente de hasta 5000 $\mu\epsilon$,

Las aplicaciones para estos sensores son variadas:

Son utilizados para monitorear las condiciones en excavaciones midiendo pequeños desplazamientos del orden de decenas de micras [42]. Para medir desplazamientos verticales en puentes con resoluciones de 0.4 mm y porcentajes de error del 3.2 % [43].

Además, se utilizan para medir desplazamientos en vías de trenes de altas velocidades, para monitorear las condiciones de expansión o compresión que se presenten. Los sensores FBG que miden estos desplazamientos tienen una resolución de 0.1mm con un rango de medición de 0 a 50mm [44]. De igual forma se utilizan para monitorear desplazamientos que puedan sufrir las pistas de aterrizajes de grandes aeropuertos, como el aeropuerto Daxing en Beijin [45], donde utilizan sensores de desplazamiento bidireccional con sensibilidades de 11.92pm/mm, con un rango de medición de ± 50 mm y una linealidad de $R^2 = 0.999$.

Con arreglos de varios sensores de desplazamiento con rejillas Bragg se pueden monitorear estructuras como túneles [46], con el objetivo de identificar cambios en la

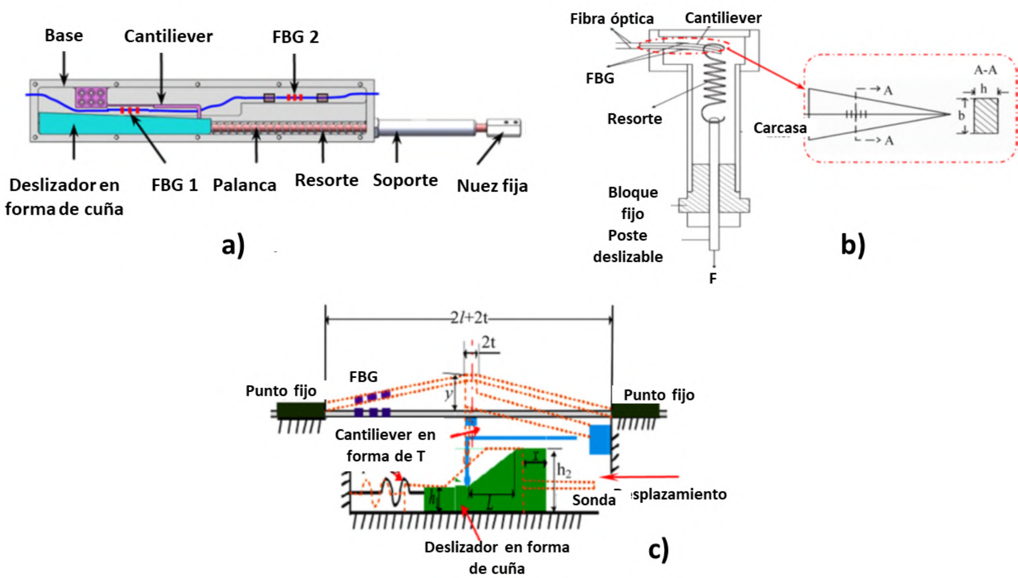


Fig. 1.15. Diagrama de sensores de desplazamiento a base de FBG [41].

curvatura de su estructura identificando desplazamientos milimétricos en sus uniones. Usando sensores con resoluciones de desplazamiento del orden de 10μm.

En este trabajo se propone la fabricación de un sensor de desplazamiento bidireccional con un mecanismo de acción de deformación por variación de curvatura, esperando una sensibilidad mayor y buena linealidad con un rango de medición bidireccional de hasta ±50 mm.

Capítulo 2

Dispositivo experimental

2.1. Deformación por variación de curvatura

El mecanismo de acción para medir desplazamientos lineales es mediante el análisis de deformación de la rejilla de Bragg, por variaciones en su radio de curvatura. Para inducir un cambio en la curvatura de la rejilla Bragg la fibra óptica debe estar sujeta a una lamina delgada metálica, la cual aumentará o disminuirá el radio de curvatura al aplicar un desplazamiento lineal [47] .

La lamina de acero inoxidable sobre la cual se fije las rejillas Bragg, también llamado *sensor de curvatura* aplicará una deformación a la fibra aumentando la longitud de la rejilla de L a $L + \Delta L$, ante variaciones en su radio de curvatura, como puede verse en la figura 2.1.

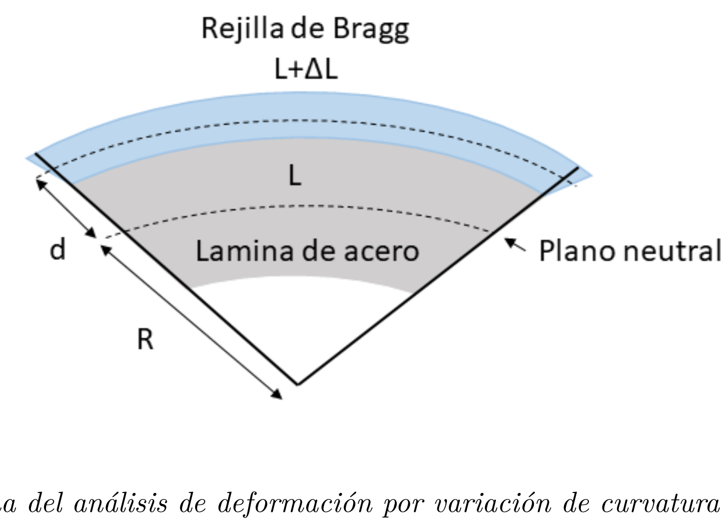


Fig. 2.1. Diagrama del análisis de deformación por variación de curvatura de una rejilla de Bragg en fibra óptica [48].

La relación entre la longitud $L+\Delta L$ y la longitud inicial L puede expresarse como:

$$\frac{L}{R} = \frac{L+\Delta L}{R+d}, \tag{2.1}$$

donde R es el radio de curvatura del plano neutral de la estructura metálica, es decir, el radio en el cual no hay deformación y d es la distancia del centro de la fibra óptica al plano neutral. Por lo tanto, la curvatura se puede expresar como:

$$C = \frac{1}{R} = \frac{\Delta L}{Ld} = \frac{\epsilon}{d}, \tag{2.2}$$

donde ϵ es la deformación de la rejilla Bragg y C es la curvatura del plano neutral de la estructura metálica.

Considerando solo cambios en la longitud de onda reflejada por efectos de deformación en la rejilla usando la ecuación 1.31 tenemos:

$$\epsilon = \frac{\Delta\lambda_b}{K_e\lambda_b}, \tag{2.3}$$

donde $K_e = (1-P_e)$, P_e es el coeficiente elástico óptico de la fibra, combinando la ecuación de curvatura 2.2 y la ecuación 2.3, tenemos que la sensibilidad de la rejilla por cambios en su curvatura es [48]:

$$S = \frac{\Delta\lambda_b}{C} = (1-P_e)\lambda_b.d \tag{2.4}$$

Para estimar la curvatura C de la sección de la lamina de acero que se esta deformando por algún desplazamiento se utiliza la siguiente relación geométrica:

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2h}{h^2+L^2}, \tag{2.5}$$

donde L es la mitad de la distancia entre dos puntos fijos de la circunferencia y h es el desplazamiento por doblamiento .

2.2. Primer prototipo de sensor de desplazamiento

La parte activa del sensor de desplazamiento se basa en la deformación de un arreglo de 4 rejillas Bragg en fibra óptica sobre una sección de aro metálico, Fig. 2.2. Este aro es de acero inoxidable, con un espesor de 0.4 mm y un ancho de 10 mm.

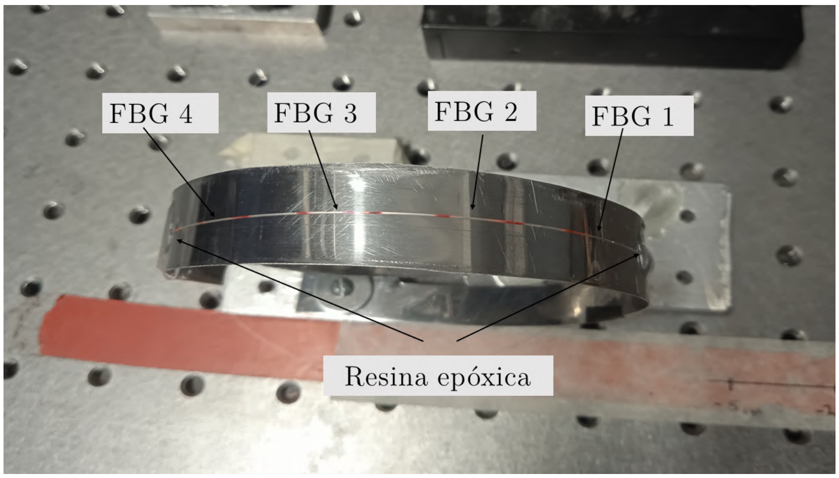


Fig. 2.2. Arreglo de 4 rejillas Bragg fijos en la parte superior del anillo metálico.

Sobre el aro metálico con un radio inicial (R_1) de 3.2 cm se fijó un primer arreglo de 4 rejillas Bragg definido como $A1$ del fabricante Alxenses con resina epóxica a base de bisfenol en los extremos del arreglo de las rejillas.

Las especificaciones del arreglo de rejillas Bragg, que será denominado como $A1$ utilizado para este primer prototipo se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros del fabricante del arreglo de 4 rejillas Bragg $A1$ para el primer prototipo.

Parámetro	FBG 1	FBG 2	FBG 3	FBG 4
λ_b	1519.819 nm	1530.121 nm	1540.09 nm	1549.967 nm
Ancho de banda a 3dB	0.328 nm	0.339 nm	0.329 nm	0.343 nm
Reflectividad	83.68 %	85.26 %	82.26 %	82.0 %
Longitud de la rejilla	5 mm	5 mm	5 mm	5mm

Para inducir la deformación en el aro, un extremo se fijó en un soporte plástico hecho a base de impresión 3D, el otro extremo del aro se fijará en un mecanismo a base de una varilla móvil y dos resortes que servirán para estabilizar el desplazamiento en ambas direcciones como se muestra en la figura 2.3.

Los desplazamientos milimétricos se realizaron con ayuda de una platina del fabricante Thorlabs para inducir desplazamientos bidireccionales, para cubrir un rango de -50 a 50 mm. Estos desplazamientos aumentan o disminuyen el radio de curvatura

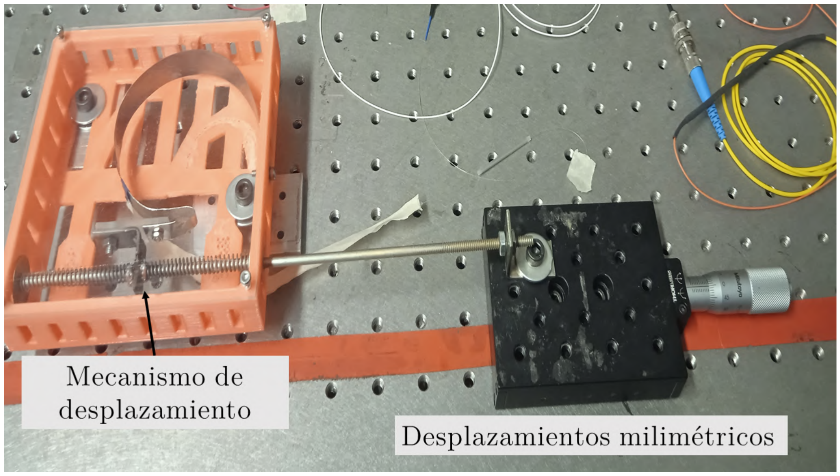


Fig. 2.3. Mecanismo de desplazamiento bidireccional.

del anillo metálico, lo cual induce cambios en la deformación en el arreglo de 4 rejillas Bragg, de acuerdo a la ecuación 2.2

El espectro de potencia reflejada de las rejillas se obtuvo con ayuda de un circulador óptico y una fuente de alimentación SLD (por sus siglas en inglés de *Super Luminescent Diode*) del fabricante Thorlabs, modelo S5FC1005S . Los picos de la longitud de onda reflejada de Bragg λ_b se obtuvieron con un analizador de espectros ópticos del fabricante Advantest, modelo Q8381A, con resolución de 90 pm, que se conectó mediante GPIB a una PC para adquirir y analizar los espectros obtenidos, como se muestra en la figura 2.4.

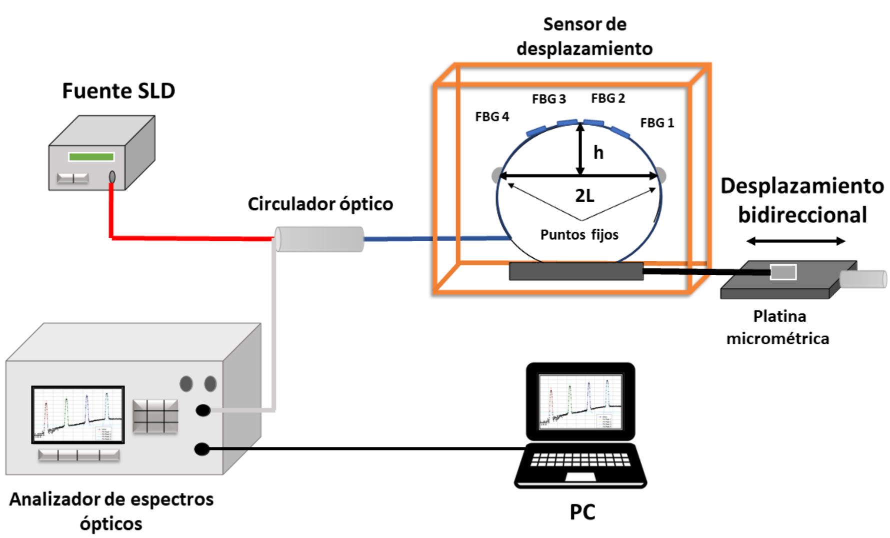


Fig. 2.4. Diagrama del primer prototipo de sensor de desplazamiento.

Para obtener la contribución por temperatura, es decir la respuesta de las FBG por cambios de temperatura, lo que se realizó fue construir una protección de poliestireno para cubrir el arreglo de rejillas fijas sobre el anillo. Se elevó la temperatura dentro de la protección para simular un medio ambiente con mayor temperatura hasta los $55^{O}C$, con ayuda de una celda Peltier conectada a una fuente de voltaje del fabricante Tenma, modelo 72-13610, Fig 2.5, obteniendo los espectros y midiendo el corrimiento de λ_b con respecto al aumento de temperatura.

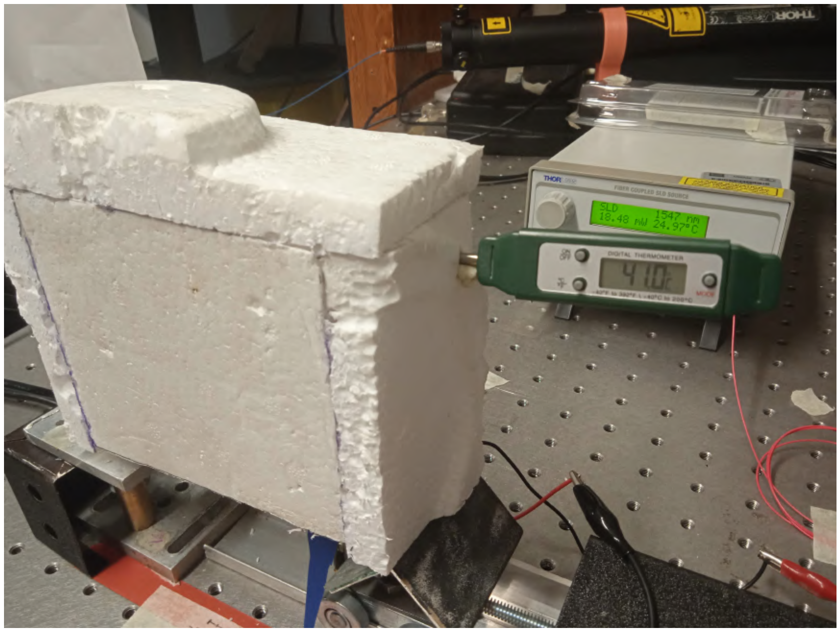


Fig. 2.5. Carcasa o protección de poliestireno colocada para aumentar la temperatura del arreglo de rejillas fijo en el anillo metálico.

Así, de esta manera se realizó una primera caracterización del sensor de desplazamiento, en un rango de ±50 mm y ±30 mm, reduciendo el radio inicial del aro metálico con las FBG.

Se obtuvieron los picos de la longitud de onda reflejada en intervalos de 10 mm cubriendo todo el rango de medición, para obtener la recta de sensibilidad al desplazamiento del sensor. Además de obtener la respuesta a la temperatura para caracterizar su respectiva contribución y así obtener una caracterización por desplazamientos y cambios de temperatura que afectan al sensor.

Para comparar las sensibilidades por deformaciones de las distintas FBG en el arreglo, se realizó una simulación de deformación de la geometría del anillo metálico, Fig 2.2, utilizando el método de elementos finitos, para identificar las zonas de mayor deformación en la estructura metálica con la aplicación de algún desplazamiento.

2.3. Simulación por el método de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés *Finite Element Method*) es un método numérico para la solución de problemas en ingeniería que son descritos por derivadas parciales, determinando funciones aproximadas en elementos finitos. Asi, un problema físico continuo es transformado en un problema de elementos finitos discretos con valores nodales desconocidos [49].

Para realizar un modelado en elementos finitos, lo primero es discretizar el objeto de interés en elementos bidimensionales (2D), comúnmente estos elementos son triángulos elementales de Turner. Este elemento cuenta con 3 nodos, cada uno con sus respectivas coordenadas en el plano (x, y).

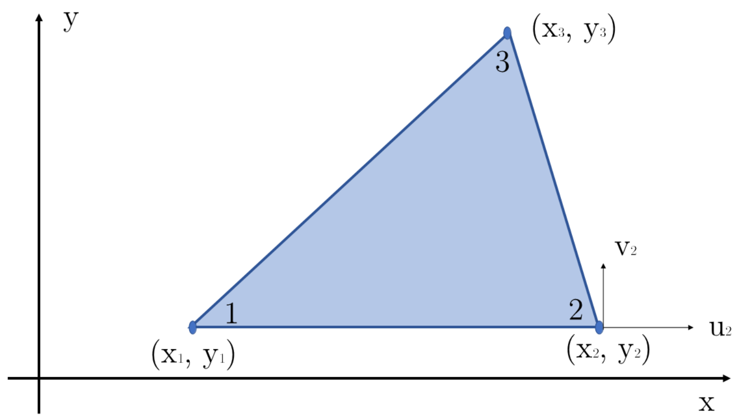


Fig. 2.6. Elemento finito triangular con 3 nodos

Una aproximación lineal del desplazamiento de los tres nodos se puede escribir de la forma:

$$\begin{aligned} u(x,y) &= N_1u_1 + N_2u_2 + N_3u_3, \\ v(x,y) &= N_1v_1 + N_2v_2 + N_3v_3, \\ \text{donde:} N_i &= \alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y. \end{aligned} \tag{2.6}$$

Representado en su forma matricial:

$$\begin{bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1(x,y) & 0 & N_2(x,y) & 0 & N_2(x,y) & 0 \\ 0 & N_1(x,y) & 0 & N_2(x,y) & 0 & N_2(x,y) \end{bmatrix} \vec{u} = N\vec{u}. \tag{2.7}$$

Donde las funciones $N_i(x, y)$ son llamadas funciones de forma , que son las funciones que interpolan la solución entre los valores discretos obtenidos en los nodos de los elementos finitos. Estas funciones de forma pueden ser representadas de la siguiente forma [50]:

$$N_i = \frac{1}{2\Delta}(a_i + b_i x + c_i y). \tag{2.8}$$

Donde los coeficientes a_i, b_i, c_i son:

$$a_i = x_{i+1}y_{i+2} - x_{i+2}y_{i+1},$$

$$b_i = y_{i+1} - y_{i+2},$$

$$c_i = x_{i+2} - x_{i+1},$$

$$\Delta = \frac{1}{2}(x_2y_3 + x_3y_1 + x_1y_2 - x_2y_1 - x_3y_2 - x_1y_3). \tag{2.9}$$

Siendo Δ el elemento de área. La matriz de diferenciación $[B]$ interpola los esfuerzos usando los desplazamientos nodales que se obtiene al diferenciar la matriz de funciones de forma $[N]$:

$$[B] = [D][N] = \frac{\partial}{\partial \mathbf{X}}[N] = \frac{1}{2\Delta}\begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{bmatrix}. \tag{2.10}$$

De esta manera se pueden resolver problemas tanto de deformación así como de transferencia de calor usando los desplazamientos nodales de los elementos finitos discretos.

Con ayuda del Software FreeCad se realizó la simulación tanto de los esfuerzos mecánicos así como del gradiente de temperatura del aro metálico. Para esto se simuló la geometría del aro metálico con las mismas dimensiones al utilizado en las pruebas experimentales y se determinó la malla con sus respectivos puntos nodales de la geometría, para poder aplicar el algoritmo de solución por elementos finitos, Fig 2.7.

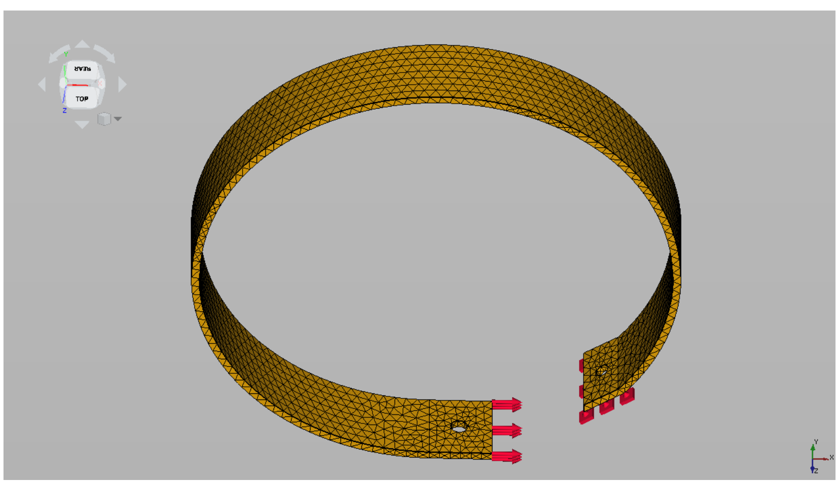


Fig. 2.7. Generación de malla con los elementos geométricos para la solución de esfuerzos mecánicos y gradiente de temperatura.

Así, ya con la geometría del aro metálico discretizada en elementos finitos con 4848 caras y 13772 nodos se puede programar las condiciones de deformación y gradiente de temperatura a simular.

2.3.1. Simulación de deformación por elementos finitos

Los esfuerzos en un material pueden ser determinados con el tensor de esfuerzos. El tensor relaciona el vector de tensión $\vec{T}$ a través de una superficie con el vector normal $\vec{n}$ de esa superficie por las siguientes ecuaciones [50]:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}. \tag{2.11}$$

Conocido como tensor de esfuerzos. A su vez el estado de deformación en un punto dentro de un material puede ser descrito con el tensor de deformación dado por:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}, \tag{2.12}$$

donde cada elemento de la matriz esta dado por:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial r_j} + \frac{\partial u_j}{\partial r_i}\right). \tag{2.13}$$

El vector $\vec{u}(\vec{r})$ representa el desplazamiento de un punto dado por el vector $\vec{r}(x, y, z)$ después de la deformación. Para un sistema en dos dimensiones, es decir donde no hay esfuerzos en el eje z, las deformaciones y esfuerzos pueden ser simplificados de la siguiente manera:

$$\vec{\epsilon}(x, y) = [\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, 2\epsilon_{xy}]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & o \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix}, \tag{2.14}$$

$$\vec{\sigma}(x, y) = [\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, 2\sigma_{xy}]^T, \tag{2.15}$$

Las deformaciones y esfuerzos están relacionadas de la siguiente manera:

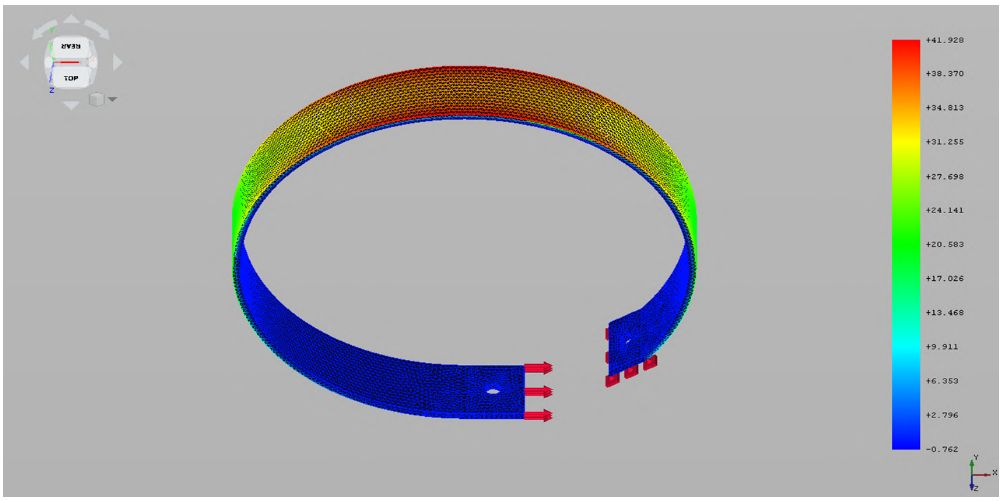
$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = E = \frac{1}{1-\upsilon^2} \begin{bmatrix} 1 & \upsilon & 0 \\ \upsilon & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\upsilon}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ 2\epsilon_{xy} \end{bmatrix}. \tag{2.16}$$

Los valores del modulo de Young E y el coeficiente de Poisson υ son parámetros del material a deformar. En este caso el Software utilizado para la simulación de tensión y deformación por elementos finitos FreeCad utiliza estos valores predeterminados por el material a simular, en este caso acero inoxidable, tabla. 2.2.

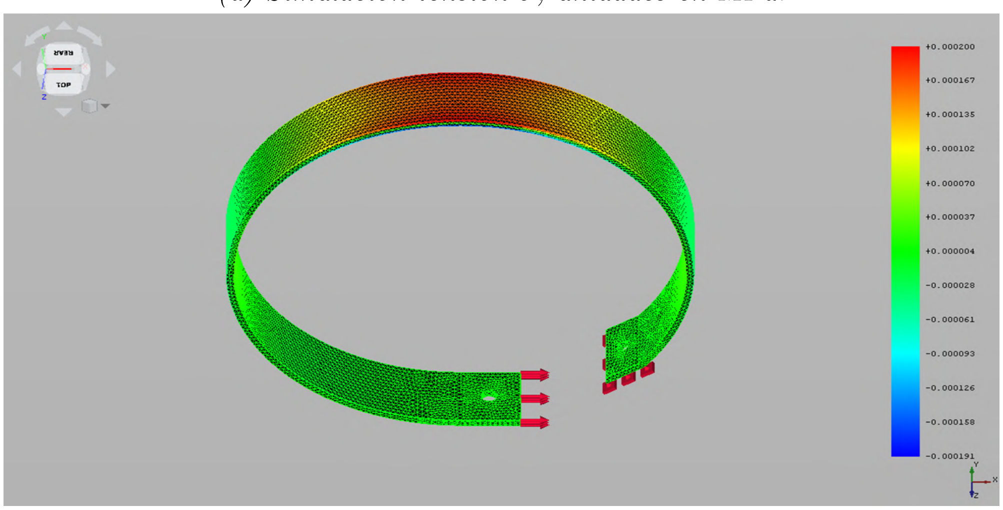
Para realizar la simulación de los esfuerzos que sufre el material al aplicar un desplazamiento, en el Software FreeCad se usó la geometría a la misma escala que en el

Tabla 2.2. Parámetros utilizados para la simulación de esfuerzos mecánicos en acero inoxidable.

Constante	Símbolo	Valor
Densidad	ρ	7980 Kg/m^3
Modulo de Young	E	210 GPa
Coeficiente de Poisson	υ	0.3



(a) Simulación tensión σ, unidades en MPa.



(b) Simulación deformación por esfuerzos mecánicos, unidades en ϵ.

Fig. 2.8. Simulación de deformación de anillo metálico por variación de curvatura.

sensor implementado, dando los parámetros del material utilizado, que se muestran en la tabla 2.2, así como las restricciones de movimiento y el desplazamiento en los extremos, el resultado de la simulación se muestra en la figura 2.8.

En esta simulación se observa que al aplicar un desplazamiento en un extremo del aro metálico, en la zona central superior externa es donde se concentra la mayor magnitud de esfuerzos de tensión ($\sim 43MPa$), Fig. 2.8a, y por consiguiente en esa misma zona hay mayor deformación del aro metálico, Fig. 2.8b.

Por lo tanto, se espera que si se coloca un arreglo de 4 rejillas Bragg en la parte superior del aro metálico, las rejillas que se encuentren mas cercanas al centro tendrán una mayor deformación que las que se encuentren en los extremos.

2.3.2. Simulación del gradiente de temperatura

Considerando un cuerpo isotrópico, la ecuación de transferencia de calor es una ecuación diferencial parcial que describe la distribución del campo de temperatura en un cuerpo dado a lo largo de un cierto tiempo. Este campo de temperatura es importante para un análisis de conducción térmica a través de los materiales.

El flujo de calor en cualquier punto de la superficie a estudiar puede calcularse a partir de la ecuación de transferencia de calor de Fourier, representada de la siguiente manera [51]:

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}+\frac{\partial q_z}{\partial z}\right)+Q=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}. \tag{2.17}$$

Donde:

q_x, q_y, q_z son las componentes de flujo de calor por unidad de área $[Wm^{-2}]$.

$Q = Q(x, y, z, t)$ es la función de energía calorífica por unidad de volumen $[Wm^{-3}]$.

ρ es la densidad del material $[Kg\ m^{-3}]$.

C_p es la capacidad calorífica $[J\ Kg^{-1}K^{-1}]$

T es la temperatura $[K]$

t el tiempo $[s]$

De acuerdo a la ley de Fourier que establece que la tasa de tiempo de transferencia de calor a través de un material es proporcional al gradiente negativo de la temperatura, tenemos que las componentes del flujo de calor se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} q_x &= -k\frac{\partial T}{\partial x}, \\ q_y &= -k\frac{\partial T}{\partial y}, \\ q_z &= -k\frac{\partial T}{\partial z}, \end{aligned} \tag{2.18}$$

donde $k[Wm^{-1}K^{-1}]$ es el coeficiente de conductividad térmica del medio. Sustituyendo las componentes de transferencia de calor anteriores en la ecuación de Fourier, Ec. 2.18, obtenemos la ecuación general de transferencia de calor:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}. \tag{2.19}$$

Las condiciones de frontera van a depender de la transferencia de calor a simular, estas se deben especificar para resolver analíticamente la ecuación así como para realizar en la simulación. Las condiciones de frontera para la transferencia de calor son las siguientes:

-Temperatura especifica :

$$T_w = T(x,y,z,t), \tag{2.20}$$

donde T_w es una función conocida.

-Flujo de calor:

$$q_x\vec{n_x}+q_y\vec{n_y}+q_z\vec{n_z}=q_s, \tag{2.21}$$

donde q_s es el flujo de calor por unidad de área.

-Condiciones de frontera por convección.

$$q_x\vec{n_x}+q_y\vec{n_y}+q_z\vec{n_z}=h(T_s-T_a), \tag{2.22}$$

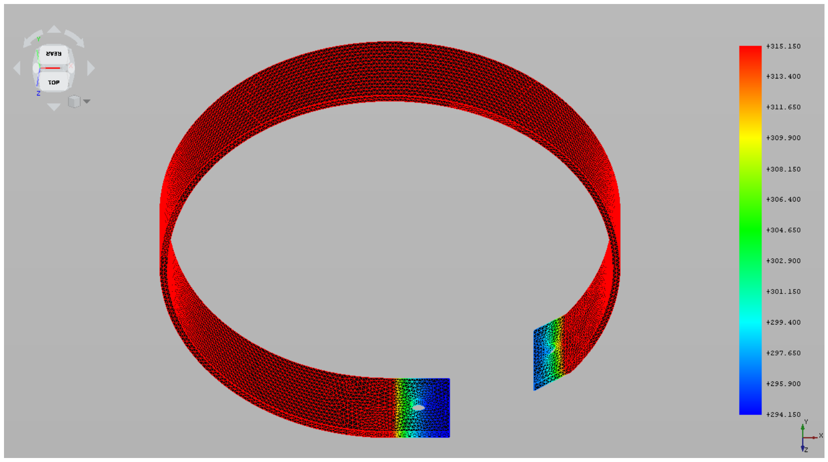
donde $(\vec{n_x},\vec{n_y},\vec{n_z})$ son las componentes del vector normal a la superficie del elemento, h es el coeficiente de convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_a es la temperatura ambiente conocida.

Tabla 2.3. Valores utilizados para la simulación de transferencia de temperatura.

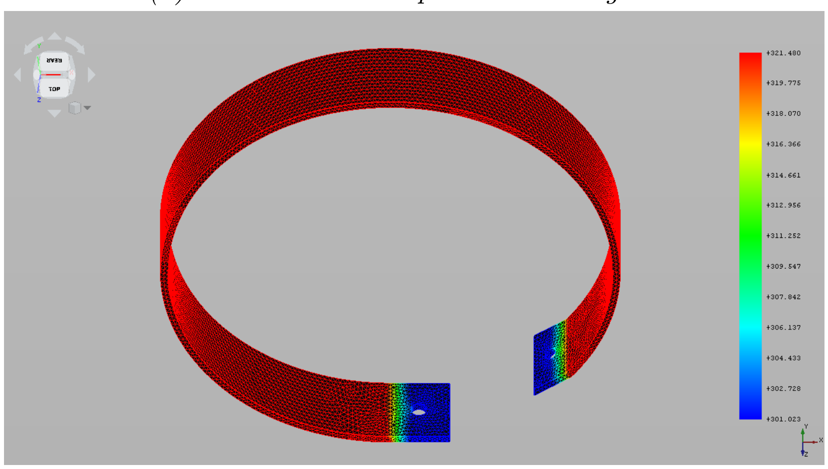
Constante	Símbolo	Valor
Densidad	ρ	7980 Kg/m^3
Capacidad calorífica	C_p	500 $J/Kg\ K$
Conductividad térmica	k	16 W/mK
Temperatura superficie	T_s	293.15 K
Temperatura ambiente	T_a	328.15 K
Coeficiente convección	h	500 W/m^2K

Los parámetros para simular la transferencia de calor usando el software FreeCad en el aro metálico se muestran en la tabla 2.3, en los cuales se consideran las propiedades térmicas del material así como las condiciones de temperatura inicial y final a simular. Tomando en cuenta una temperatura ambiente de 20 ^OC (293.15 K), y una temperatura final de 55 ^OC (328.15 K).

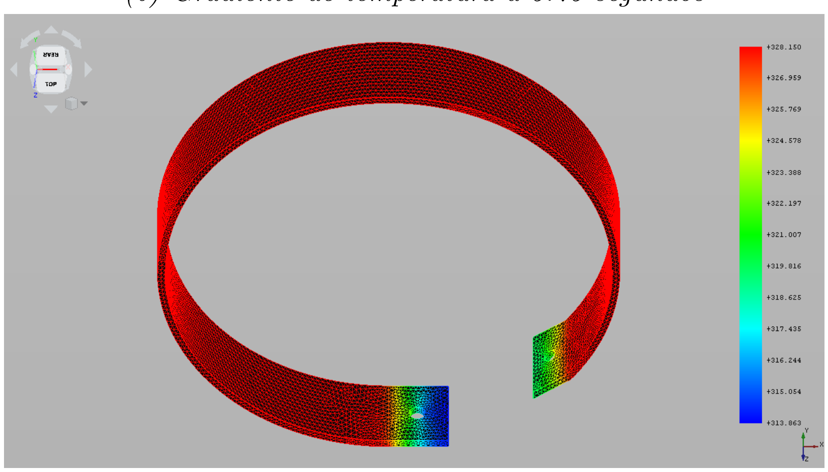
Lo que se aprecia en los resultados de la simulación de transferencia de calor del anillo metálico a diferentes tiempos, Fig. 2.9, es que hay una temperatura uniforme en la mayor parte del anillo metálico, solo se presentan disipación en los extremos, esto se debe a que se encuentran fijos dentro del sensor, por lo tanto se espera que el arreglo de 4 rejillas tengan la misma temperatura independientemente de su posición en el anillo metálico.



(a) Gradiente de temperatura a 1 segundo



(b) Gradiente de temperatura a 5.75 segundos



(c) Gradiente de temperatura a 10 segundos

Fig. 2.9. Simulación de la transferencia de calor a distintos intervalos de tiempo, unidades en K.

2.4. Construcción del prototipo final

Para la elaboración del prototipo final se realizaron ajustes en la estructura de plástico de ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés de *PolyLactic Acid*), hecha en una impresora 3D para lograr que fuera mas compacto el sensor y que al fijar el aro metálico la deformación del aro por desplazamientos lineales sea lo mas estable posible, es decir, tenga mayor linealidad la relación curvatura vs desplazamiento.

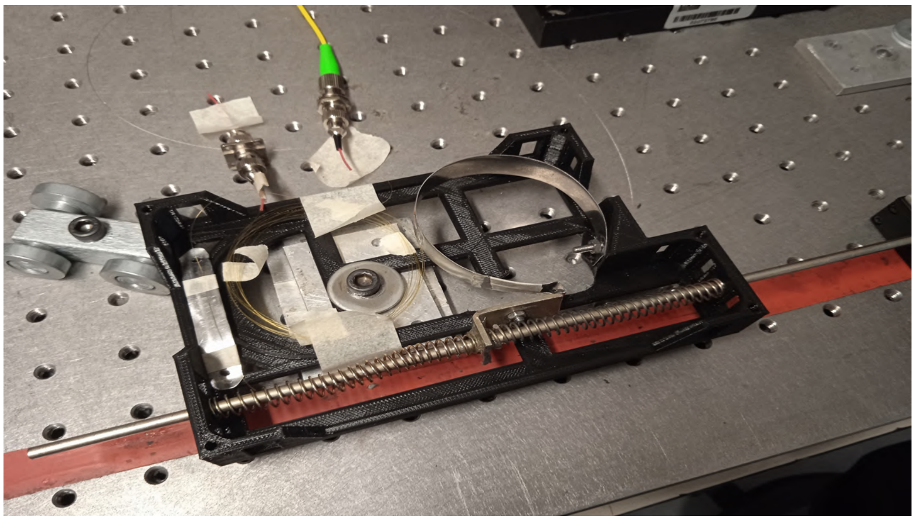


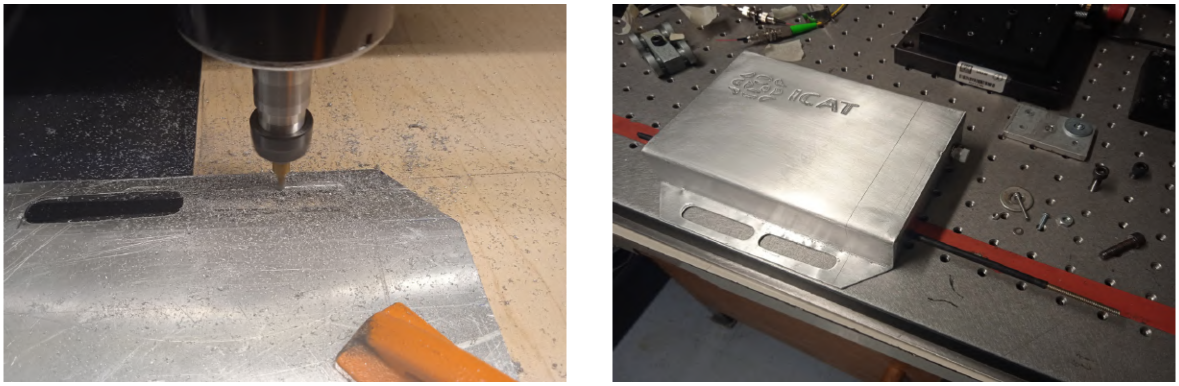
Fig. 2.10. Marco de plástico PLA para el prototipo final con ajustes en dimensiones y el mecanismo de desplazamiento.

Para esto se cambió el diseño en la estructura con la ayuda de la impresora 3D, agregando secciones para reforzar las esquinas de la estructura y ajustar el mecanismo de desplazamiento usando resortes de mayor longitud ($\sim$ 9cm) y reduciendo la longitud entre la parte inferior del aro metálico con las rejillas, Fig. 2.10 y el mecanismo de desplazamiento, para obtener mayor sensibilidad a la curvatura y por lo tanto al desplazamiento.

Por último se decidió por construir una estructura metálica de aluminio que cubriera todo el mecanismo que compone el sensor de desplazamiento, esto con el fin de evitar cambios de temperatura por corrientes de aire, además de tener un prototipo funcional que pueda realizar mediciones en condiciones ambientales.

Para realizar esta estructura de aluminio se utilizó una lamina de 2mm de espesor, la cual fue cortada y grabada con ayuda de una cortadora de CNC, Fig. 2.11, del fabricante Visplay, para tener mayor precisión en el ensamble de las piezas. Ya con la cubierta de aluminio terminada se colocó el marco de plástico dentro con el aro donde se encuentran fijas la fibra óptica con el arreglo de las 4 FBG.

Para este prototipo final además de utilizar el arreglo llamado $A1$ de 4 FBG´s utilizado para el primer prototipo, tabla 2.1, se optó por fabricar un segundo arreglo llamado $A2$, con las mismas dimensiones que el primero, con un arreglo de 4 FBG´s con los parámetros mostrados en la tabla 2.4.



(a) Proceso de cortado de la lamina de aluminio.

(b) Cubierta final ya grabada y terminada con el marco de plástico dentro.

Fig. 2.11. Fabricación de la cubierta de aluminio del prototipo final con una cortadora CNC.

Tabla 2.4. Parámetros del fabricante del segundo arreglo de 4 rejillas Bragg (A2) para el prototipo final.

Parámetro	FBG 1	FBG 2	FBG 3	FBG 4
λ_b	1529.749 nm	1540.085 nm	1550.008 nm	1559.963 nm
Ancho de banda a 3dB	0.170 nm	0.166 nm	0.184 nm	0.172 nm
Reflectividad	90.55 %	90 %	89.4 %	87.41 %
Longitud de la rejilla	10 mm	10 mm	10 mm	10mm

Al ser rejillas de 10 mm de largo aumenta la reflectividad y el ancho de banda del espectro reflejado se reduce, con este arreglo se espera obtener mayor linealidad en las sensibilidades que dependan de los cambios en la longitud de onda reflejada de Bragg ($\Delta\lambda_b$).

Se eligió este arreglo de rejillas para utilizar la técnica de compensación por temperatura, la cual necesita una rejilla exclusiva para monitorear cambios en la longitud de onda de Bragg (λ_b) por variaciones en la temperatura (ΔT) y hacer que el sensor de desplazamiento sea sensible únicamente a cambios por deformaciones mecánicas.

2.4.1. Compensación por temperatura

Como se describió anteriormente las rejillas Bragg en fibra óptica son susceptibles a cambios de temperatura; así como cambios por deformaciones mecánicas, por esta razón si se requiere únicamente monitorear deformaciones mecánicas, es necesario disminuir las contribuciones por cambios de temperatura.

Para disminuir contribuciones que afectan a la longitud de onda reflejada por cambios en temperatura se utiliza una rejilla de referencia que llamaremos desde ahora FBG_{cT} de compensación por temperatura, Fig. 2.12, que será únicamente afectada por cambios de temperatura, esta se colocará cerca de las rejillas de sensado, las cuales son afectadas por cambios de temperatura y deformaciones mecánicas. Las cuales se pueden expresar de la siguiente manera:

Los cambios en la longitud de Bragg de la rejilla de sensado (λ_{b_s}) por deformaciones mecánicas y cambios en la temperatura están dados por:

$$\frac{\Delta\lambda_{b_s}}{\lambda_{b_s}} = (1 - p_e)\epsilon + (\alpha + \eta)\Delta T, \tag{2.23}$$

los cambios en la longitud de onda de Bragg de la rejilla de referencia por compensación de temperatura ($\lambda_{b_{cT}}$) están dados por:

$$\frac{\Delta\lambda_{b_{cT}}}{\lambda_{b_{cT}}} = (\alpha + \eta)\Delta T, \tag{2.24}$$

asumiendo que ambas rejillas Bragg son del mismo material es decir, tienen el mismo coeficiente de expansión térmica α y el mismo coeficiente termo óptico η. Restando las dos ecuaciones anteriores tenemos:

$$\left(\frac{\Delta\lambda_{b_s}}{\lambda_{b_s}} - \frac{\Delta\lambda_{b_{cT}}}{\lambda_{b_{cT}}}\right), = (1 - p_e)\epsilon \tag{2.25}$$

de esta manera se logran eliminar teóricamente las variaciones en la longitud de onda de Bragg por cambios de temperatura y así la deformación que sufra la rejilla de sensado queda de la forma [52]:

$$\epsilon = \frac{1}{(1 - p_e)}\left(\frac{\Delta\lambda_{b_s}}{\lambda_{b_s}} - \frac{\Delta\lambda_{b_{cT}}}{\lambda_{b_{cT}}}\right). \tag{2.26}$$

Para el prototipo final la rejilla de compensación por temperatura del fabricante Alxenses utilizada tiene los siguientes parámetros:

Tabla 2.5. Parámetros del fabricante para la rejilla utilizada como compensación de temperatura.

Parámetro	FBG_cT
λ_b	1520.058 nm
Ancho de banda a 3dB	0.184 nm
Reflectividad	90.15 %
Longitud de la rejilla	10 mm

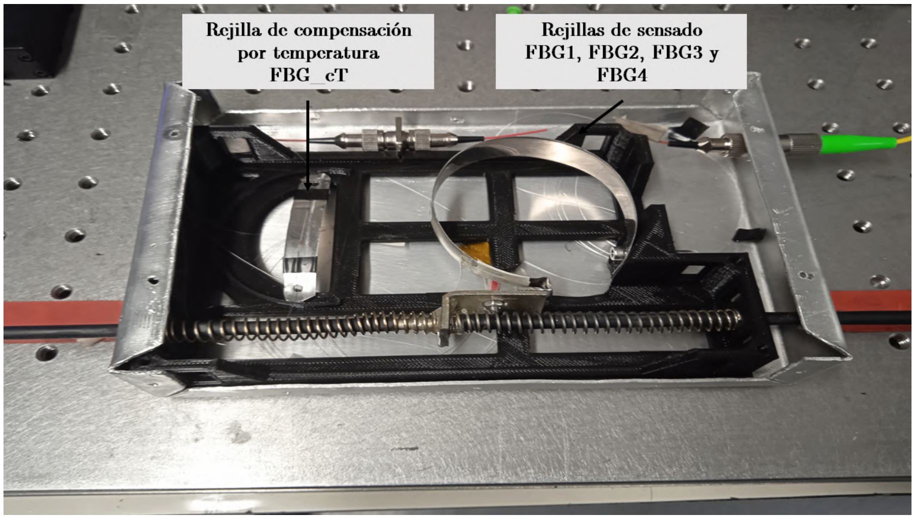


Fig. 2.12. Rejillas utilizadas para el prototipo final

2.4.2. Pruebas experimentales

En las pruebas experimentales del prototipo final se utilizaron los arreglos $A1$ y $A2$ con sus respectivas FBG´s. Para este prototipo se tomaron las mediciones para su caracterización con un sistema Interrogador del fabricante Micron Optics modelo Si-155 y para aplicar los desplazamientos se utilizó además de la platina milimétrica un alineador motorizado del fabricante New Focus modelo 8095 para aplicar movimientos micrométricos al sensor.

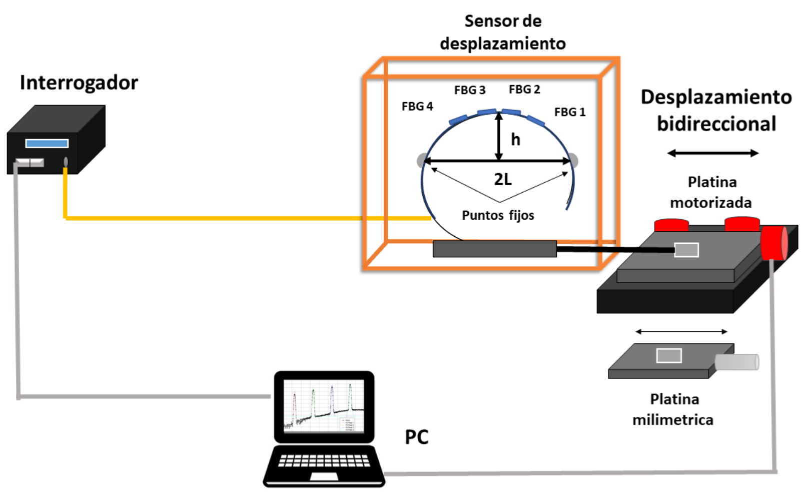


Fig. 2.13. Diagrama del montaje experimental del prototipo final

Se obtuvo nuevamente para el sensor la caracterización por curvatura, por desplazamientos milimétricos y de temperatura para el arreglo $A1$ y el arreglo $A2$ realizando las mediciones con el sistema interrogador.

Para el segundo arreglo ($A2$) que es el utilizado para el método de compensación por temperatura, se realizaron las pruebas experimentales para su caracterización por desplazamientos con variaciones de temperatura al sensor completo, para esto se colocó un termopar dentro del sensor, Fig. 2.14, para monitorear la temperatura ambiente en el interior del sensor, realizando las comparaciones de utilizar este método de compensación por temperatura a solo utilizar las rejillas de sensado.

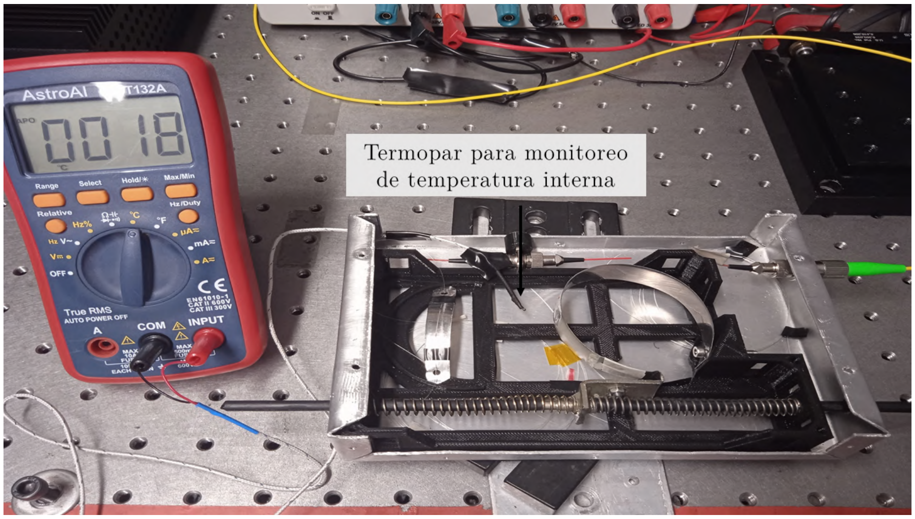
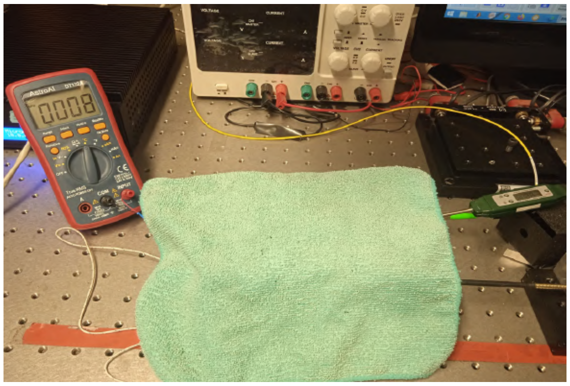


Fig. 2.14. Termopar colocado dentro del sensor para monitorear cambios de temperatura.

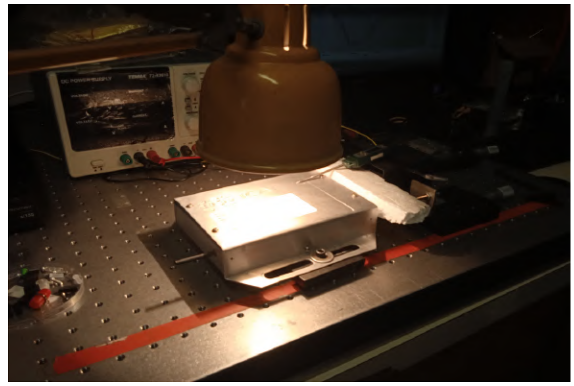
Como una primera parte se aplicaron desplazamientos micrométrico en pasos de $50\mu m$, $30\mu m$, $20\mu m$ y $10\mu m$ con el alineador motorizado, monitoreando la respuesta $\Delta\lambda_b$ de cada FBG en el arreglo.

Posteriormente se dejó el sensor en su posición inicial y se aplicaron variaciones rápidas de temperatura ($\pm 10^oC$) para enfriar y calentar el sensor. Para enfriar se utilizó una bolsa de de Gel congelado y para calentar una lampara incandescente de 100 W, Fig. 2.15, monitoreando las rejillas de sensado, la de compensación de temperatura y la resta de ambas.

Por último, se aplicaron desplazamientos en pasos de 100 μm en ambas direcciones al mismo tiempo que se cambiaba la temperatura del sensor para observar el comportamiento tanto de las rejillas de sensado, la de compensación y la resta de ambas. Para esta ultima medición se agregó un factor de corrección para obtener una mejor compensación de temperatura.



(a) Enfriamiento del sensor con gel congelado.



(b) Calentamiento del sensor con lampara incandescente.

Fig. 2.15. Proceso de enfriamiento y calentamiento del sensor para caracterizar el sensor por compensación de temperatura.

2.4.3. Sistema interrogador

Cuando una rejilla Bragg es deformada o se le aplica un cambio de temperatura, la longitud de onda de Bragg reflejada λ_b sufre un corrimiento $\Delta\lambda_b$. Para medir estos corrimientos es necesario hacerlo de forma precisa, con resoluciones cercanas a 1 pm.

Para medir estos corrimientos en la longitud de onda de Bragg se utilizan sistemas interrogadores, que cuentan con una fuente de luz láser sintonizable, filtros ópticos y fotodetectores, los cuales realizan un escaneo de los espectros reflejados por las FBG a una cierta frecuencia de muestreo con una alta precisión.

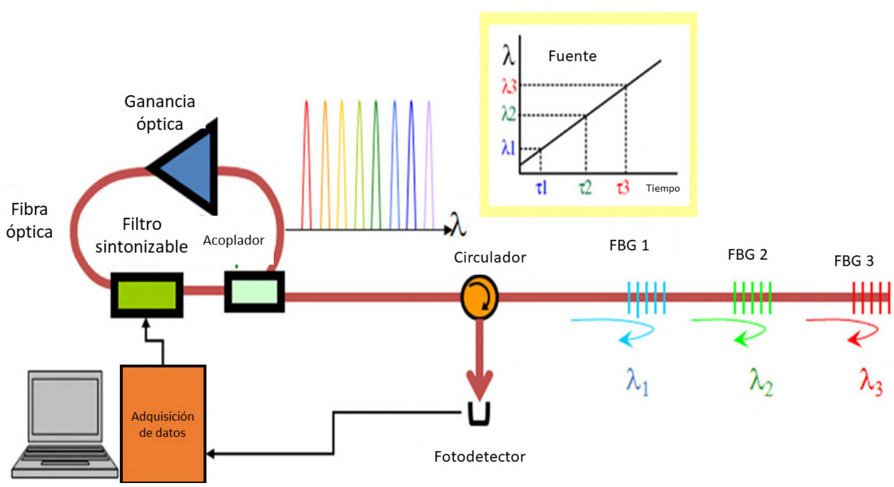


Fig. 2.16. Sistema experimental de un sistema interrogador basado en fibra óptica [53].

El principio de funcionamiento básico del sistema interrogador OptiSystem Si-155 utilizado, Fig. 2.17, es a base de una fuente láser sintonizable de fibra óptica, que opera en un rango de 1500 nm a 1600 nm, que esta acoplado a un medio de ganancia y un filtro de Fabry-Perot sintonizable para hacer un barrido en el rango de operación del láser en un determinado dominio de tiempo [53]. De esta manera se puede conectar en serie un arreglo de varias FBG's y monitorear el corrimiento de la longitud de onda reflejada de cada una de ellas. Las propiedades de rendimiento del sistema se muestran en la siguiente tabla:

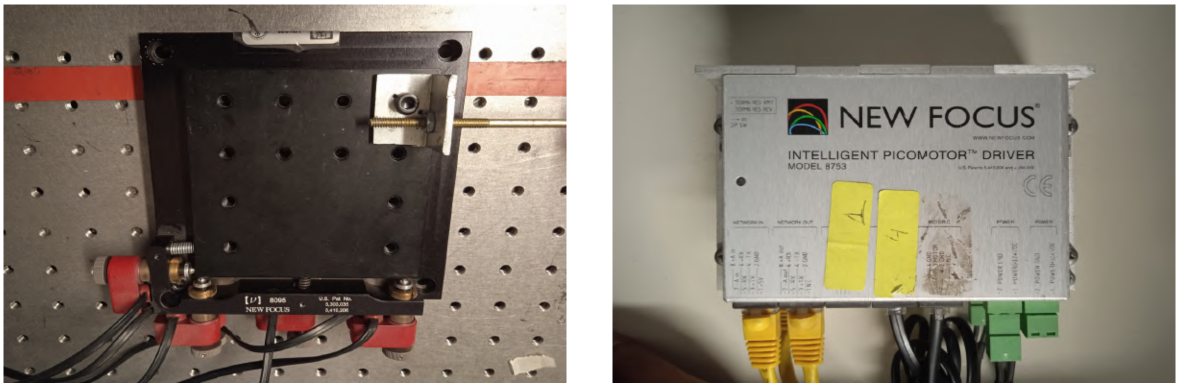
Tabla 2.6. Parámetros del fabricante para el sistema interrogador OptiSystem Si-155 [54].

Parámetro	Valor
Canales	1
Rango longitud de onda	1500-1600nm
Exactitud/estabilidad	1 pm
Frecuencia de muestreo espectro completo	10 Hz

Fig. 2.17. Sistema Interrogador OptiSystem Si-155.

2.4.4. Alineador motorizado

Para la aplicación de desplazamientos micrométricos se utilizó un alineador motorizado del fabricante New Focus, modelo 8095, Fig. 2.18a. Este dispositivo puede aplicar desplazamientos en tres dimensiones con motores piezoeléctricos en un rango de 3 mm, con un intervalo mínimo <30nm, además de realizar movimientos angulares de su plataforma con un rango angular de 4 grados.



(a) Alineador motorizado. *(b) Controlador del dispositivo.*

Fig. 2.18. Dispositivo motorizado para la aplicación de desplazamientos micrométricos lineales

Para alinear de forma correcta el dispositivo se utiliza el controlador del fabricante New Focus modelo 8753, Fig. 2.18b, el cual por medio de comunicación Ethernet con una PC se pueden controlar los pasos de desplazamiento del alineador en 3 dimensiones [55]. Para los fines del experimento solo se aplicaron desplazamientos en el eje x en ambas direcciones para observar la respuesta del prototipo final del sensor ante movimientos micrométricos controlados.

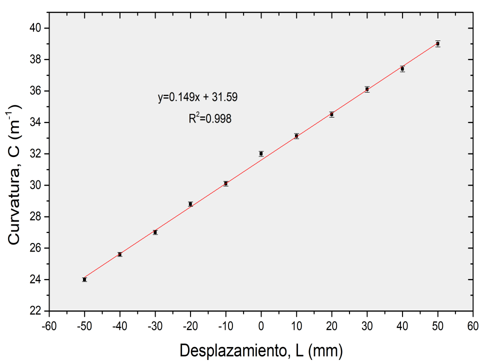
Capítulo 3

Resultados

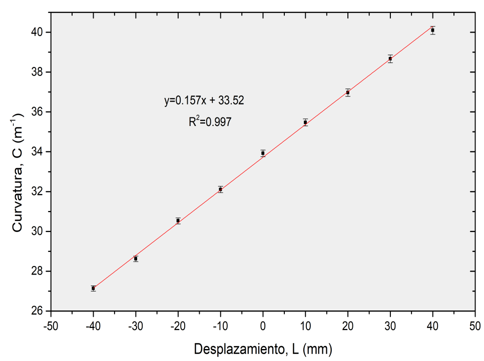
3.1. Resultados del primer prototipo

3.1.1. Análisis de deformación por curvatura

En primer lugar se hizo un análisis de la sensibilidad por curvatura y la relación desplazamiento-curvatura para estimar la linealidad de ambas relaciones, esto se hizo para el primer arreglo de rejillas Bragg (A1) fijando el aro metálico en el soporte de plástico con un radio inicial de 3.1 cm (R_1) y después modificando el aro con un radio inicial de 2.9 cm (R_2).



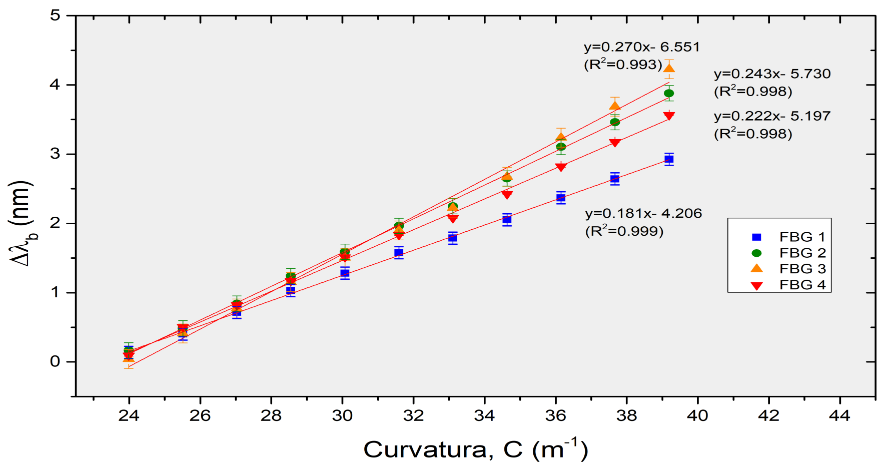
(a) Anillo metálico con radio R_1.



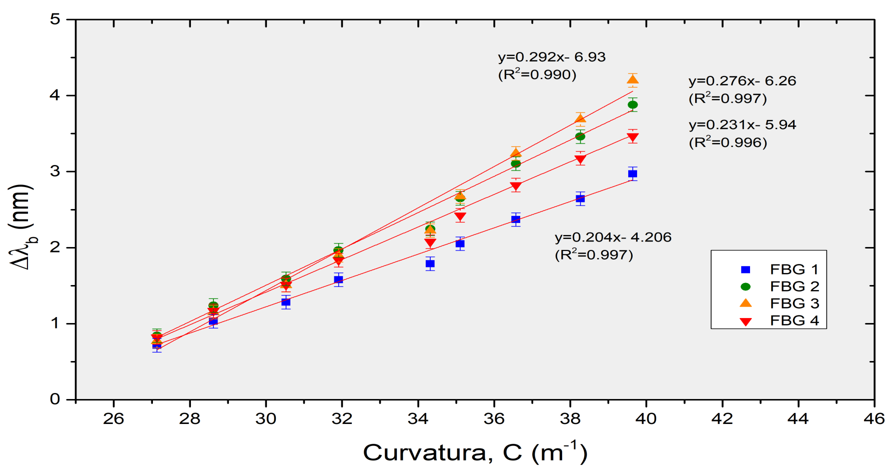
(b) Anillo metálico con radio R_2.

Fig. 3.1. Relación de variación de curvatura contra desplazamiento lineal del aro metálico para los dos radios propuestos,(a)$R_1 = 2.9cm$ y (b)$R_2 = 2.7cm$.

Como puede verse en los gráficos de la figura 3.1, hay un aumento mayor en el cambio de la curvatura por desplazamiento para el radio inicial R_2, Fig. 3.1b, esto indica para este radio se tendrá mayor sensibilidad a la curvatura a diferencia del radio R_1.



(a) Rejillas en anillo metálico con radio R_1.



(b) Rejillas en anillo metálico con radio R_2.

Fig. 3.2. Corrimiento de la longitud de Bragg ($\Delta\lambda_b$)del arreglo de FBG's al aplicar cambios en la curvatura del anillo metálico. (a)$R_1 = 2.9cm$ y (b)$R_2 = 2.7cm$.

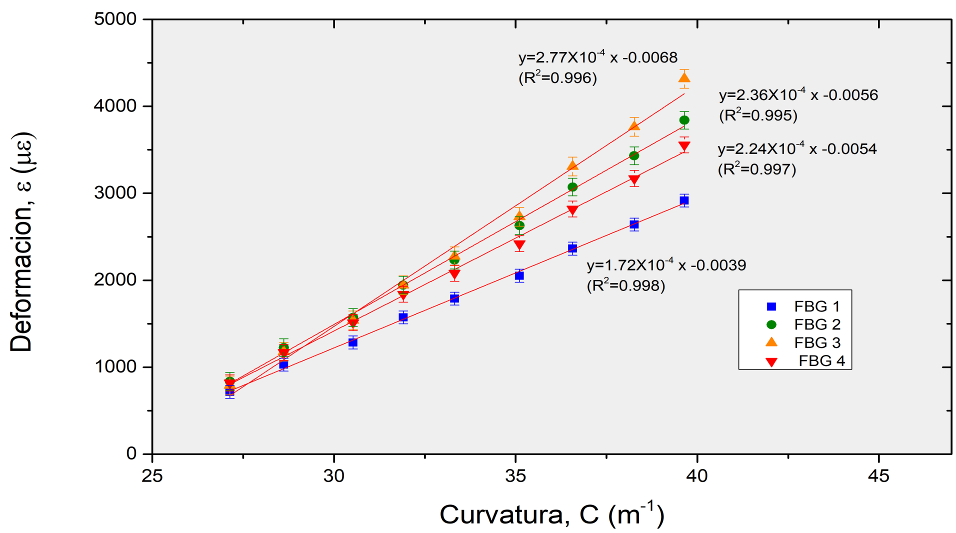
Haciendo un ajuste lineal a los datos experimentales de la figura 3.2 se obtienen las sensibilidades a la curvatura para cada rejilla tomando ambos radios R_1 y R_2, mostrados en la tabla 3.1. Además de la relación curvatura contra desplazamiento para ambos radios, se hizo un análisis de la sensibilidad a la curvatura para ambos radios propuestos (R_1 y R_2), para observar el cambio en la longitud de onda de Bragg λ_b de los espectros de potencia reflejada con respecto a el cambio en la curvatura de las rejillas al aplicar un desplazamiento.

Estas gráficas muestran que las rejillas que están mas al centro de la parte superior del aro metálico que son $FBG2$ y $FBG3$ son las que presentan mayor sensibilidad a la curvatura que las que se encuentran en los extremos ($FBG1$ y $FBG4$), esto se debe a

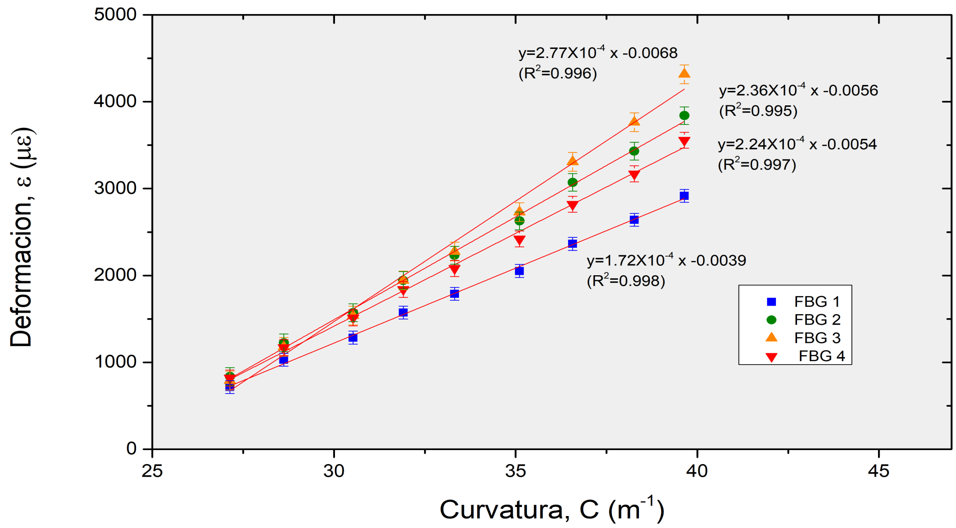
Tabla 3.1. Sensibilidades a la curvatura para cada radio inicial propuesto.

	Radio R_1	Radio R_2
Rejilla	Sensibilidad (pm/m^-1)	Sensibilidad (pm/m^-1)
FGB 1	181 ±1	204 ±4
FBG 2	243 ±2	276 ±4
FBG 3	270 ±7	292 ±9
FBG 4	222 ±2	231 ±4

que la parte central de la parte superior del anillo sufre una mayor deformación que en las partes laterales, que se relaciona con lo visto en la simulación, Fig 2.8. Además, la sensibilidad a la curvatura aumenta para el segundo radio R_2, Fig. 3.2b, que es menor a R_1, Fig. 3.2a, esto se debe a que si hay mayor variación en el cambio de curvatura esto implica que habrá una mayor deformación en el aro y por lo consiguiente en las FBG's fijas en la parte superior del aro, ya que la deformación es proporcional a la curvatura en las rejillas como se puede ver en la ecuación 2.2.



(a) Rejillas en anillo metálico con radio R_1.



(b) Rejillas en anillo metálico con radio R_2.

Fig. 3.3. Deformación estimada por le corrimiento en la longitud de onda de Bragg $\Delta\lambda_b$ por variación de curvatura. (a)$R_1 = 2.9cm$ y (b)$R_2 = 2.7cm$.

Para llegar a esta conclusión se hizo un análisis de la deformación que sufren las rejillas tomando en cuenta el corrimiento en la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_b$) que sufre al variar la curvatura del arreglo que se puede ver en los gráficos de la figura 3.3.

Para estimar la deformación se usó la expresión para el corrimiento de la longitud de onda de Bragg por deformaciones mecánicas:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 - p_e)\epsilon \tag{3.1}$$

tomando como el factor $(1 - p_e) = 0.78$ por ser rejillas en una fibra de sílice mono modal [56] y λ_b como el valor de la longitud de onda reflejada sin deformar el aro.

3.1.2. Calibración por desplazamientos

Para obtener la calibración por desplazamientos de ambos radios propuestos para el primer prototipo se tomó el espectro de potencia reflejada del arreglo de rejillas Bragg, Fig. 3.4, para cada posición se obtuvo un espectro con 4 picos de intensidad, cada uno asociado a la rejilla del arreglo utilizado mostrado en la tabla 2.1.

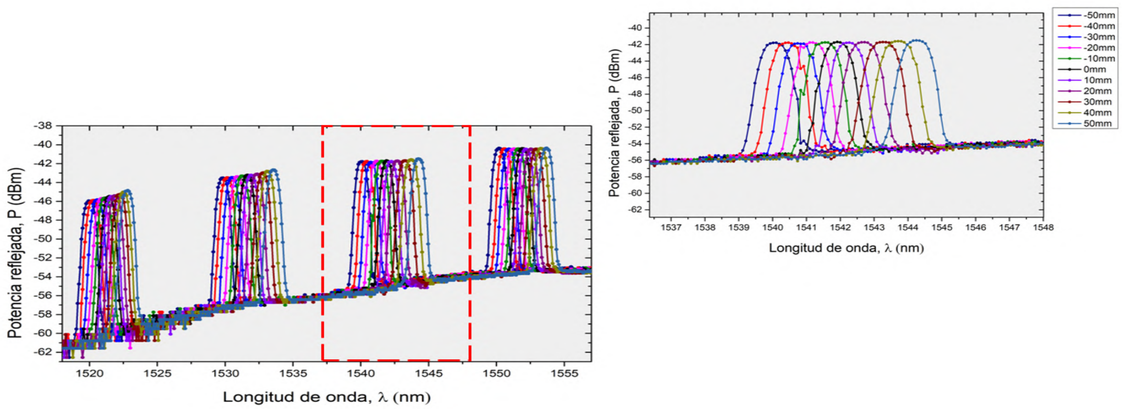


Fig. 3.4. Espectro potencia reflejada, con inserto en la zona de 1537 a 1547 nm.

Para obtener la longitud Bragg (λ_b) se hizo un ajuste de los datos experimentales de cada pico de potencia reflejada a una función gaussiana de la forma:

$$f(x) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-x_C)^2}{2\sigma^2}} \tag{3.2}$$

donde A es el área bajo la curva gaussiana, x_c es el valor promedio del ajuste y *sigma* es la desviación estándar.

En la figura 3.5 se muestra el ajuste gaussiano a los datos del espectro de potencia reflejada para una FBG, puede verse que aunque no presenten una forma idéntica los

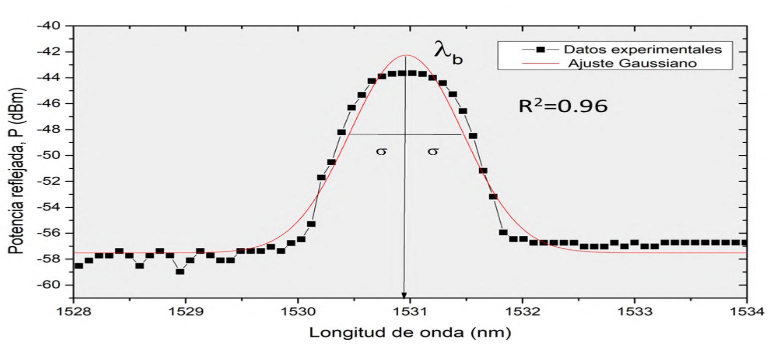
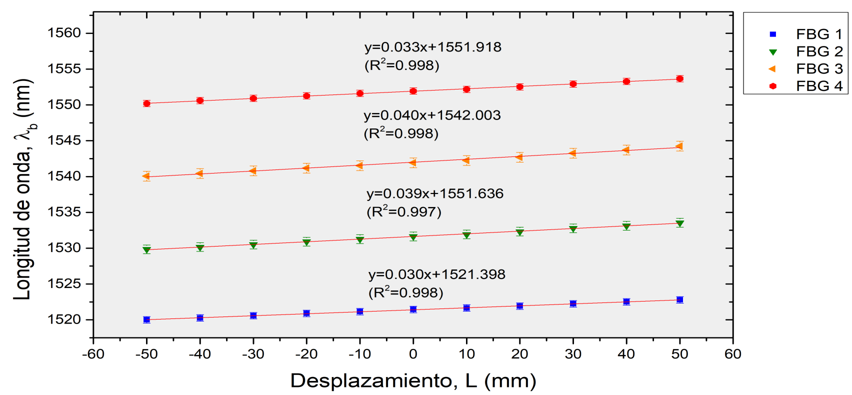


Fig. 3.5. Ajuste de los datos experimentales a una función gaussiana.

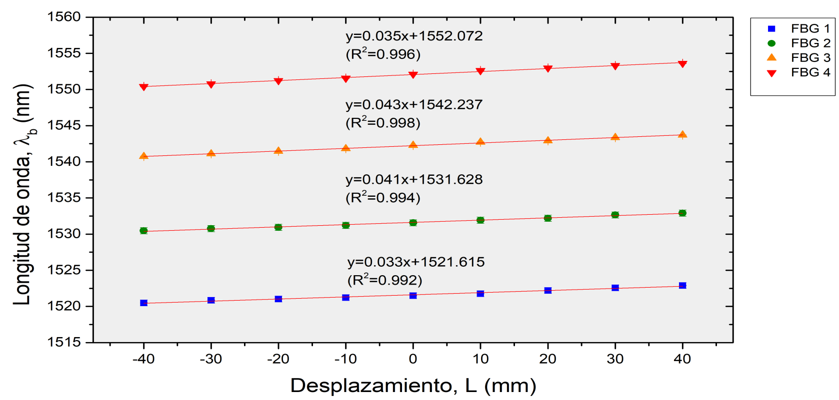
datos experimentales y la curva de ajuste, presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.96$, por lo tanto este método puede ser utilizado para estimar el pico de la longitud de onda central λ_b en sensores a base de rejillas Bragg [57].

Este método de ajuste se utilizó en cada pico de intensidad para determinar la longitud de onda central ($\Delta\lambda_b$), Fig. 3.6, y se tomó ese valor para cada posición en el rango de -50mm a +50 mm en intervalos de 10 mm.

De esta manera se obtuvieron las longitudes de onda λ_b para cada posición y se realizó el gráfico correspondiente con sus respectivos ajustes lineal para determinar la sensibilidad al desplazamiento para el primer prototipo del sensor, así como para determinar la sensibilidad a la curvatura y deformación.



(a) Rejillas en anillo con radio R_1.



(b) Rejillas en anillo con radio R_2.

Fig. 3.6. Respuesta al desplazamiento de las FBG's para los distintos radios e intervalos de medición. $(a) R_1 = 2.9cm$ *y* $(b) R_2 = 2.7cm$.

Las sensibilidades al desplazamiento para cada FBG se obtienen haciendo un ajuste lineal de los datos experimentales, mostrados en la tabla 3.2

En principio se puede observar en los gráficos de la figura 3.6 que las sensibilidades

Tabla 3.2. Sensibilidades al desplazamiento para cada radio inicial propuesto.

	Radio R_1	Radio R_2
Rejilla	Sensibilidad (pm/mm)	Sensibilidad (pm/mm)
FGB 1	31 $\pm$1	33 $\pm$1
FBG 2	39 $\pm$2	41 $\pm$2
FBG 3	40 $\pm$2	43 $\pm$3
FBG 2	33 $\pm$1	35 $\pm$4

para las 4 FBG's en el arreglo A_1 no son las mismas. Las sensibilidades para las rejillas que están mas próximas a la parte superior del aro, es decir la $FBG2$ y $FBG3$ tienen mayor sensibilidad que las que están en los extremos, que son la $FBG1$ y $FBG4$, de igual forma la sensibilidad al desplazamiento para el radio R_2 aumenta ligeramente, lo cual coincide con las deformaciones por curvatura de las gráficas de la figura 3.3.

3.1.3. Histéresis y no-linealidad

El fenómeno de histeresis en un sensor está definido como la diferencia de las señales de salida del mismo mesurando dependiendo de la trayectoria de medición realizada en el sensor [58]. La no-linealidad en un sensor es la diferencia máxima entre la curva de calibración y los datos experimentales en el rango de operación [59].

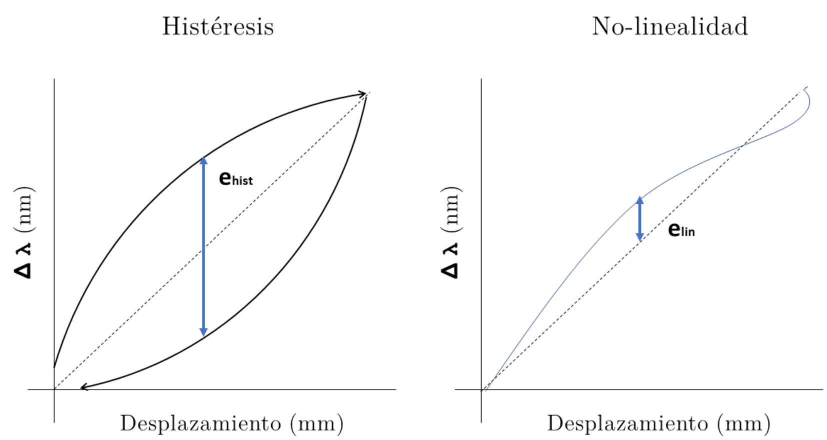
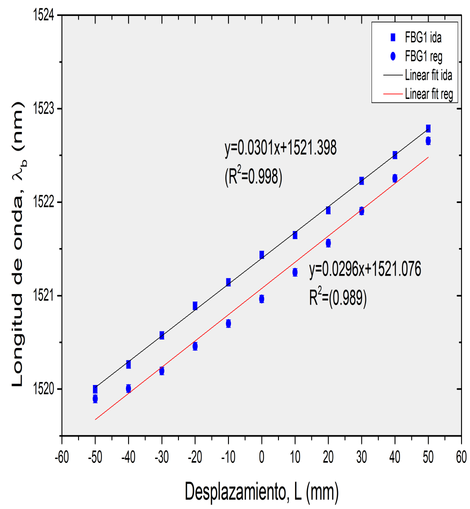
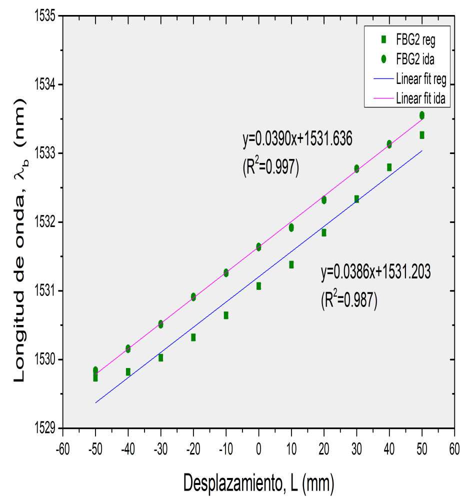


Fig. 3.7. Representación esquemática del error por histeresis y por no-linealidad.

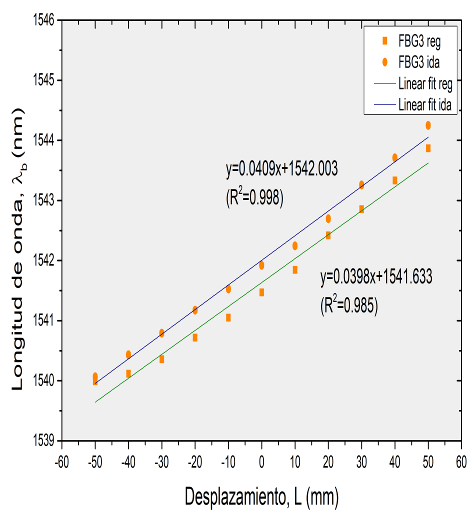
Para observar el error asociado por histeresis en el primer prototipo propuesto lo que se hizo es calibrar en un sentido el sensor aplicando desplazamientos en dirección de izquierda a derecha, es decir de -50 mm hasta +50 mm y posteriormente de derecha a izquierda, es decir de +50mm hasta -50 mm, Fig. 3.7, cubriendo todo el intervalo de medición en las mismas posiciones para ambas trayectorias, observando y graficando la longitud de onda λ_b de cada rejilla Bragg en cada posición para desplazamientos en ambas direcciones.



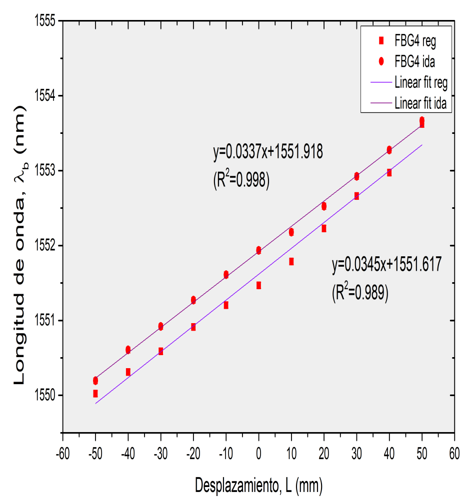
(a) Curva de histeresis para FBG 1.



(b) Curva de histeresis para FBG 2.



(c) Curva de histeresis para FBG 3.

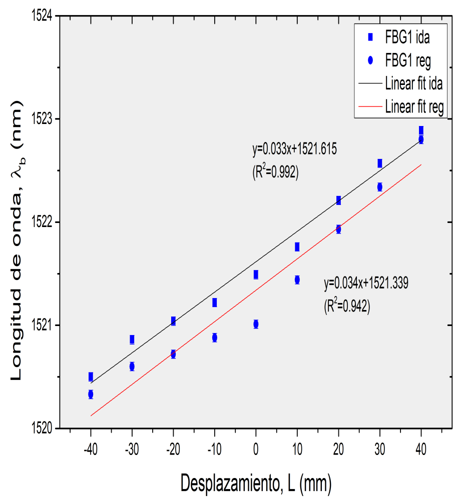


(d) Curva de histeresis para FBG 4.

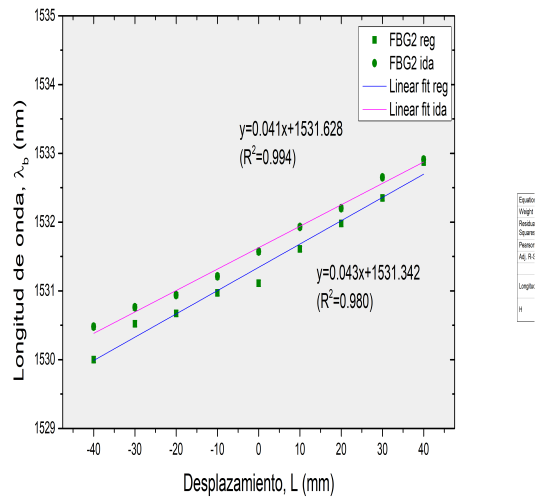
Fig. 3.8. Curvas de histeresis para la sensibilidad al desplazamiento de R_1.

El error máximo por no-linealidad se estima tomando la diferencia máxima entre los valores de la variable dependiente (λ_b) de los gráficos de la figura 3.6 con la recta de ajuste, es decir el valor residual máximo del ajuste lineal en todo el rango de medición, para cada FBG para los radios R_1 y R_2.

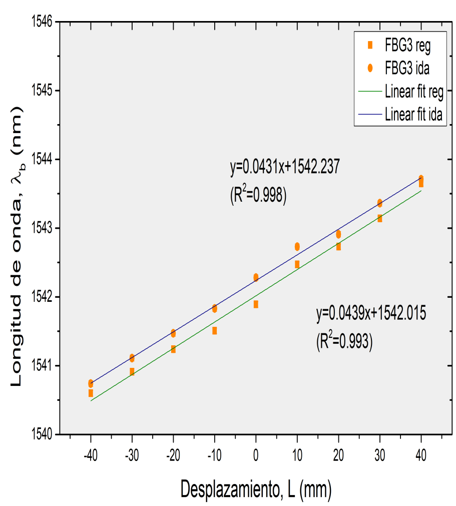
En los gráficos de la figura 3.8 se observan las curvas de histeresis para R_1 cuando



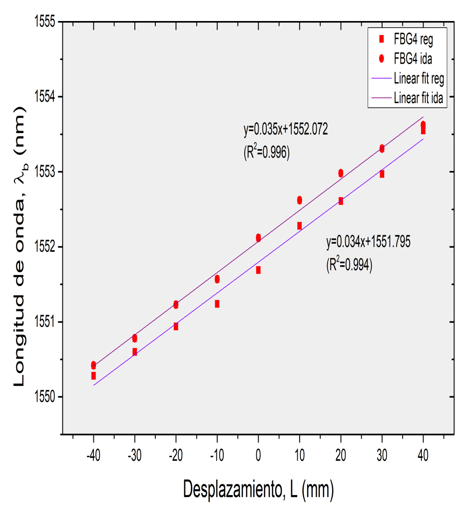
(a) Histeresis para la rejilla FBG 1.



(b) Histeresis para la rejilla FBG 2.



(c) Histeresis para la rejilla FBG 3.



(d) Histeresis para la rejilla FBG 4.

Fig. 3.9. Curvas de histeresis para sensibilidad al desplazamiento para R_2.

se somete el sensor a desplazamientos en una sola dirección de izquierda a derecha y cuando se somete a desplazamientos de derecha a izquierda.

En la figura 3.9 se muestra el mismo fenómeno de histeresis por desplazamientos para R_2 de las 4 FBG's en el arreglo.

Para obtener cuantitativamente el error porcentual por histeresis en el sensor de desplazamiento, se debe identificar la diferencia máxima entre los valores medidos de λ_b para una misma posición ($|\lambda_b^+ - \lambda_b^-|_{max}$), donde λ_b^+ es el valor de la longitud de onda medida con dirección por desplazamientos de izquierda a derecha y λ_b^- es el valor tomado con dirección de derecha a izquierda. Esta diferencia máxima se debe dividir entre el valor del rango de medición total, es decir la diferencia de la longitud de onda en la posición final e inicial del sensor ($\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}$) [60], de la forma:

$$(e_{hist})_{\%} = \frac{|\lambda_b^+ - \lambda_b^-|_{max}}{\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}} \times 100 \tag{3.3}$$

El error porcentual por no-linealidad se determina tomando la diferencia máxima entre los valores medidos $\lambda_{b_{exp}}$ y la recta de ajuste $\lambda_{b_{fit}}$, es decir el residual máximo, dividido igualmente en el rango de medición total ($\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}$), de la forma:

$$(e_{lin})_{\%} = \frac{|\lambda_{b_{exp}} - \lambda_{b_{fit}}|_{max}}{\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}} \times 100 \tag{3.4}$$

Una forma de sumar estas dos fuentes de error es tomando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (RSS por sus siglas en inglés de *Root Sum Square*), e_{RSS} de los errores individuales por histeresis y no-linealidad, de la forma:

$$e_{RSS} = \sqrt{(e_{his})^2 + (e_{lin})^2} \tag{3.5}$$

En la tabla 3.3 se muestran los valores estimados del error asociado por histeresis, por no-linealidad y la suma de errores para cada rejilla del arreglo A_1 en el sensor de desplazamiento para R_1:

Tabla 3.3. Estimación de error para cada rejilla de R_1.

$\Delta\lambda_b$				Error %		
Rejilla	$\|\lambda_b^+ - \lambda_b^-\|_{max}$	$\|\lambda_{b_{exp}} - \lambda_{b_{fit}}\|_{max}$	$\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}$	$e_{hist_{\%}}$	$e_{lin_{\%}}$	e_{RSS}
FBG 1	0.473 ± 0.072 nm	0.040 ± 0.004 nm	2.891 ± 0.069 nm	16.36 %	1.41 %	16.42 %
FBG 2	0.589 ± 0.068 nm	0.060 ± 0.006 nm	3.816 ± 0.070 nm	15.43 %	1.57 %	15.50 %
FBG 3	0.479 ± 0.064 nm	0.090 ± 0.009 nm	4.259 ± 0.063 nm	11.24 %	4.46 %	12.09 %
FBG 4	0.467 ± 0.067 nm	0.078 ± 0.005 nm	3.644 ± 0.070 nm	12.81 %	2.14 %	12.98 %

Para R_2 tenemos las gráficos de histeresis mostrados en la figura 3.9, la estimación del error porcentual se refleja en la siguiente tabla:

Tabla 3.4. Estimación del error para cada rejilla de R_2.

$\Delta\lambda_b$				Error %		
Rejilla	$\lvert\lambda_b^+ - \lambda_b^-\rvert_{max}$	$\lvert\lambda_{b_{exp}} - \lambda_{b_{fit}}\rvert_{max}$	$\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}$	$e_{hist_{\%}}$	$e_{lin_{\%}}$	e_{RSS}
FBG 1	0.487 ± 0.065 nm	0.149 ± 0.005 nm	2.173 ± 0.070 nm	22.41 %	6.85 %	23.43 %
FBG 2	0.472 ± 0.071 nm	0.092 ± 0.007 nm	3.134 ± 0.069nm	15.06 %	2.93 %	15.34 %
FBG 3	0.395 ± 0.070 nm	0.118 ±0.009 nm	3.107 ± 0.072 nm	12.71 %	3.79 %	13.26 %
FBG 4	0.438 ± 0.069 nm	0.112 ± 0.006 nm	2.996 ± 0.068 nm	14.61 %	3.73 %	15.07 %

3.1.4. Análisis por variación de temperatura

Para la calibración por variación por temperatura lo que se obtuvo fue el espectro de potencia reflejada del arreglo con las 4 FBG's ($A1$) para distintas temperaturas, Fig. 3.10.

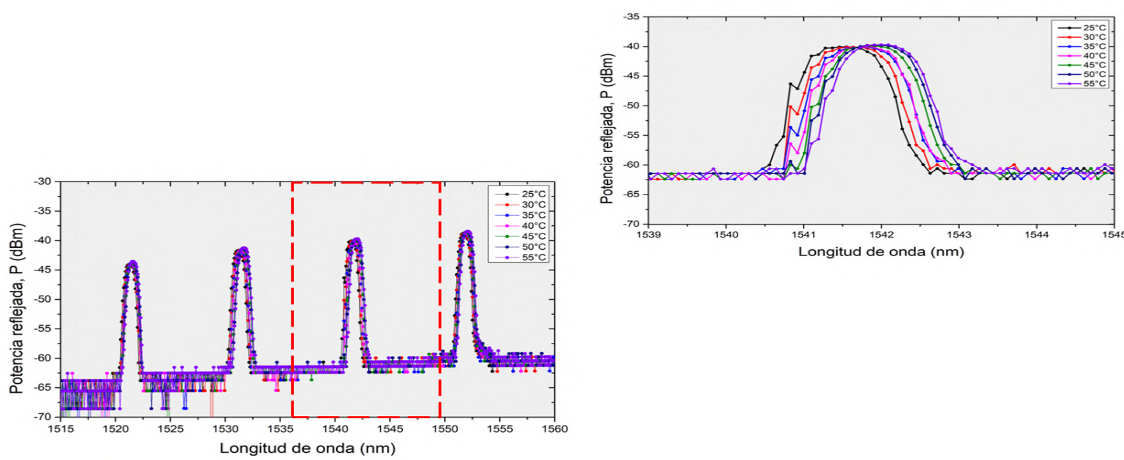


Fig. 3.10. Espectro de potencia reflejada de $A1$ con variación de temperatura, con inserto en el rango de 1540 a 1544 nm.

De igual manera como la caracterización por desplazamientos, se hizo un ajuste a los valores del espectro de reflexión para obtener la longitud de onda central para cada rejilla del arreglo que se muestra en la figura 3.11.

Haciendo los ajustes lineales de los datos experimentales para cada λ_b se obtienen las sensibilidades a la temperatura para el arreglo de rejillas Bragg, que se muestran en la tabla 3.5.

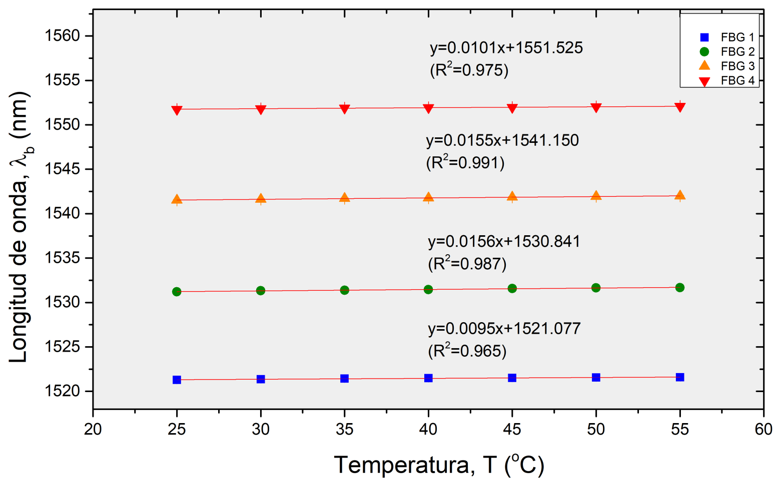


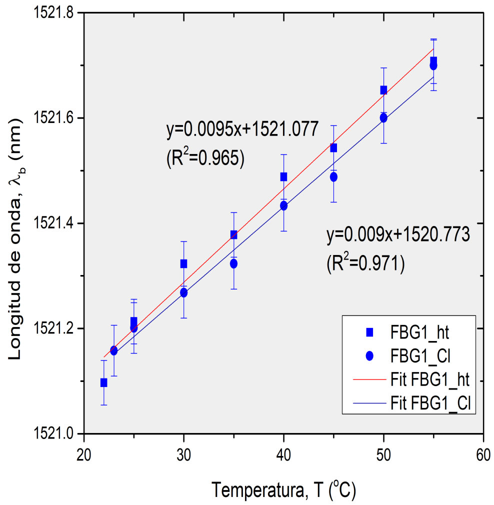
*Fig. 3.11. Respuesta a la temperatura para A*1

Tabla 3.5. Sensibilidades a la temperatura para cada radio inicial propuesto.

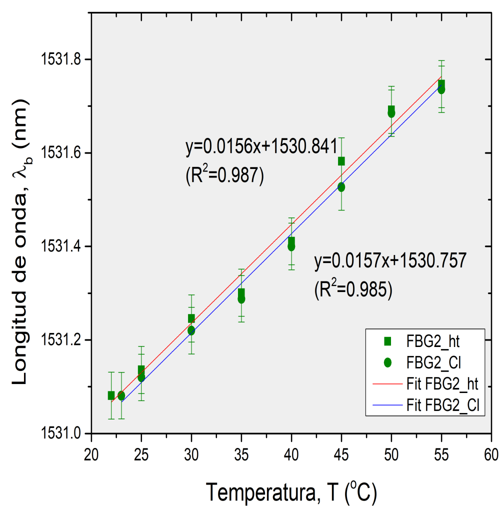
	Arreglo $A1$
Rejilla	Sensibilidad (pm/^oC)
FGB 1	9.5 $\pm$1.3
FBG 2	15.6 $\pm$1.8
FBG 3	15.5 $\pm$1.7
FBG 4	10.1 $\pm$1.4

Puede verse en tanto en la figura 3.11 así como la tabla 3.5, que la sensibilidad a la temperatura es de igual manera mayor para las rejillas $FBG2$ y $FBG3$. Esto puede deberse a la contribución de dilatación por temperatura del anillo de acero inoxidable utilizado para fijar el arreglo de rejillas, ya que al aumentar la temperatura este se expande induciendo un esfuerzo adicional a las rejillas, provocando un cambio en la longitud Bragg λ_b adicional al provocado únicamente por cambio de temperatura [61].

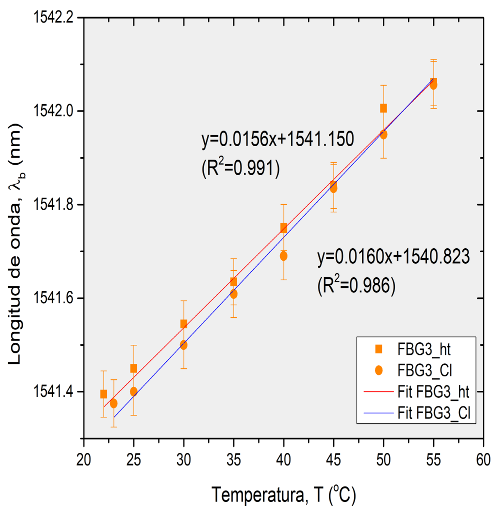
Semejante a la caracterización por desplazamientos, las curvas de sensibilidad por cambios de temperatura presentan histeresis al calentar (ht , *heat*) y enfriar (Cl, *cooling*) el anillos con las 4 FBG's, como puede verse en los gráficos de la figura 3.12.



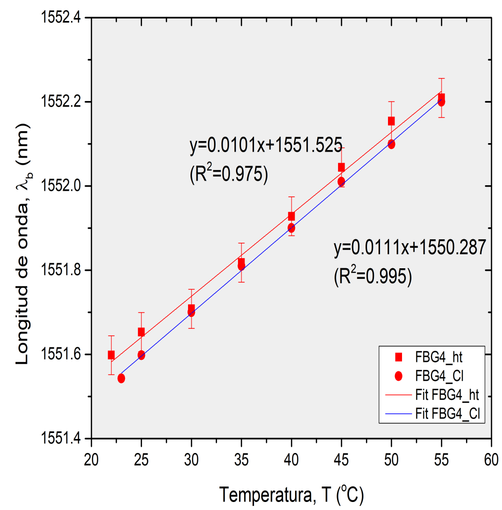
(a) Curva de histeresis para FBG 1.



(b) Curva de histeresis para FBG 2.



(c) Curva de histeresis para FBG 3.



(d) Curva de histeresis para FBG 3.

Fig. 3.12. Curvas de histeresis para sensibilidad a la temperatura.

El error porcentual por no linealidad por variación de temperatura se realiza tomando el máximo residual para cada FBG de las rectas de calibración de la figura 3.12.

Los datos para estimar el error porcentual asociado a la histeresis, a la no-linealidad y la suma de ambas por calibración de temperatura se realizan de igual manera como en la Sección 3.1.3 y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.6. Estimación de error por variación de temperatura de A1.

$\Delta\lambda_b$				Error %		
Rejilla	$\|\lambda_{b_{ht}} - \lambda_{b_{Cl}}\|_{max}$	$\|\lambda_{b_{exp}} - \lambda_{b_{fit}}\|_{max}$	$\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}$	$e_{hist_{\%}}$	$e_{lin_{\%}}$	e_{RSS}
FBG 1	0.055 ± 0.009 nm	0.048 ± 0.005 nm	0.611 ± 0.064 nm	9.01 %	7.85 %	11.95 %
FBG 2	0.060 ± 0.011 nm	0.040 ± 0.007 nm	0.666 ± 0.058 nm	9.00 %	6.00 %	10.81 %
FBG 3	0.061 ± 0.010 nm	0.046 ± 0.009 nm	0.668 ± 0.057 nm	9.13 %	6.88 %	11.43 %
FBG 4	0.055 ± 0.008 nm	0.030 ± 0.006 nm	0.613 ± 0.062 nm	8.97 %	4.89 %	10.21 %

Para reducir estos errores por histeresis se propuso un nuevo diseño en la construcción del sensor, para estabilizar la deformación del anillo metálico con el arreglo de las 4 FBG's así como utilizar el método de compensación por temperatura para reducir los efectos por variación de temperatura a la hora de monitorear desplazamientos milimétricos y micrométricos.

3.2. Resultados prototipo final

3.2.1. Análisis de deformación por curvatura

Para el prototipo final se determinó nuevamente la relación curvatura contra desplazamiento pero con un radio inicial (R_3) de 2.7 cm, para obtener un rango de medición de $\pm 30mm$ con el propósito de aumentar la sensibilidad al desplazamiento, además de reducir el volumen total del sensor para adecuarlo a modelos comerciales. Esta relación se muestra en el siguiente figura:

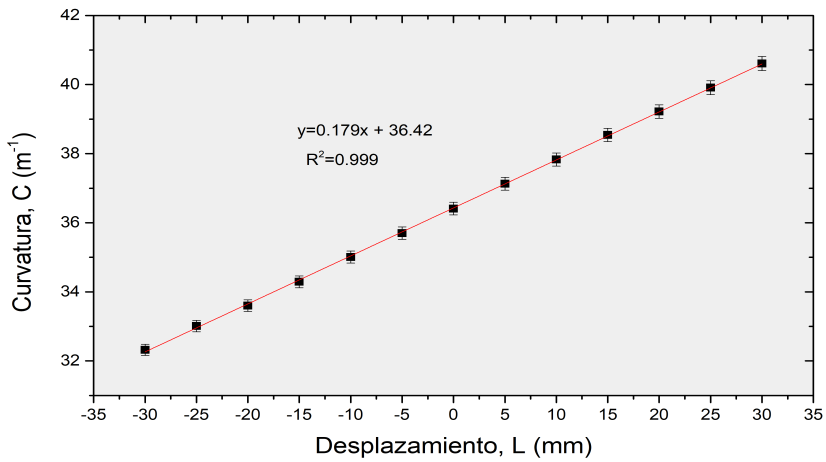


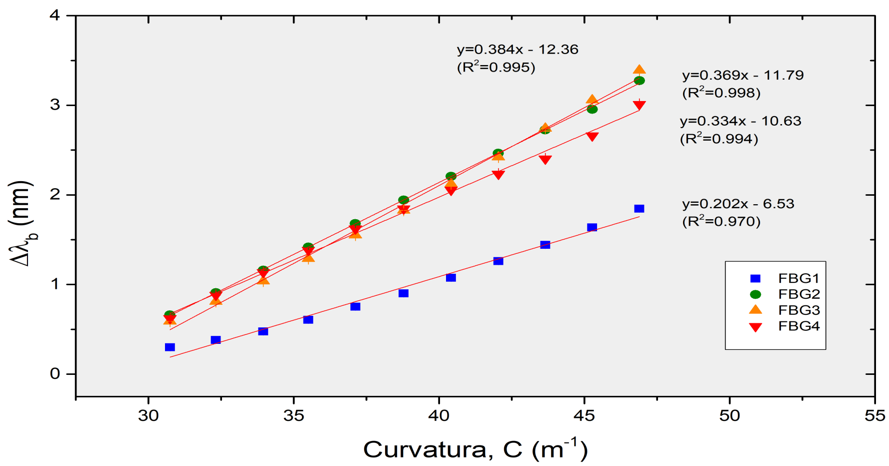
Fig. 3.13. Relación desplazamiento curvatura para el aro utilizado en el prototipo final

En la figura 3.13 se puede ver que al reducir el radio del anillo con el arreglo de rejillas se aumenta la relación curvatura contra desplazamiento, de esta manera se espera tener mayor sensibilidad a la curvatura así como a los desplazamientos.

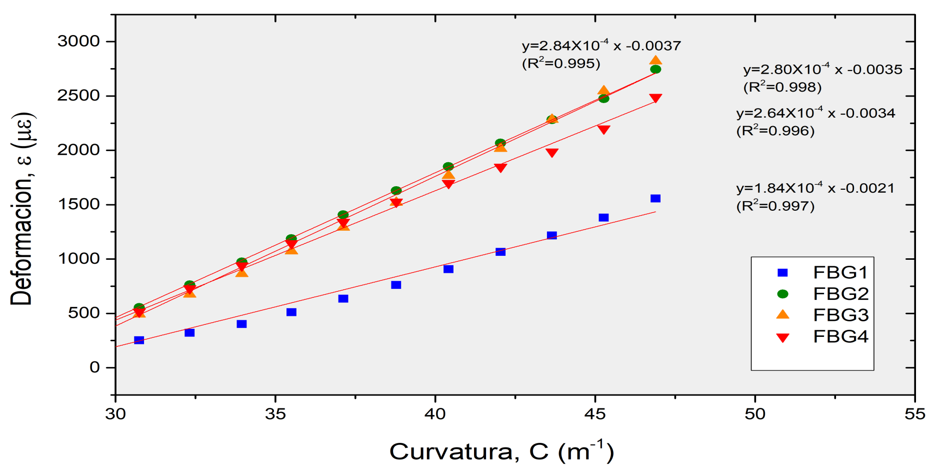
De la misma manera que para el primer prototipo, se hizo un análisis de la respuesta del sensor a los cambios de curvatura y se estimó la deformación que sufre la rejilla al conocer el corrimiento de la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_b$), mostrado en la figura 3.14.

Tabla 3.7. Sensibilidades a la curvatura para el prototipo final.

	Arreglo $A2$
Rejilla	Sensibilidad (pm/m^{-1})
FGB 1	202 ± 3
FBG 2	369 ± 5
FBG 3	384 ± 7
FBG 4	334 ± 4



(a) Respuesta a la curvatura del prototipo final.



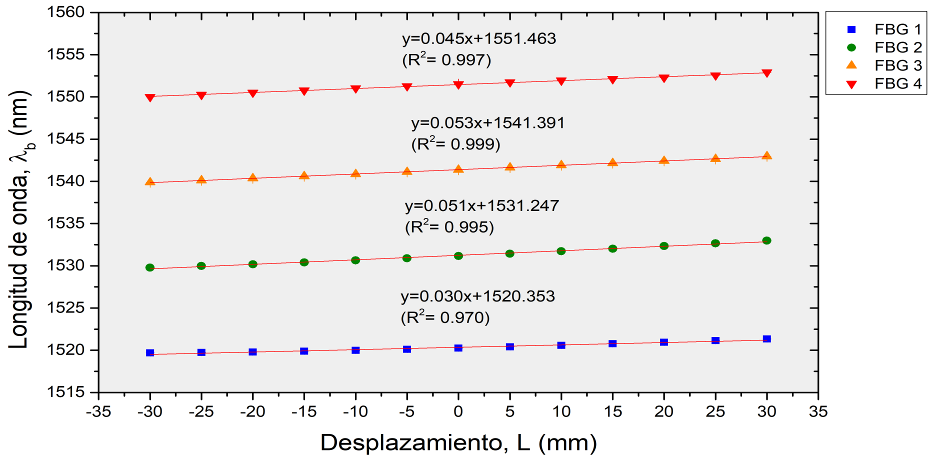
(b) Deformación por curvatura del prototipo final.

Fig. 3.14. Respuesta a la curvatura y estimación de la deformación para el prototipo final con $R_3 = 2.7cm$

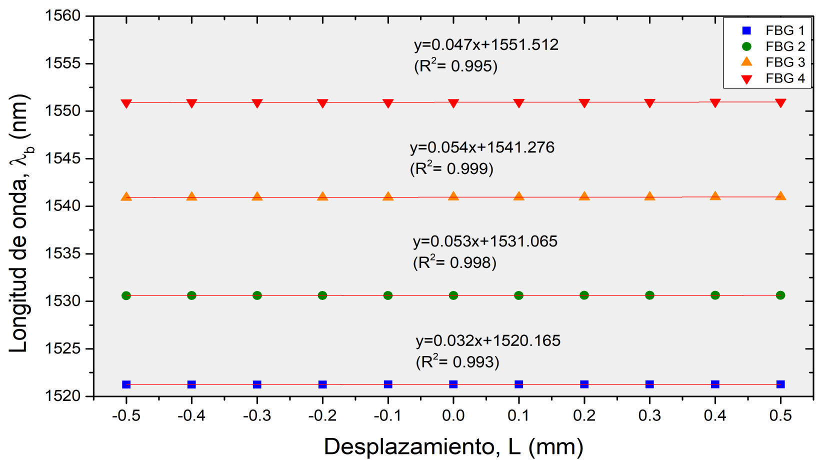
En la tabla 3.7 se muestran las sensibilidades a la curvatura del arreglo $A2$ para el prototipo final, donde se puede ver un aumento en la sensibilidad, lo que implica reducir el rango de medición de desplazamiento para no dañar las rejillas en el anillo metálico.

3.2.2. Calibración de desplazamientos

Para realizar la calibración por desplazamientos se tomo la longitud de onda reflejada dada por el interrogador y ese valor se obtuvo para cada posición en un rango de $\pm 30mm$. Además, de realizar una calibración en un rango de $\pm 0.5mm$ para comprobar que el sensor es capaz de medir desplazamientos micrométricos, para tener una caracterización semejante a sensores antes propuestos [41].



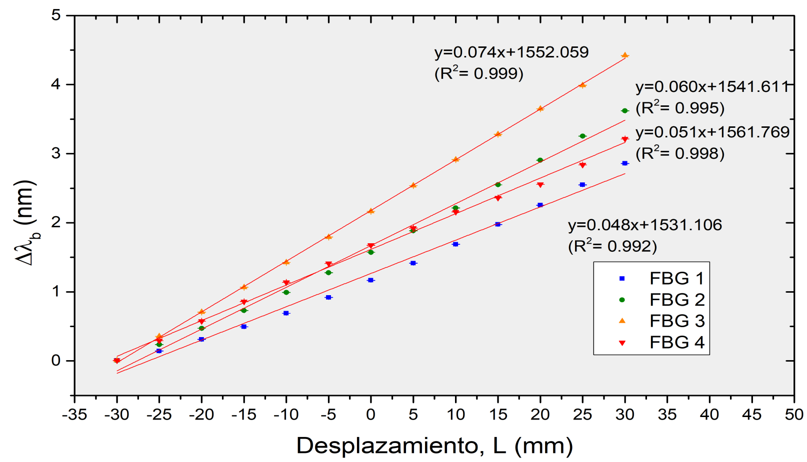
(a) Respuesta al desplazamiento milimétrico.



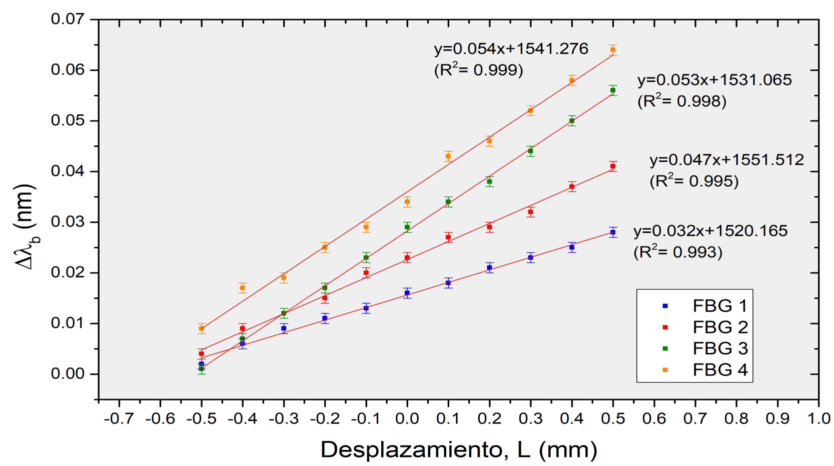
(b) Respuesta al desplazamiento micrométrico.

Fig. 3.15. Respuesta al desplazamiento en distintos intervalos de medición para el primer arreglo de rejillas A1.

En la figura 3.15 se pueden ver los gráficos para calibración por desplazamientos milimétricos y micrométricos, esto con la finalidad de caracterizar al sensor para ser utilizado en ambos rangos de medición.



(a) $\Delta\lambda_b$ para desplazamientos milimétricos.



(b) $\Delta\lambda_b$ para desplazamientos micrométricos.

Fig. 3.16. Corrimiento de la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_b$) en distintos intervalos de medición para el primer arreglo de rejillas.

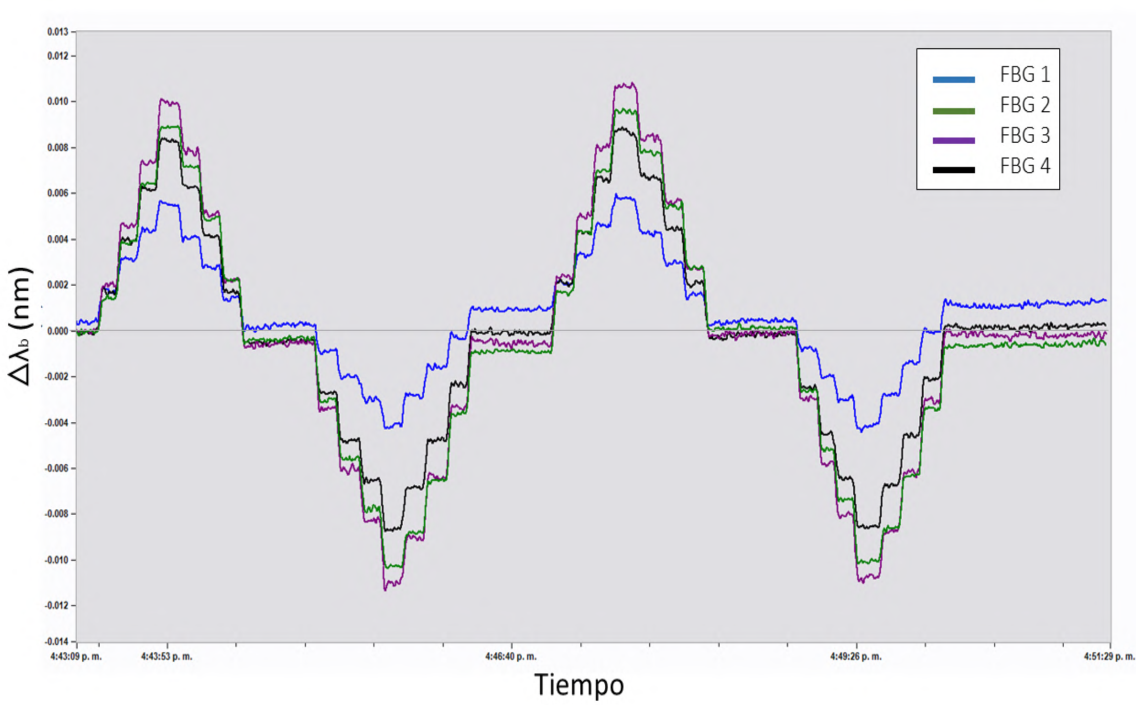
Para visualizar de mejor manera la respuesta del sensor ante desplazamientos se tomó en cuenta el corrimiento en la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_b$), para desplazamientos milimétricos y micrométricos, mostrados en la figura 3.16. A partir de los ajustes lineales de los datos experimentales para ambos rangos de medición se obtuvieron las sensibilidades de la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Sensibilidades al desplazamiento para distintos rangos de medición.

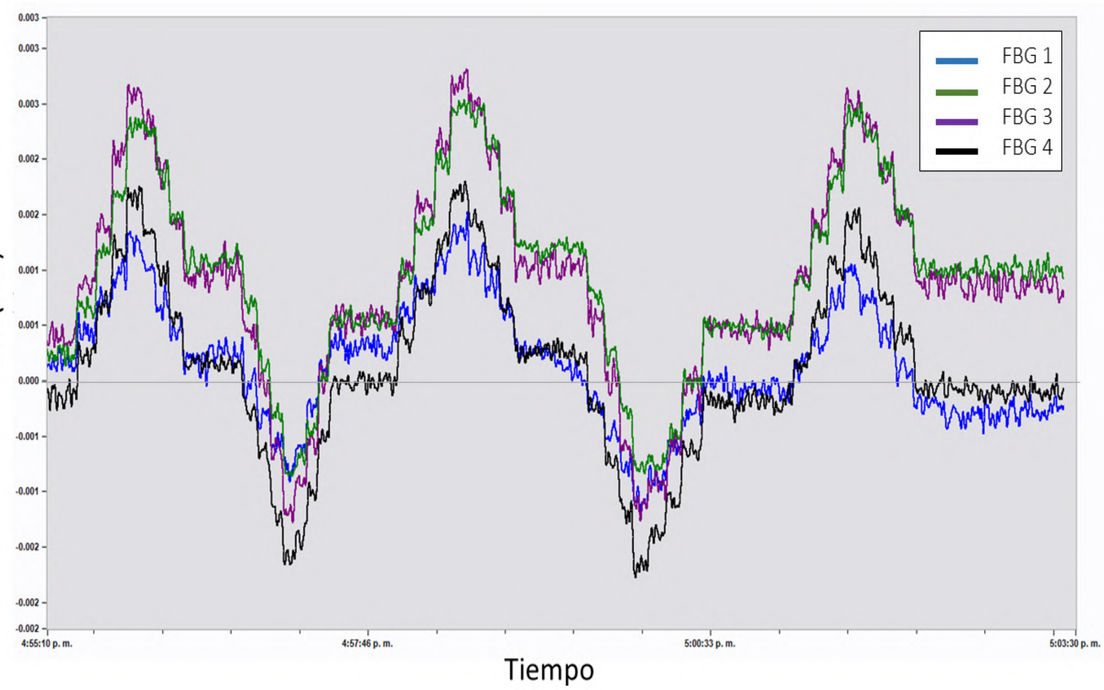
	Rango milimétrico	Rango micrométrico
Rejilla	Sensibilidad (pm/mm)	Sensibilidad (pm/mm)
FGB 1	30 ±2	32 ±2
FBG 2	51 ±4	53 ±2
FBG 3	53 ±4	54 ±2
FBG 4	45 ±3	47 ±2

Se puede observar que las sensibilidades para ambos rangos de operación son semejantes, solo con variaciones de 1 o 2 picometros, Fig. 3.15a y Fig. 3.15b, lo cual indica que este prototipo de sensor puede ser utilizado para medir en ambos rangos de desplazamientos conservando linealidad y sensibilidad semejantes.

Para observar el comportamiento del sensor de desplazamiento en el rango de micras se obtuvieron los siguientes gráficos en tiempo real al aplicar 4 pasos de desplazamientos, regresando a la posición original y desplazando nuevamente en dirección contraria, desplazamientos en pasos de 50μm y 20 μm:



(a) Variación de λ_b con pasos de desplazamiento de 50μm.



(b) Variación de λ_b con pasos de desplazamiento de 20μm.

Fig. 3.17. Variación de la longitud de onda con desplazamientos micrométricos tomados en tiempo real. Graficas tomadas con el interrogador OptiSystem Si-155.

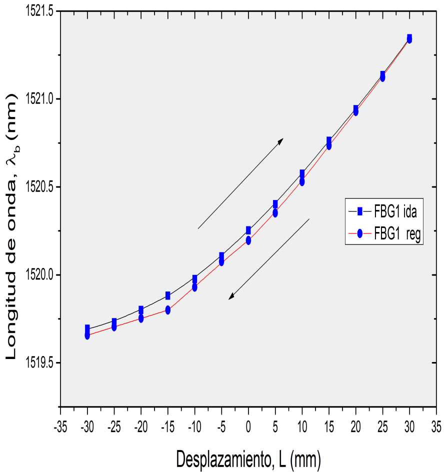
En la figura 3.17 la respuesta en la variación de la longitud de onda de Bragg $\Delta\lambda_b$ al aplicar desplazamientos micrométricos con el alineador motorizado, la respuesta en las rejillas $FBG2$ y $FBG3$ es mayor debido a que tienen mayor sensibilidad y esto se comprueba en estos gráficos tomados en tiempo real.

Por la sensibilidades de las cuatro rejillas al desplazamiento, Fig. 3.15 se puede observar que pueden ser distinguibles fácilmente desplazamientos de 50 micras en ambas direcciones, pero en el caso de desplazamientos de 20 micras estos ya no son tan distinguibles en las rejillas $FBG1$ y $FBG4$ que son las que tienen menor sensibilidad.

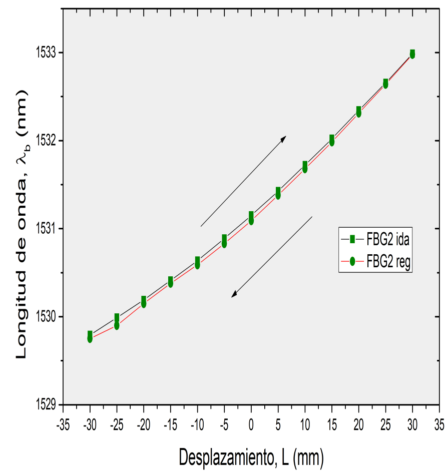
3.2.3. Histeresis y no-linealidad para el prototipo final

Para el prototipo final se hizo el análisis de histeresis y no-linealidad por desplazamiento de la misma manera que para el primer prototipo.

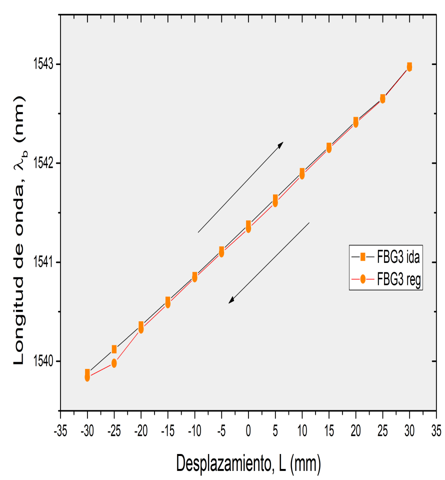
El error porcentual por histeresis para el prototipo final se realizó semejante al primer prototipo, tomando el cociente de la diferencia máxima de los valores de ida y regreso $(|\lambda_b^+ - \lambda_b^-|_{max})$ entre el rango de operación del sensor $(\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}})$, Fig. 3.17 y el error por no-linealidad para cada FBG se obtuvo con el residual máximo $(|\lambda_{b_{exp}} - \lambda_{b_{fit}}|_{max})$ de los datos de las curvas de calibración de la figura 3.15a.



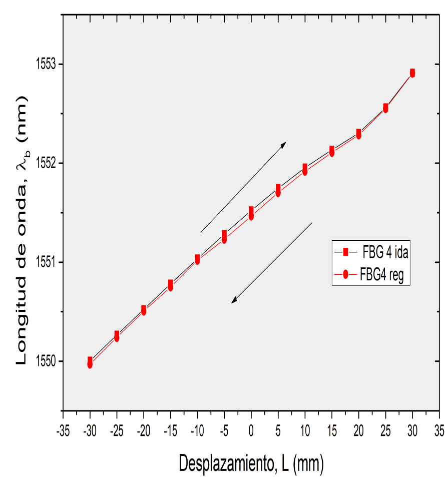
(a) Curva de histeresis para FBG 1.



(b) Curva de histeresis para FBG 2.



(c) Curva de histeresis para FBG 3.



(d) Curva de histeresis para FBG 4.

Fig. 3.18. Curvas de histeresis para sensibilidad al desplazamiento para el arreglo de rejillas del prototipo final.

Los resultados de la tabla 3.9 muestran una reducción significativa de la histeresis del prototipo final del sensor de desplazamiento debido a las modificaciones realizadas a la estructura plástica del sensor y que los datos resultantes fueron adquiridos con el dispositivo interrogador que presenta mayor resolución espectral.

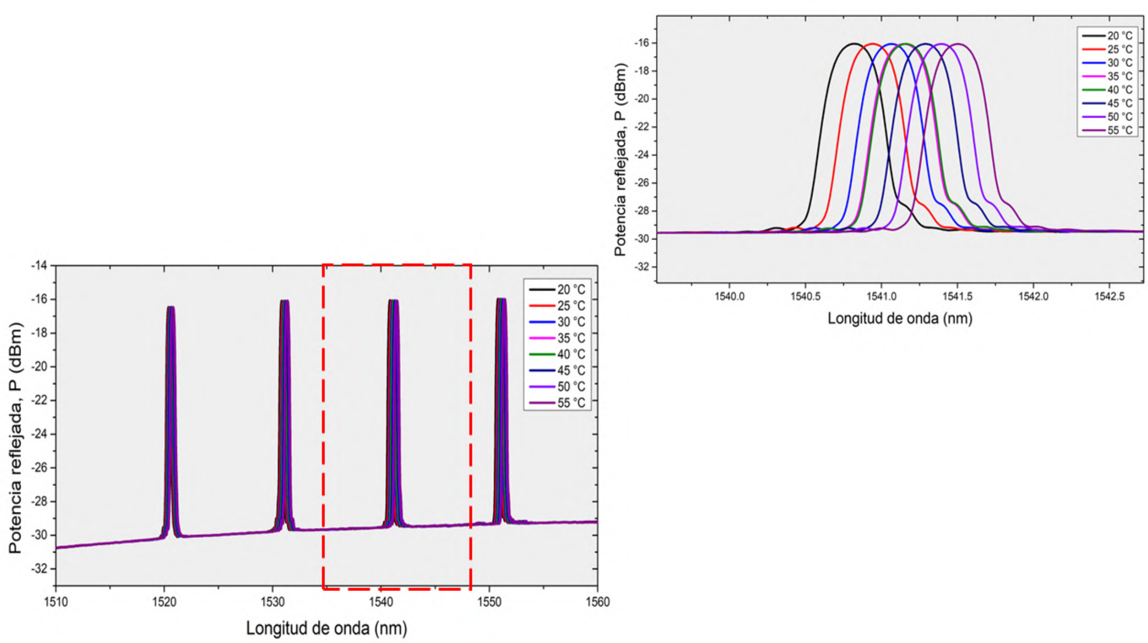
Tabla 3.9. Estimación del error por desplazamientos para el prototipo final.

$\Delta\lambda_b$				Error %		
Rejilla	$\lvert\lambda_b^+ - \lambda_b^-\rvert_{max}$	$\lvert\lambda_{b_{exp}} - \lambda_{b_{fit}}\rvert_{max}$	$\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}$	$e_{hist_{\%}}$	$e_{lin_{\%}}$	e_{RSS}
FBG 1	0.057 nm	0.184 nm	1.688 nm	3.37 %	10.90 %	11.40 %
FBG 2	0.060 nm	0.149 nm	3.236 nm	1.85 %	4.60 %	4.95 %
FBG 3	0.040 nm	0.063 nm	3.135 nm	1.27 %	2.00 %	2.36 %
FBG 4	0.057 nm	0.091 nm	2.940 nm	1.93 %	3.09 %	3.64 %

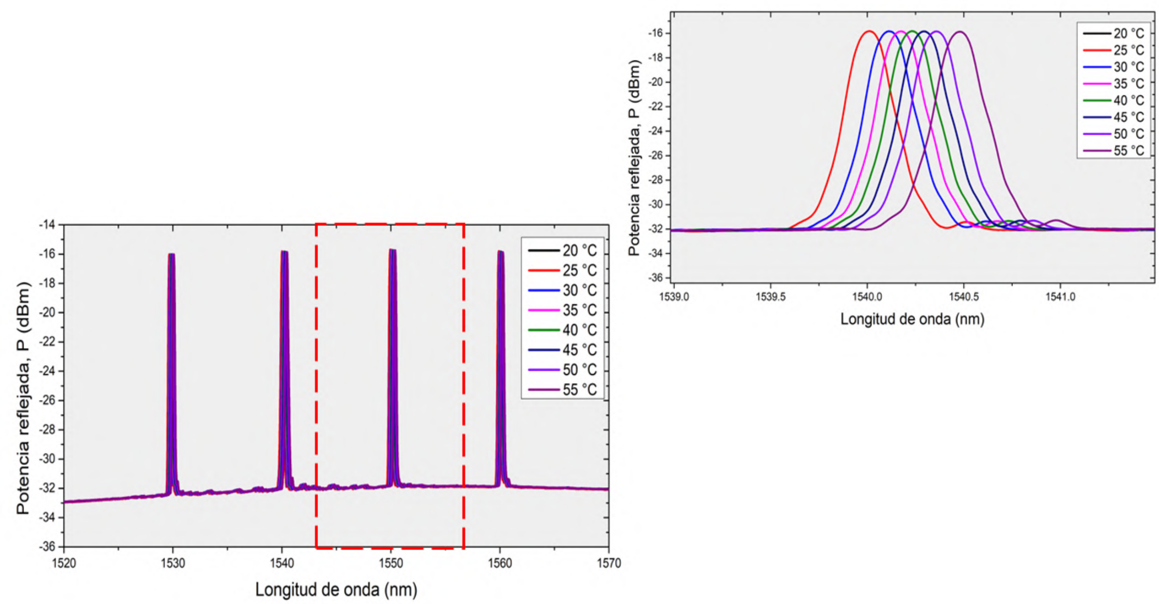
3.2.4. Análisis por variación de temperatura

Para la calibración por variación de temperatura en el prototipo final se tomaron los espectros de potencia reflejada con el Interrogador de ambos arreglos de rejillas $A1$ y $A2$, Fig. 3.18, variando la temperatura de ambos aros hasta llegar a los 55^oC. Se tomaron los picos de la longitud de Bragg λ_b que son determinados por el software del interrogador.

A partir de estos valores se realizó nuevamente la calibración por temperatura de los dos arreglos de rejillas para determinar la contribución a el corrimiento de la longitud Bragg $\Delta\lambda_b$. Debido a la resolución del interrogador utilizado para adquirir los espectros de potencia reflejada ($\sim 1pm$) se pudo comprobar que las rejillas del arreglo $A2$ tienen menor ancho espectral que el arreglo $A1$, además de que se obtuvieron factores de determinación lineal (R^2) mas cercanos a 1, Fig. 3,19, con los datos tomados con el sistema interrogador.

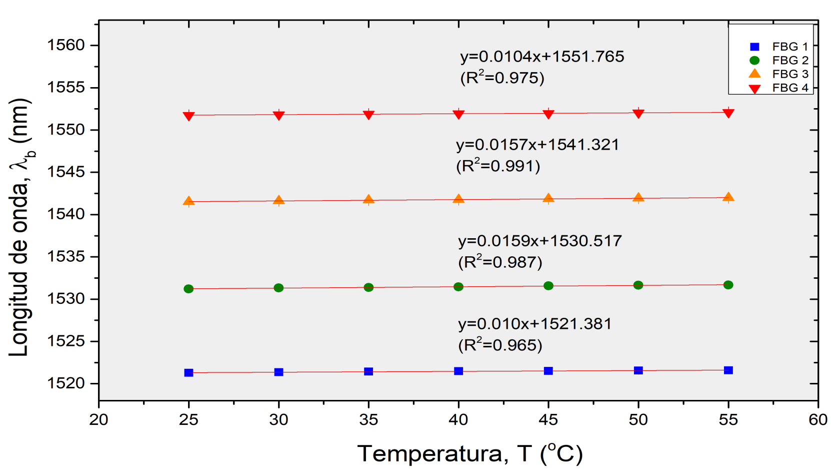


(a) Primer arreglo (A1) de rejillas Bragg. Inserto en el rango de 1540 a 1542 nm.



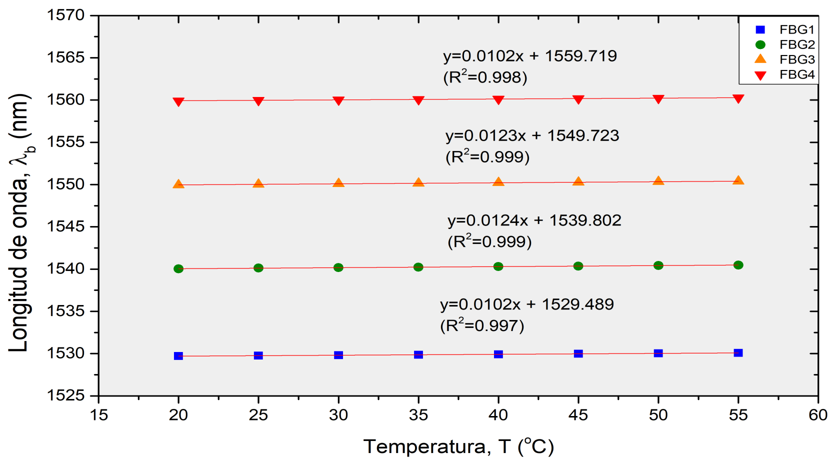
(b) Segundo arreglo (A2) de rejillas Bragg. Inserto en el rango de 1540 a 1541 nm.

Fig. 3.19. Espectro de potencia reflejada por variación de temperatura.



(a) Primer arreglo de rejillas $A1$.

En la figura 3.20 se determinó la respuesta del prototipo final del sensor de desplazamiento por temperatura de ambos arreglos de rejillas Bragg, con los datos obtenidos por el sistema interrogador. En los gráficos se puede observar que la respuesta ante cambios de temperatura se mantiene cercana a los valores evaluados para el primer prototipo, aumentando linealidad y conservando la característica de mayor respuesta para las rejillas $FBG2$ y $FBG3$.



(b) Segundo arreglo de rejillas A2

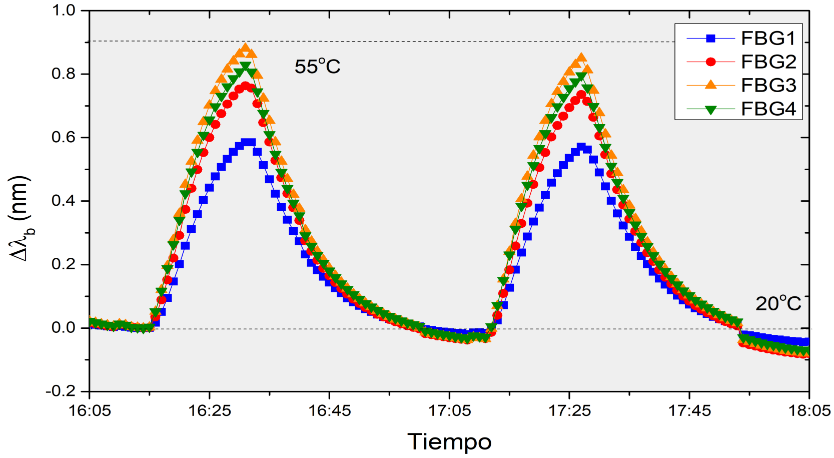
Fig. 3.20. Respuesta a la temperatura para ambos arreglos de rejillas Bragg para el prototipo final.

Para ambos gráficos de la figura 3.20, se obtuvieron las sensibilidades a la temperatura con las pendientes de los ajustes lineales de los datos experimentales, mostrados en la tabla 3.10

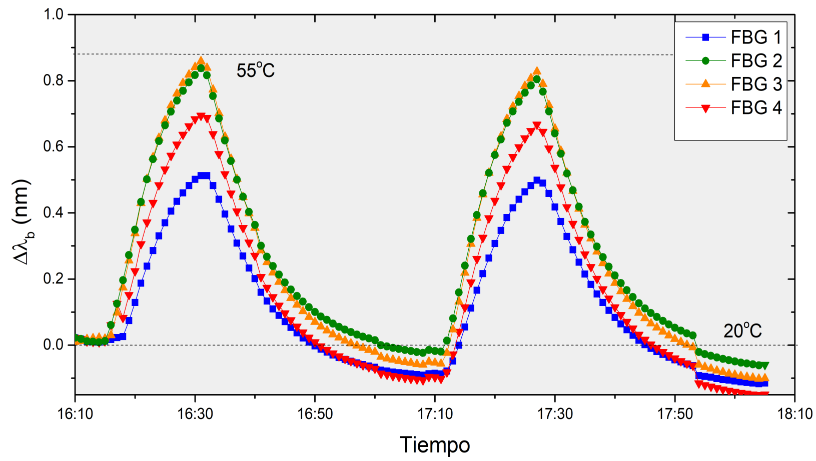
Tabla 3.10. Sensibilidades a la temperatura para los arreglos de rejillas A1 y A2.

	Arreglo $A1$	Arreglo $A2$
Rejilla	Sensibilidad (pm/^oC)	Sensibilidad (pm/^oC)
FGB 1	10.4 ±2.2	10.2 ±1.9
FBG 2	15.9 ±4.3	12.4 ±2.4
FBG 3	15.7 ±4.1	12.3 ±2.2
FBG 4	10.4 ±3.7	10.2 ±1.8

Para hacer un análisis mas visual sobre el comportamiento de la variación de la longitud de onda de Bragg $\Delta\lambda_b$ se tomó en tiempo real la variación de la longitud de onda de las cuatro rejillas al aumento y descenso de la temperatura, mediante un proceso de calentamiento y enfriamiento con un arreglo similar al utilizado para variar la temperatura del anillo metálico con las FBG's para el primer prototipo. De igual manera se elevó la temperatura desde 20^oC hasta 55^oC para posteriormente enfriar el arreglo y cuando este llegue a temperatura ambiente volver a calentar para observar el cambio de λ_b en un ciclo de calentamiento y enfriamiento.



(a) Variación de la longitud de onda de Bragg λ_b para el primer arreglo $A1$.



(b) Variación de la longitud de onda de Bragg λ_b para el segundo arreglo $A2$.

Fig. 3.21. Variación de la longitud de onda por cambio de temperatura para ambos arreglos de rejillas Bragg.

En la figura 3.21 se muestran los gráficos de $\Delta\lambda_b$ al aumentar la temperatura y enfriar hasta llegar nuevamente a temperatura ambiente para el primer arreglo $A1$, Fig. 3.20a, y para el segundo arreglo $A2$, Fig. 3.20b.

Donde de igual manera puede observarse el fenómeno de histeresis por enfriamiento y calentamiento de las rejillas. Similarmente, tomando los datos de la máxima diferencia para un mismo valor de temperatura y el rango tenemos la siguiente tabla para el error por histeresis de $A1$ por variación de temperatura:

Tabla 3.11. Estimación del error por variación de temperatura para el primer arreglo (A1).

$\Delta\lambda_b$				Error %		
Rejilla	$\lvert\lambda_{b_{ht}} - \lambda_{b_{Cl}}\rvert_{max}$	$\lvert\lambda_{b_{exp}} - \lambda_{b_{fit}}\rvert_{max}$	$\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}$	$e_{hist_{\%}}$	$e_{lin_{\%}}$	e_{RSS}
FBG 1	0.031 ± 0.003 nm	0.019 ± 0.002 nm	0.571 ± 0.004 nm	5.42 %	3.32 %	6.35 %
FBG 2	0.044 ± 0.004 nm	0.027 ± 0.003 nm	0.735 ± 0.005 nm	5.98 %	3.67 %	7.01 %
FBG 3	0.041 ± 0.004 nm	0.035 ± 0.004 nm	0.850 ± 0.006 nm	4.82 %	4.11 %	6.33 %
FBG 4	0.021 ± 0.003 nm	0.016 ± 0.002 nm	0.795 ± 0.005 nm	2.64 %	2.01 %	3.31 %

Y para el arreglo $A2$:

Tabla 3.12. Estimación del error por variación de temperatura para el segundo arreglo (A2).

$\Delta\lambda_b$				Error %		
Rejilla	$\lvert\lambda_{b_{ht}} - \lambda_{b_{Cl}}\rvert_{max}$	$\lvert\lambda_{b_{exp}} - \lambda_{b_{fit}}\rvert_{max}$	$\lambda_{b_{final}} - \lambda_{b_{inicial}}$	$e_{hist_{\%}}$	$e_{lin_{\%}}$	e_{RSS}
FBG 1	0.103 ± 0.006 nm	0.012 ± 0.002 nm	0.623 ± 0.009 nm	16.53 %	1.92 %	16.64 %
FBG 2	0.034 ± 0.004 nm	0.015 ± 0.003 nm	0.855 ± 0.010 nm	3.97 %	1.75 %	4.33 %
FBG 3	0.068 ± 0.007 nm	0.026 ± 0.005 nm	0.976 ± 0.011 nm	6.96 %	2.66 %	7.45 %
FBG 4	0.117 ± 0.010 nm	0.021 ± 0.004 nm	0.787 ± 0.008 nm	14.86 %	2.56 %	15.07 %

3.2.5. Resultados con compensación de temperatura

A partir de los resultados anteriores se puede observar la influencia de los cambios de temperatura sobre las rejillas Bragg en fibra óptica, lo que ocasiona errores a la hora de realizar mediciones de desplazamientos en escalas de pocos milímetros y micrométricas. Es por esta razón que se utiliza el método de compensación por temperatura para minimizar lo mas posible estos errores por cambios en la temperatura.

Para estos resultados se tomo el espectro de potencia reflejada del segundo arreglo ($A2$) de rejillas Bragg conectadas en serie con la rejilla de compensación por temperatura FBG_{cT}, como puede verse en la siguiente figura:

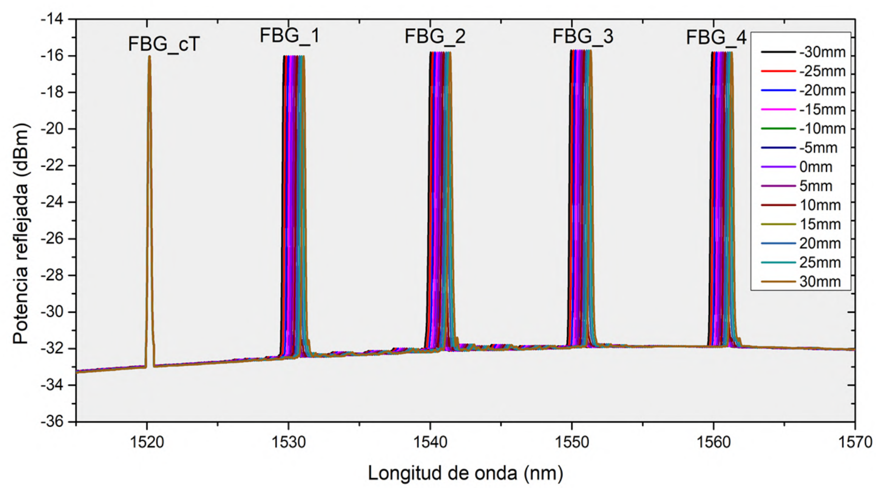
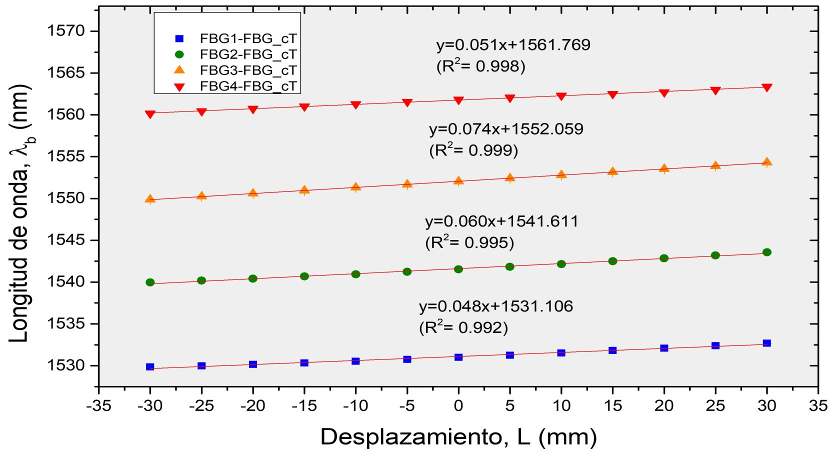


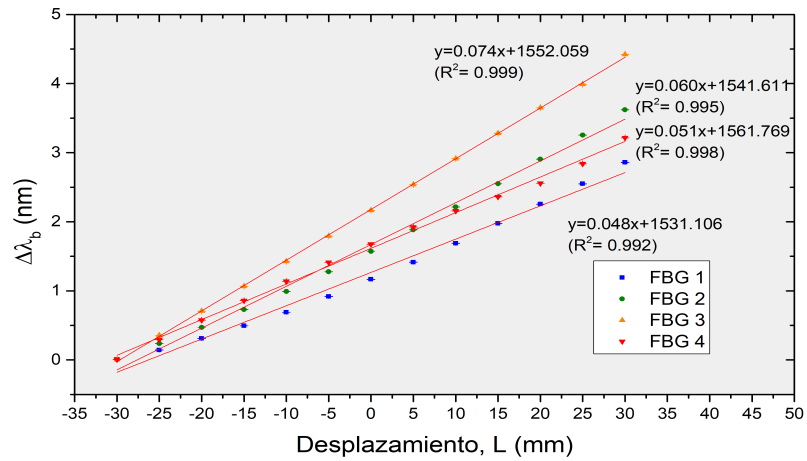
Fig. 3.22. Espectro de potencia reflejada del segundo arreglo de rejillas Bragg con compensación de temperatura

Puede verse en el gráfico de la figura 3.21 que al aplicar desplazamientos en un intervalo de ± 30 mm únicamente las rejillas de sensado son las que sufren un corrimiento en la longitud de onda reflejada λ_b, mientras que la rejilla de compensación FBG_{cT} se mantiene constante ante deformaciones mecánicas.

Para obtener la sensibilidad al desplazamiento del arreglo de rejillas $A2$ utilizó la resta de la variación de la longitud de onda de Bragg λ_{b_s} de las rejillas de sensado ($FBG1, FBG2, FBG3$ y $FBG4$) con la rejilla de compensación por temperatura (FBG_{cT}), con la finalidad de obtener únicamente el cambio en λ_b por deformaciones mecánicas debido a la aplicación de desplazamientos bidireccionales.



(a) Respuesta de la longitud de onda de Bragg λ_b.



(b) $\Delta\lambda_b$ para el segundo arreglo $A2$.

Fig. 3.23. Respuesta de λ_b por desplazamientos con compensación de temperatura.

En la figura 3.23 se observa la respuesta de cada rejilla de sensado restando la de compensación para obtener la variación de λ_b debido únicamente a deformaciones mecánicas. En este gráfico se puede observar que se mantiene la linealidad de los datos experimentales de las rejillas, así como un aumento en la sensibilidad al mantener una reducción en el rango de medición de desplazamientos ($\pm 30mm$), mostrado en la tabla 3.13, esto debido a la reducción en el radio de curvatura del arreglo de rejillas (R=2.7 cm).

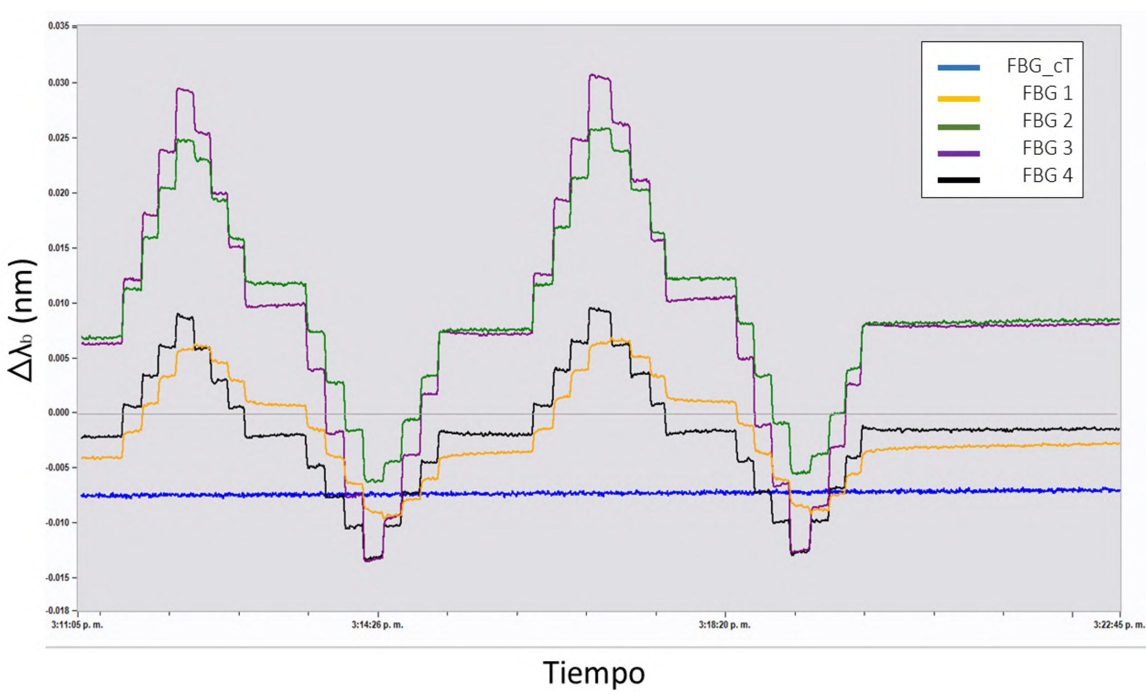
De igual forma que se realizó para el arreglo $A1$, se aplicaron desplazamientos micrométricos con el nivelador motorizado en pasos de $50\mu m$ y 20 μm, esto con la finalidad de ver la respuesta del sensor ya compensado para desplazamientos micrométricos y hacer la comparación de resultados midiendo únicamente con las FBG's de sensado y utilizando la técnica de compensación por temperatura.

Tabla 3.13. Sensibilidades al desplazamiento para las rejillas en el prototipo final.

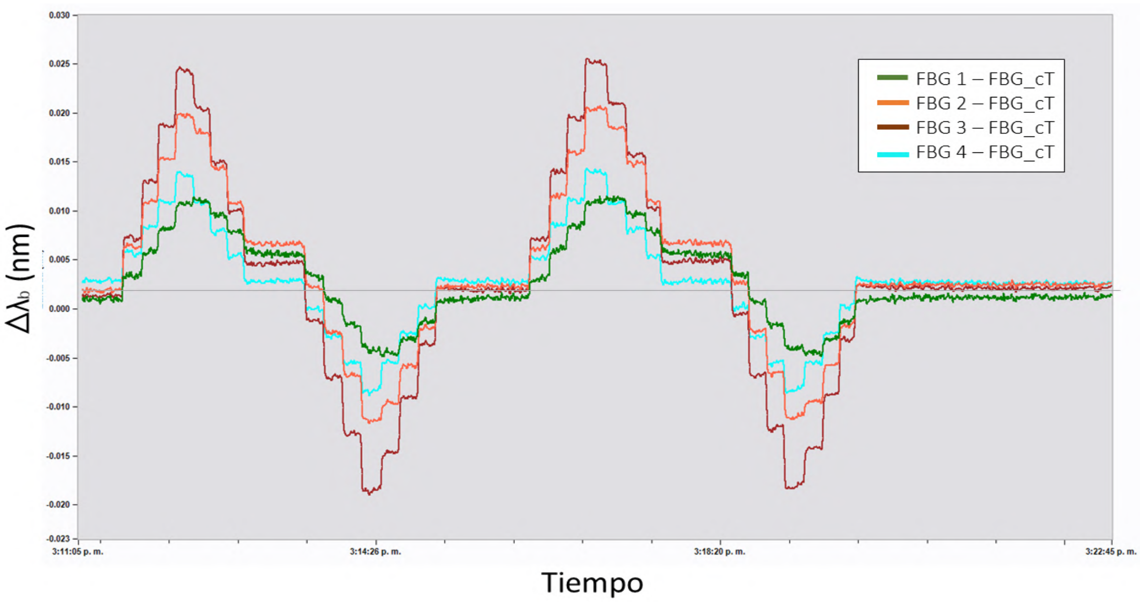
	Arreglo $A2$
Rejilla	Sensibilidad (pm/mm)
FGB 1	48 ± 2
FBG 2	60 ± 5
FBG 3	74 ± 8
FBG 4	51 ± 3

En las gráficas de las figuras 3.24 y 3.25 se puede ver la reacción del sensor de desplazamiento antes desplazamientos micrométricos. En la figura 3.24a se observa las variaciones de la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_b$) únicamente tomando las rejillas de sensado. La rejilla FBG_cT que se muestra con la linea azul, se aprecia como se mantiene constante ante los desplazamientos, pero presenta una ligera tendencia de aumento de $\Delta\lambda_b$ por la variación de la temperatura ambiente donde fue colocado el sensor.

En la figura 3.24b se muestra $\Delta\lambda_b$ para la técnica de compensación por temperatura, en la cual se observa la respuesta de cada FBG's compensada con FBG_{cT}, mostrando mayor sensibilidad para $FBG2$ y $FBG3$ compensadas, acorde a lo que se mostró en la gráfica de sensibilidad de la figura 3.23.

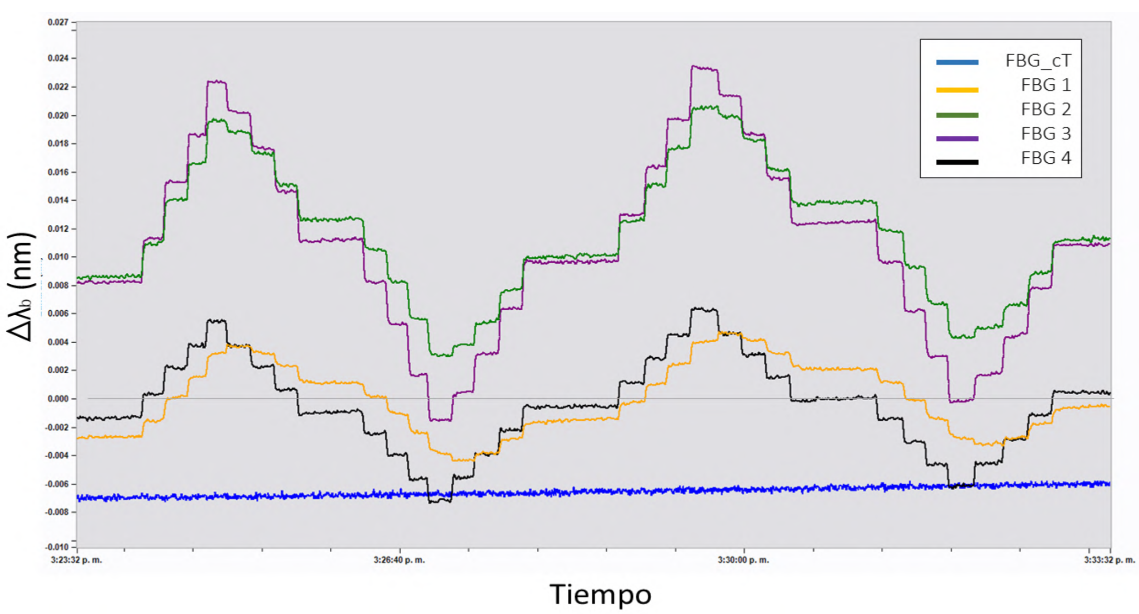


(a) Sin compensación de temperatura.



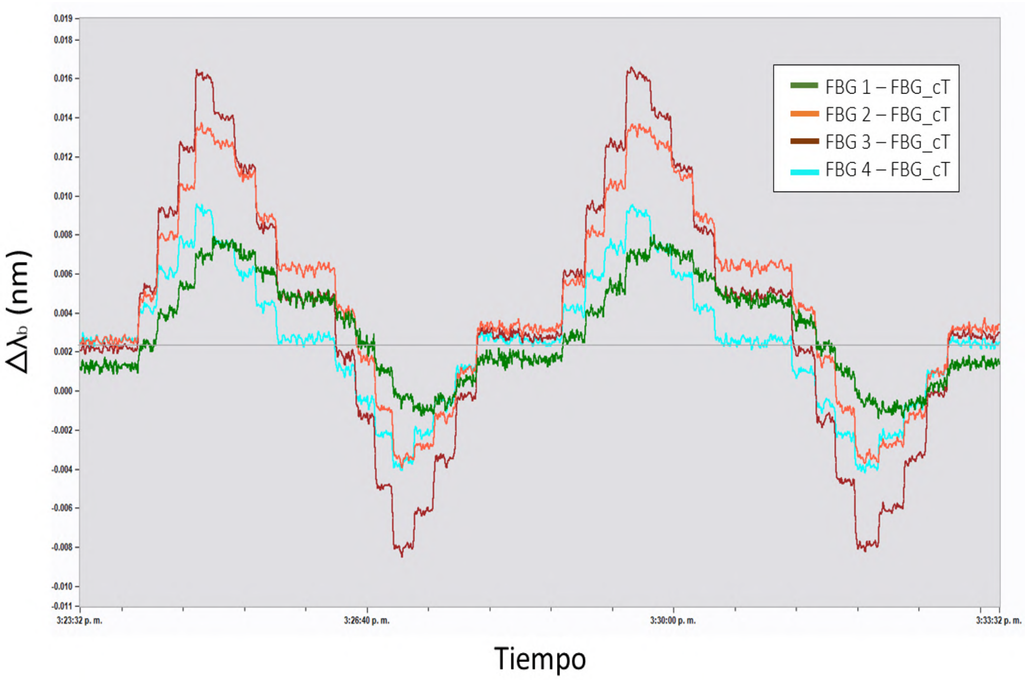
(b) Con compensación de temperatura.

Fig. 3.24. Variación de la longitud de onda con desplazamientos micrométricos de 50μm aplicados. Gráficos tomados con el interrogador OptiSystem Si-155.



(a) Sin compensación de temperatura.

Para la figura 3.25 se muestra la misma comparación con desplazamientos de 20μm, donde de igual manera se observa la tendencia que sufren las rejillas de sensado y la de compensación al aumentar ligeramente la temperatura del sensor, Fig. 3.25a, y cómo este aumento de temperatura no se ve reflejado en los desplazamientos medidos con las FBG's compensadas. Mostrando que $FBG2$ y $FBG3$ pueden medir desplazamientos de hasta 20 micras.

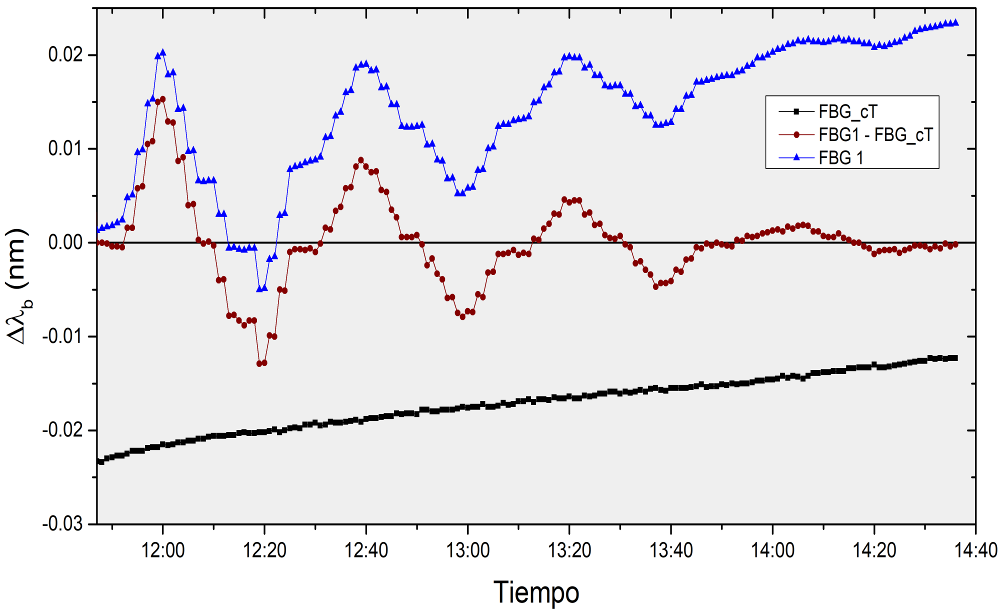


(b) Con compensación de temperatura.

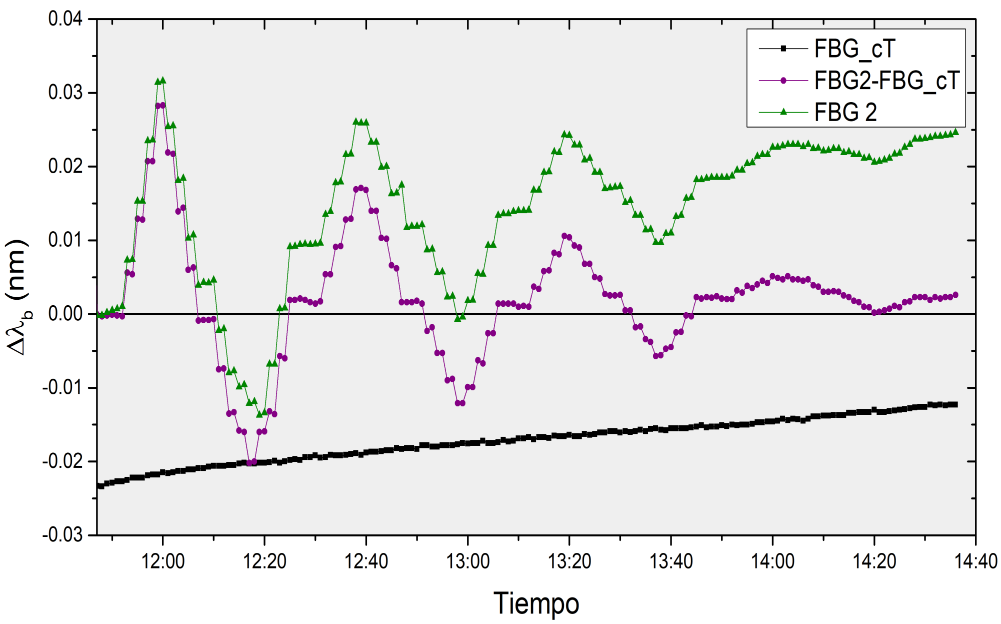
Fig. 3.25. Variación de la longitud de onda con desplazamientos micrométricos de 20µm aplicados. Gráficos tomados con el interrogador OptiSystem Si-155.

En las gráficas de la figura 3.26 se puede observar la comparación uno a uno de la FBG de sensado con la FBG compensada con un aumento mas significativo de temperatura. En las cuales se muestra como para desplazamientos micrométricos en presencia de aumento de temperatura la rejilla FBG de sensado sufre un $\Delta\lambda_b$ adicional en debido al cambio de temperatura, además de los cambios que sufra por deformaciones mecánicas, en este caso por desplazamientos, lo cual no ocurre con las FBG's ya compensadas.

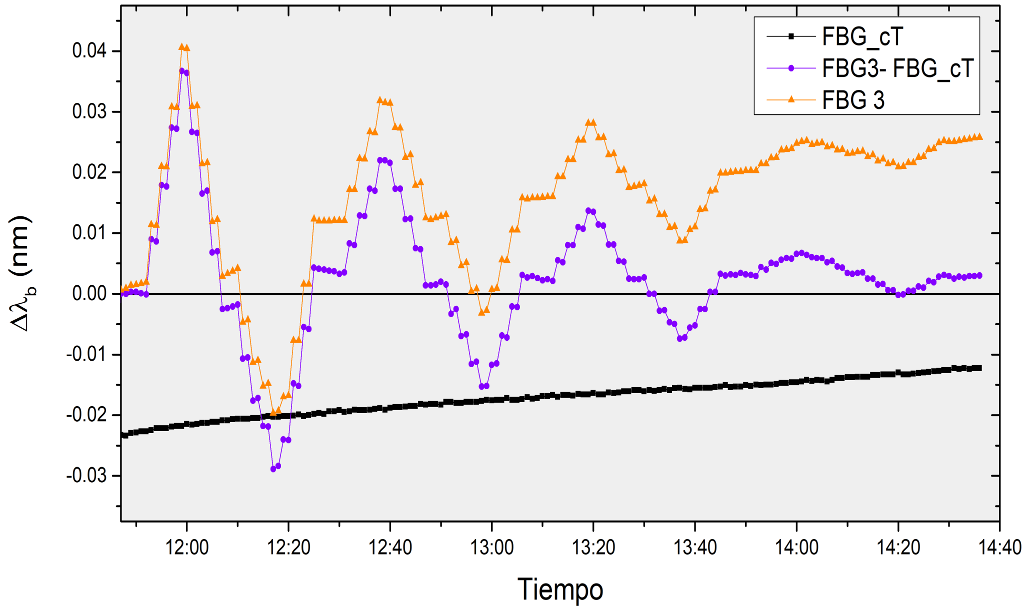
A pesar de la compensación de temperatura se puede observar que sufren un cambio por temperatura, por esta razón se utilizó un factor de corrección que multiplicado por $\Delta\lambda_{b_{cT}}$ fuera proporcional al de las rejillas de sensado y de esta manera al evaluar la resta por contribuciones de temperatura esta fuera lo mas cercana a cero.



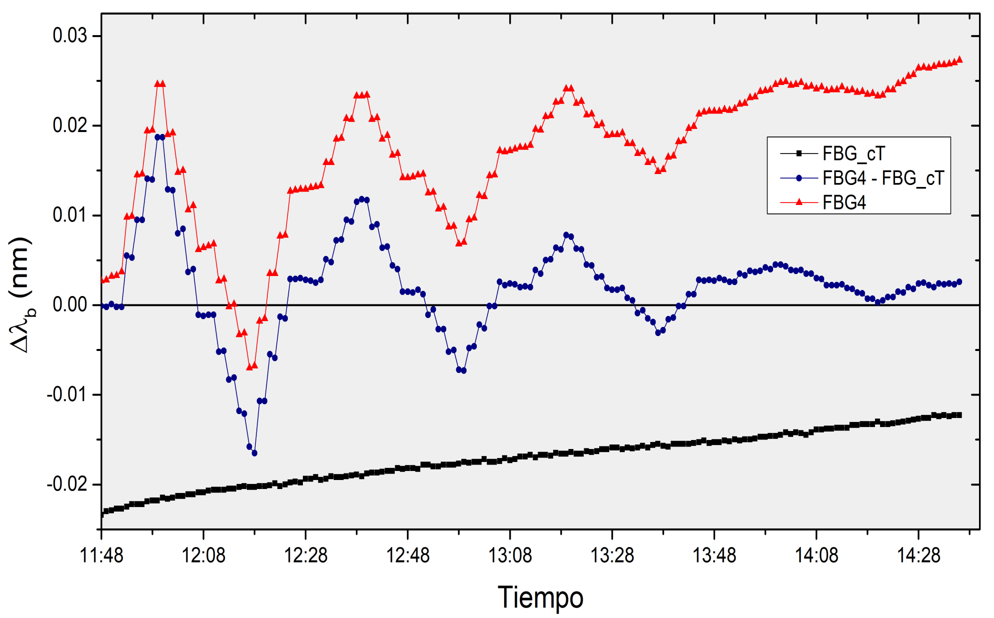
(a) Rejilla $FBG1$ de sensado y compensada en temperatura.



(b) Rejilla $FBG2$ de sensado y compensada en temperatura.



(c) *Rejilla FBG3 de sensado y compensada en temperatura.*



(d) *Rejilla FBG4 de sensado y compensada en temperatura.*

Fig. 3.26. Respuesta de las FBG's de sensado y compensadas aplicando intervalos de desplazamientos de 50, 30, 20 y 10 μm.

3.2.6. Factor de corrección

Para variaciones de temperatura graduales el sensor de desplazamiento con compensación de temperatura presenta una buena respuesta, reduciendo las contribuciones por variación de esta temperatura. Pero en el caso de que las variaciones sean de mayor rapidez, la respuesta de la rejilla de compensación FBG_{cT} no es igual al de las FBG de sensado.

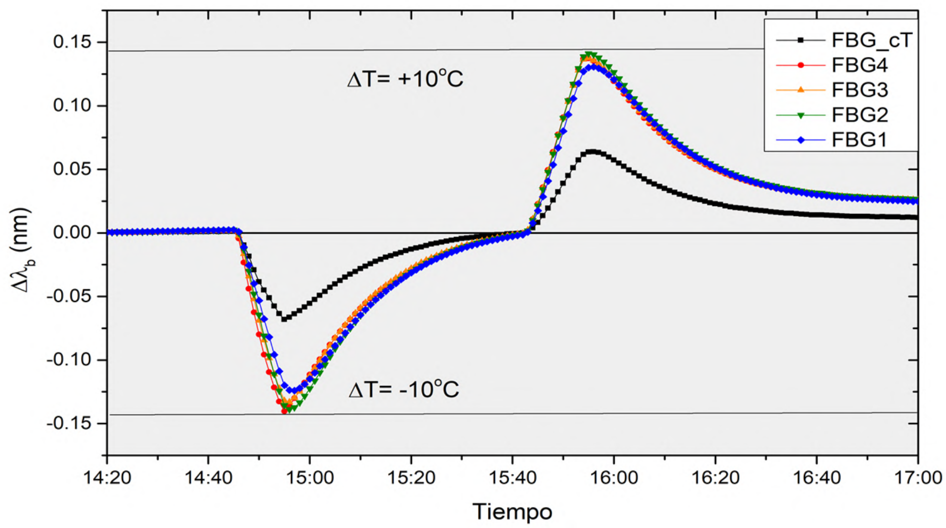


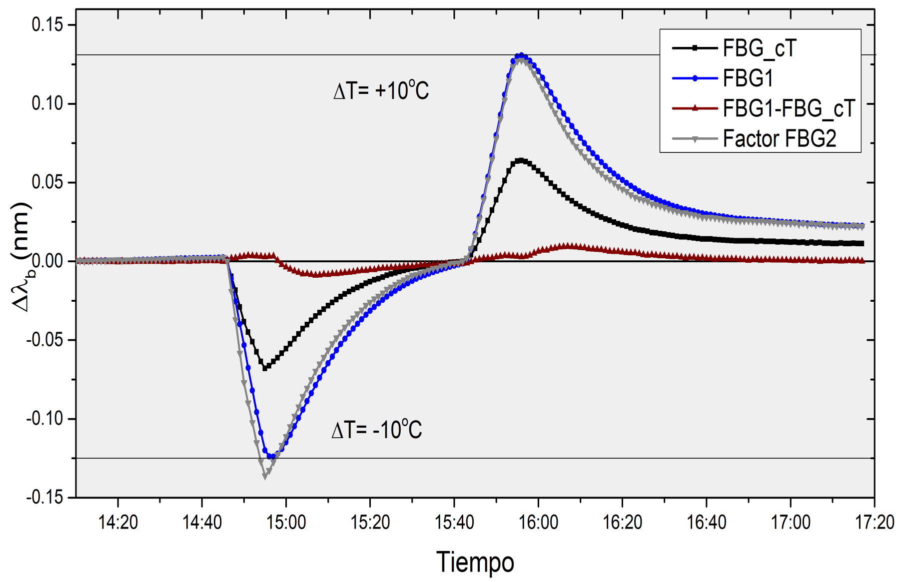
Fig. 3.27. Variación de la longitud de onda de Bragg $\Delta\lambda_b$ de las FBG's de sensado y la rejilla de compensación FBG_{cT}.

En la figura 3.26 se muestra que $\Delta\lambda_b$ de la rejilla de compensación FBG_{cT} no es igual al de las rejillas de sensado, esto implica que a incrementos rápidos de temperatura la compensación de temperatura presentará discrepancias con los valores de desplazamientos a medir, ya que al no presentar la misma la misma razón de cambio $(\Delta\lambda_b/\Delta t)$, la resta de las contribuciones por temperatura no será cercana a 0.

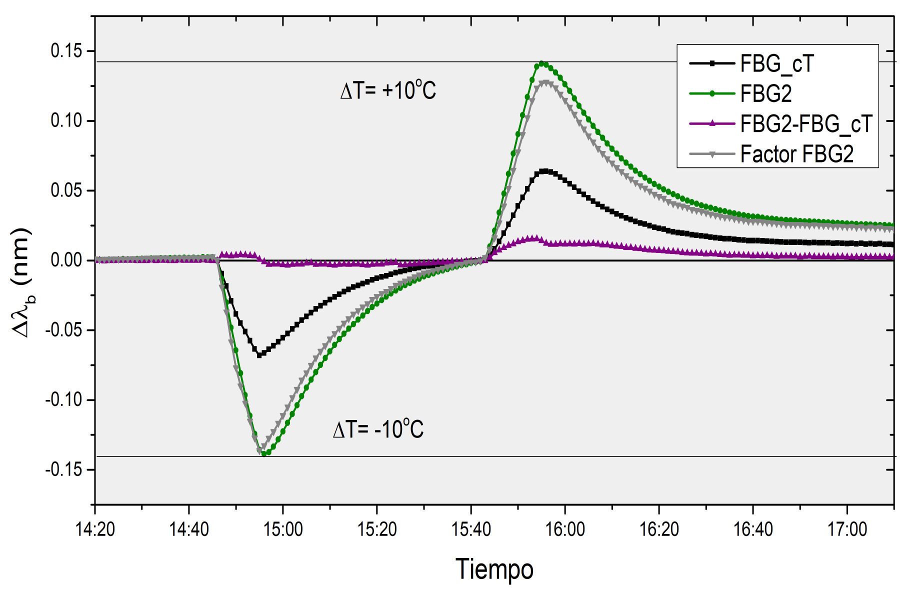
Debido a este comportamiento diferente en la rejillas de sensado y la de compensación se opto por introducir un factor dependiente de FBG_{cT} que aumente la razón de cambio para que tenga la misma contribución de cambio de λ_b que las FBG's de sensado por variaciones de temperatura. Por lo que la ecuación de compensación por temperatura, Ec. 2.26, agregando el factor de corrección queda de la forma:

$$\epsilon = \frac{1}{(1-p_e)}\left(\frac{\Delta\lambda_{b_s}}{\lambda_{b_s}} - \frac{\Delta\lambda_{b_{cT}}}{\lambda_{b_{cT}}}\left(\frac{\Delta\lambda_{b_{cT}}}{\lambda_{b_{cT_{min}}}}\right)\right) \tag{3.6}$$

Donde $\lambda_{b_{cT_{min}}}$ es el valor de la longitud de onda de Bragg de la rejilla de compensación a una temperatura mínima de operación. De esta forma el cociente $\Delta\lambda_{b_{cT}}/\lambda_{b_{cT_{min}}}$ será mayor a 1, por lo tanto incrementará la razón de crecimiento de FBG_{cT} para que sea semejante a las FBG de sensado.

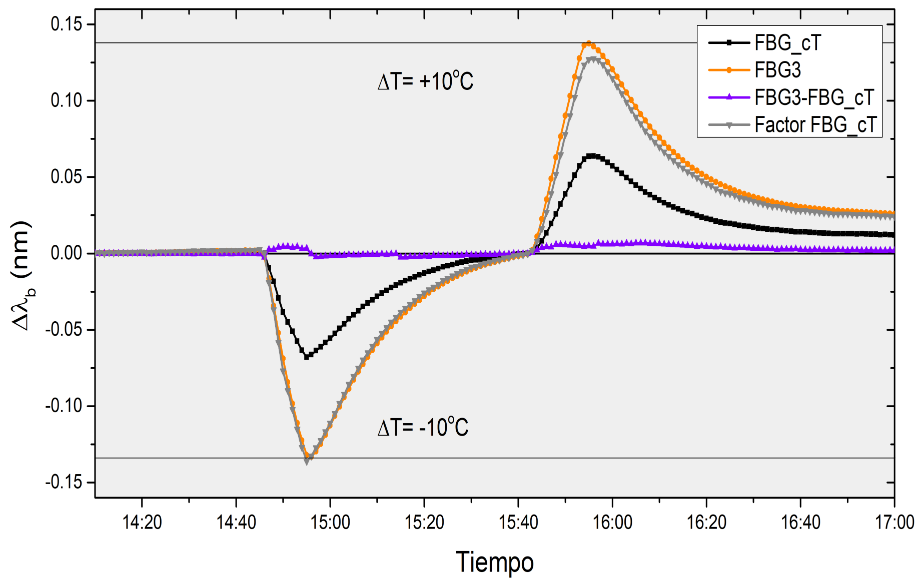


(a) $\Delta\lambda_b$ para $FBG1$ de sensado, de compensación FBG_{cT} y resta con factor de corrección.

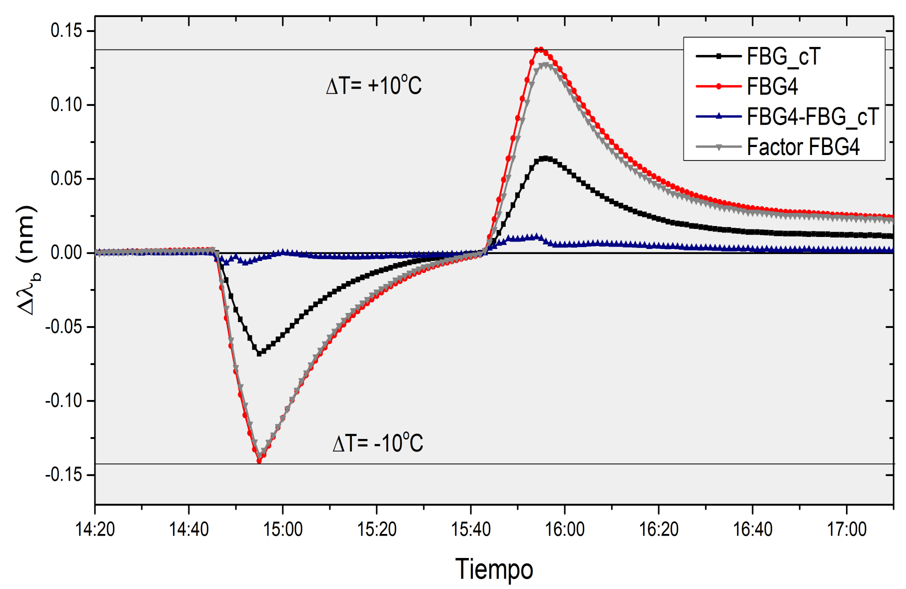


(b) $\Delta\lambda_b$ para $FBG2$ de sensado, de compensación FBG_{cT} y resta con factor de corrección.

Este factor se ajusta de acuerdo a la temperatura mínima de operación, en este caso, la temperatura mínima a la que se llego enfriando el sensor fue de 6^oC, a esta temperatura la longitud de onda de Bragg de la rejilla de compensación es $\lambda_{b_{cT_{min}}} = 1519.650nm$.



(c) $\Delta\lambda_b$ para $FBG3$ de sensado, de compensación FBG_{cT} y resta con factor de corrección.



(d) $\Delta\lambda_b$ para $FBG4$ de sensado, de compensación FBG_{cT} y resta con factor de corrección.

Fig. 3.28. Compensación de temperatura con FBG_{cT} con su respectivo factor de corrección,

En los gráficos de la figura 3.28 se muestra el cambio en la longitud de onda de Bragg $\Delta\lambda_b$ para las rejillas de sensado, la de compensación de temperatura (FBG_{cT}) y la de compensación multiplicada por el factor de corrección y la resta de ambas, durante un proceso de enfriamiento ($\Delta T = -10^oC$) y calentamiento ($\Delta T = +10C^o$)

de la temperatura ambiente del sensor.

Puede verse que al aumento y descenso de la temperatura de todo el sensor el cambio en la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_b$) es distinta a la de la rejilla FBG_{cT}, pero cuando es tomada con su respectivo factor de corrección, esta se ajusta para tener variaciones semejantes a las rejillas de sensado. Por consiguiente la resta de ambas en condiciones de cambios rápidos de temperatura es muy cercana a 0. De esta manera se logra realizar una mejor compensación para tener un sensor que mida de una manera mas precisa desplazamientos aun con variaciones rápidas de temperatura.

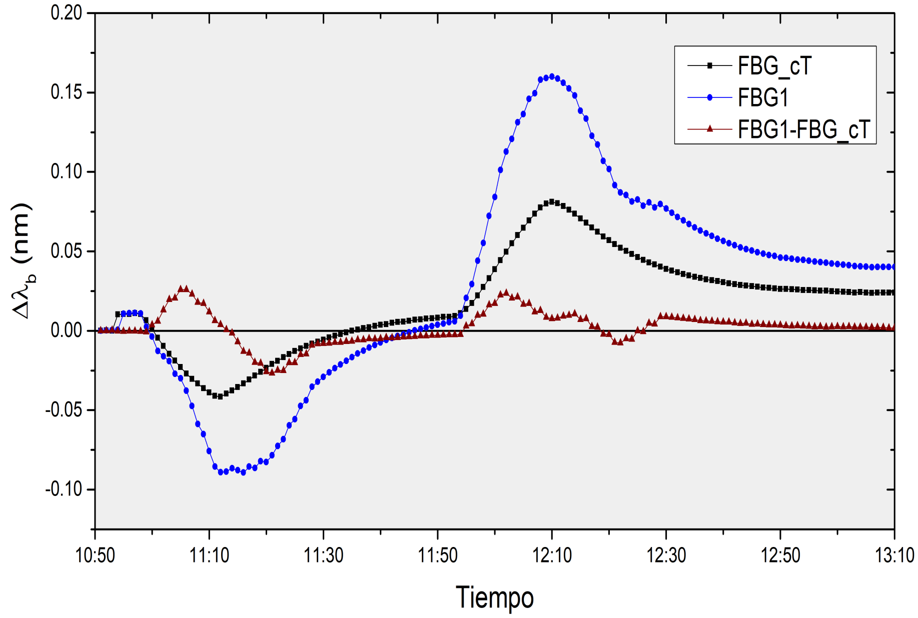
Para estimar la contribución máxima asociada a este factor de corrección, ya que en los gráficos de la figura 3.27 se puede observar que $\Delta\lambda_b$ para las FBG's de sensado menos la FBG_{cT} corregida no es completamente 0, sino que hay pequeños incrementos al momento de enfriar o calentar el sensor, se toma el máximo valor de la señal compensada aplicando el factor de corrección, y dividiendo entre el incremento de temperatura, que se sabe fue de 10 C^o por arriba y por debajo de la temperatura ambiente registrada al momento de realizar las mediciones ($T_{amb} = 18^oC$) se tiene la siguiente tabla:

Tabla 3.14. Contribución por temperatura para el prototipo final del sensor de desplazamiento.

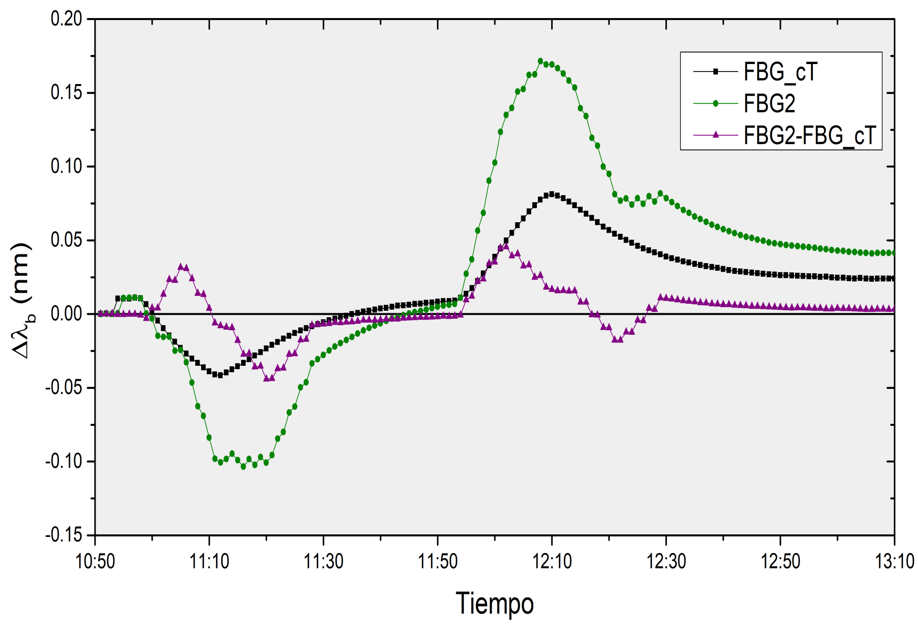
Rejilla	$(\Delta\lambda_{b_{comp}})_{max}$	ΔT	$\Delta\lambda_b/\Delta T$
FBG 1	0.009 nm	$\pm10^oC$	$\pm0.9pm/^oC$
FBG 2	0.011 nm	$\pm10^oC$	$\pm1.1pm/^oC$
FBG 3	0.085 nm	$\pm10^oC$	$\pm0.85pm/^oC$
FBG 4	0.012 nm	$\pm10^oC$	$\pm1.2pm/^oC$

En la tabla 3.14 se muestran las nuevas contribuciones por aumento o descenso de la temperatura ambiente en la que se calibre el sensor de desplazamiento. Con este factor de corrección se logra reducir en gran medida los cambios de la longitud de onda de Bragg λ_b.

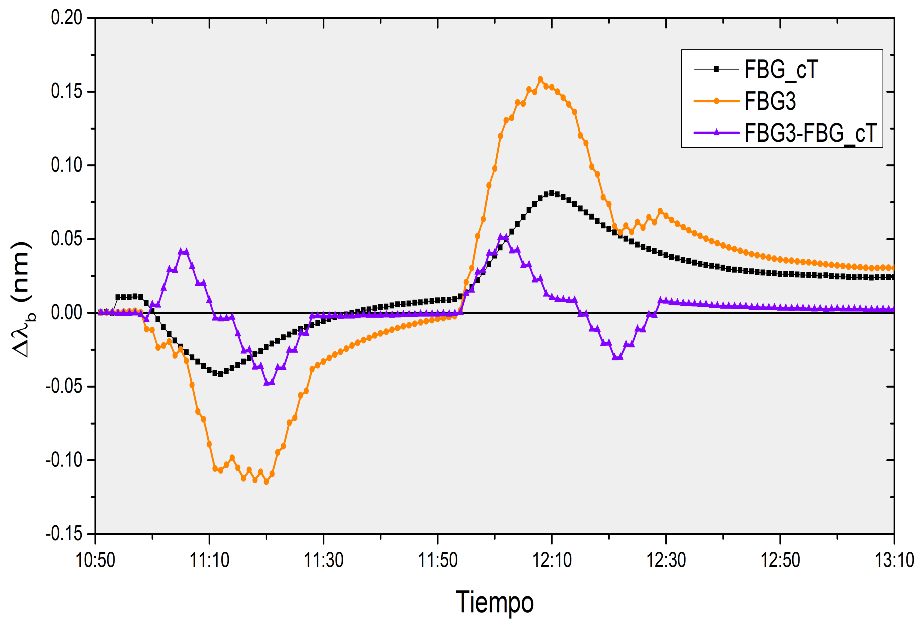
Por último lo que se propuso fue monitorear la respuesta del sensor de desplazamiento al aplicar pasos de 100μm en ambas direcciones al mismo tiempo que se disminuía ($\Delta T = -10^oC$) y aumentaba ($\Delta T = +10^oC$) la temperatura del sensor. Para esto se aplicaron 4 pasos de 100μm en una dirección y se regreso a su posición original, para posteriormente aplicar los mismos desplazamientos en dirección contraria, todo esto mientras se enfriaba y calentaba el sensor. Obteniendo los gráficos de la figura 3.28:



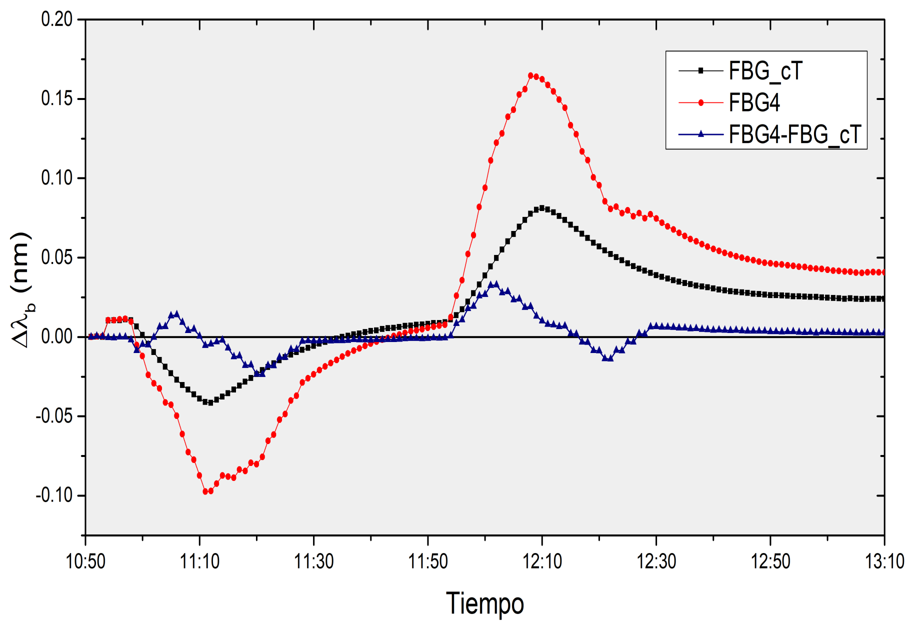
(a) Desplazamientos medidos con $FBG1$ con compensación de temperatura.



(b) Desplazamientos medidos con $FBG2$ con compensación de temperatura.



(c) Desplazamientos medidos con $FBG3$ con compensación de temperatura.



(d) Desplazamientos medidos con $FBG4$ con compensación de temperatura.

Fig. 3.29. Desplazamientos en pasos de 100 μm con variación de temperatura.

En los gráficos de la figura 3.29 se pueden observar las respuestas por desplazamientos y cambios de temperatura tanto de las rejillas de sensado así como la rejilla de compensación. Así como la respuesta ante desplazamientos y cambios de temperatura del método de compensación por temperatura aplicando el factor de corrección para disminuir en gran medida las contribuciones por cambios de temperatura.

En cada gráfica se puede distinguir la diferencia entre solo utilizar las rejillas de sensado y del método de compensación de temperatura, el cual puede llegar a hacer el sensor de desplazamiento inmune a cambios de temperatura, haciéndolo óptimo para aplicaciones de monitoreo de desplazamientos milimétricos y micrométricos en condiciones ambientales.

3.3. Comparación de resultados

Las sensibilidades para ambos prototipos de sensor de desplazamiento con los arreglos de rejillas Bragg utilizados $A1$ y $A2$ así como los radios R_1 y R_2 se muestran en las siguientes resultados:

Arreglo $A1$:

$\lambda_b\ (FBG1) = 1519.\ 819$ nm

$\lambda_b\ (FBG2) = 1530.\ 121$ nm

$\lambda_b\ (FBG3) = 1540.\ 090$ nm

$\lambda_b\ (FBG4) = 1549.\ 967$ nm

Arreglo $A2$:

$\lambda_b\ (FBG1) = 1529.\ 749$ nm

$\lambda_b\ (FBG2) = 1540.\ 085$ nm

$\lambda_b\ (FBG3) = 1550.\ 008$ nm

$\lambda_b\ (FBG4) = 1559.\ 963$ nm

Primer Prototipo:

Tabla 3.15. Sensibilidades a desplazamientos para R_1 (3.2cm) y suma de errores por histeresis y no linealidad, en un rango de medición de ± 40 mm para $A2$.

Rejilla	Sensibilidad (pm/mm)	Error RSS
FGB 1	31 ±1	16.42 %
FBG 2	39 ±2	15.50 %
FBG 3	40 ±2	12.09 %
FBG 2	33 ±1	12.98 %

Tabla 3.16. Sensibilidades a desplazamientos para R_2 (2.9cm), en un rango de medición de ± 40 mm para A2.

Rejilla	Sensibilidad (pm/mm)	Error RSS
FGB 1	33 ±1	23.43 %
FBG 2	41 ±2	15.34 %
FBG 3	43 ±3	13.26 %
FBG 2	35 ±4	15.07 %

Tabla 3.17. Sensibilidades a la temperatura para el arreglo A1.

Rejilla	Sensibilidad (pm/°C)	Error RSS
FGB 1	9.5 ±1.3	11.95 %
FBG 2	15.6 ±1.8	10.81 %
FBG 3	15.5 ±1.7	11.43 %
FBG 4	10.1 ±1.4	10.21 %

Para el primer prototipo se realizó la caracterización en un rango de desplazamiento de ± 50 mm y ± 40 mm, esto con la finalidad de mantener rangos de medición semejantes a sensores comerciales o prototipos anteriores, obteniendo sensibilidades mayores y con la capacidad de medir desplazamientos en ambas direcciones. La sensibilidad a la temperatura se encuentra dentro de los parámetros teóricos mostrados en el capitulo 1 en las ecuaciones 1.36.

Un punto a considerar es el error asociado por histeresis y no linealidad que presenta el primer prototipo, con valores que oscilan entre el 12 % hasta el 23 %, esto se debe a la alta histeresis que presenta el primer prototipo por el mecanismo de deformación por variación de curvatura, en el que el aro metálico no recupera su forma original al deformarse por desplazamientos.

Prototipo final:

Tabla 3.18. Sensibilidades a desplazamientos para R_2 (2.9cm), en un rango de medición de ± 30 mm para A1

Rejilla	Sensibilidad (pm/mm)	Error RSS
FGB 1	30 ±2	11.40 %
FBG 2	51 ±4	4.95 %
FBG 3	53 ±4	2.36 %
FBG 2	45 ±3	3.64 %

Tabla 3.19. Sensibilidades a desplazamientos paraR_2 (2.7cm), en un rango de medición de ±30 mm para $A2$ con compensación de temperatura.

Rejilla	Sensibilidad (pm/mm)	Error RSS
FGB 1	48 ±2	10.26 %
FBG 2	60 ±5	3.34 %
FBG 3	74 ±8	2.54 %
FBG 2	51 ±3	4.72 %

Tabla 3.20. Sensibilidades a la temperatura para el arreglo $A2$.

Rejilla	Sensibilidad (c)	Error RSS
FGB 1	10.2 ±1.9	16.64 %
FBG 2	12.4 ±2.4	4.33 %
FBG 3	12.3 ±2.2	7.45 %
FBG 4	10.5 ±1.8	15.07 %

Para el prototipo final se decidió reducir el rango de medición de hasta ± 30 mm, esto con la finalidad de aumentar la sensibilidad para poder medir con el mismo sensor desplazamientos del orden de milímetros y micrómetros, para aplicaciones de monitoreo estructural. Obteniendo sensibilidades de hasta 74 pm/mm, diferenciándolo de sensores antes propuestos [41]. El error asociado por histeresis y no linealidad se logro reducir hasta un valor de 2.54 % para la rejilla que se encuentra en el centro del anillo metálico, que es la posición óptima para emplear el método de deformación por variación de curvatura.

Los resultados muestran que las sensibilidades al desplazamiento para el arreglo $A2$ son mayores, además de que la sensibilidad a la temperatura para $A2$ es menor que para $A1$, lo cual para este tipo de sensores es lo ideal, ya que se busca reducir en gran medida los efectos por cambios de temperatura. Por el método de compensación de temperatura se logro reducir la respuesta del sensor a cambios de temperatura hasta valores de 1.6 pm/^{o}C, haciéndolo capaz de realizar mediciones en condiciones ambientales.

Conclusiones

Los sensores de desplazamiento a base de rejillas Bragg en fibra óptica han demostrado múltiples aplicaciones, siendo mas utilizados en el área de monitoreo estructural. Para esta aplicación se requiere un monitoreo constante y de alta precisión para identificar desplazamientos que puedan ser perjudiciales a tales estructuras.

El sensor de desplazamiento propuesto funciona con un mecanismo de deformación por variación de curvatura de las FBG, el cual no es tan común para asociarlo a desplazamientos lineales, pero puede ser utilizado para medir desplazamientos en ambas direcciones utilizando una sola rejilla. Este diseño difiere de otros sensores de desplazamiento a base de FBG tanto en desarrollo como comerciales, esto con la finalidad de presentar un nuevo diseño que tenga mayor sensibilidad al desplazamiento además, de ser capaz de medir movimientos en ambas direcciones con una sola rejilla.

Para el primer prototipo se pudo medir desplazamientos bidireccionales en un rango de ± 50 mm y ± 40 mm mostrando un factor $R^2 = 0.998$ en las rejillas que se encuentran cerca del centro superior del anillo metálico y con sensibilidades de hasta 40 pm/mm. Con la desventaja de presentar altos errores por histeresis de hasta 15 % para este primer prototipo. Además de presentar alta sensibilidad a la temperatura de ∼15 pm/^{o}C, haciéndolo ineficiente para medir desplazamientos de unos cuantos milímetros por la alta histeresis y dependencia a la temperatura.

Para el prototipo final se redujo la estructura de plástico PLA en donde se fija el anillo metálico con el arreglo de las FBG's, además de cambiar el diseño para que la deformación en las rejillas que se induce con desplazamientos lineales tuviera mayor linealidad y así reducir el fenómeno de histeresis. Otro cambio del prototipo final fue el uso de un nuevo arreglo de rejillas, para utilizar el método de compensación de temperatura, esto con la finalidad de que el sensor sea solo sensible a deformaciones mecánicas quitando la influencia de los cambios de temperatura del sensor.

El error combinado por histeresis y no linealidad para el prototipo final se redujo a un porcentaje del 2.36 % para las rejilla que se encuentra mas cercana al centro superior del anillo ($FBG3$), siendo esta la que presenta un factor $R^2 = 0.999$, haciendo que la posición donde se encuentra esta rejilla sea la óptima para el método de deformación por variación de curvatura. La sensibilidad al desplazamiento para este prototipo final es de hasta 70 pm/mm en un rango de medición de ±30 mm, por lo cual si se utiliza un instrumento de medición con una precisión de 1 pm, los desplazamientos mínimos a medir con el sensor sera aproximadamente de 15 μm.

Usando el método de compensación de temperatura para reducir la dependencia de $\Delta\lambda_b$ por cambios de temperatura resultó util en este trabajo experimental, reduciendo la sensibilidad a la temperatura de las FBG a valores de 1.69 pm/mm, logrando identificar desplazamientos de 100 μm con cambios rápidos de temperatura, lo cual lo hace accesible para monitorear desplazamientos en condiciones ambientales. Esto hace al sensor capaz de medir desplazamientos en estructuras como puentes, túneles o presas, en las cuales habría presencia de desplazamientos estructurales a causa de deformaciones que pueden ser identificados en tiempo real con este tipo de sensor.

El trabajo a mejorar para este sensor de desplazamiento se centra en el diseño de deformación por curvatura, para reducir las dimensiones del sensor y para obtener un rango mayor de medición. Además de realizar mediciones con mayores rangos de variación de temperatura, considerando que el sensor puede ser colocado en condiciones climáticas extremas y este no pierda precisión en las mediciones. Todo esto con la finalidad de poder realizar mediciones con el sensor de desplazamiento propuesto en alguna estructura de interés, monitoreando los desplazamientos para identificar cambios en la deformación estructural.

Bibliografía

[1] José Miguel Lopez-Higuera, et al, *Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring*, Journal of Lightwave Technology ,Vol. 29, pp. 587 - 608, 2011.

[2] Honglei Guo, et al, *Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Plataforms*, Sensors 11, pp. 3687-3705, 2011.

[3] Fahad Ansari, *Practical Implementation of Optical Fiber Sensors in Civil Structural Health Monitoring*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 18, pp. 879-889, 2007.

[4] BalarabeWada Isah, Hisham Mohamad, *Surface-Mounted Bare and Packaged Fiber Bragg Grating Sensors for Measuring Rock Strain in Uniaxial Testing*, Sensors 21. pp 1-2, 2021.

[5] Xiaorong Wan, et al, *Measurements of Excavation Damaged Zone by Using Fiber Bragg Grating Stress Sensors*, Sensors 21. pp 3-5, 2021.

[6] Yongxing Guo, et al, *A Fiber Bragg Grating Sensor for Positive and Negative Displacement Measurement*, IEEE Sensors Journal, Vol.21, Issue: 19, pp. 21564 - 21571, 2021.

[7] Ping Lu,, et al, *Distributed Optical Fiber Sensing: Review and Prospective*, Applied Physics Reviews 6, pp.2-3, 2019.

[8] A.Saleh, M.C Telch. *Fundamental of photonics*. Wiley & Sons, 3 edicion, pp. 12-19, 2019.

[9] Corning. *SMF-28 Ull optical fiber*. Datasheet, PI1470, 2014.

[10] Ho Sze Phing, Jalil Ali, Rosly Abdul Rahman and Bashir Ahmed Tahir, *Fiber Bragg grating modeling, simulation and characteristics with different grating lengths* , Journal of Fundamental Sciences 3,pp. 167-175, 2007.

[11] Katsunari Okamoto, *Fundamentals of Optical Waveguides*, Academic Press, Elselvier, 2 Edicion. pp.169-175, 2006.

[12] D. Savastru, S. Miclos, M. Tautan, and I. Lancranjan, *Numerical Simulation Methods Applied at Fiber Grating Sensors Design", in Modeling and Simulation in Engineering Sciences.*, IntechOpen, [Online]. Available: https://www.intechopen.com/chapters/51455 doi: 10.5772/63890, 2016.

[13] Wei-Ping Huang, Jianwei Mu, *Complex coupled-mode theory for optical waveguides*, Optic Express, 17, pp. 11-12, 2009.

[14] Hisham K, *Fiber Bragg grating Sensors: Development and Applications*, Taylor and Francis. pp. 23-26, 2020.

[15] Amon Yariv, Pochi Yeh, *Optical Waves in Crystals*, John Wiley and Sons, pp. 194-197. 1984.

[16] Stephen J. Mihailov, *Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments*, Sensors, 12, pp.1898-1918, 2012.

[17] Jasjot K. Sahota, Neena Gupta, Divya Dhawan, *Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review*, SPIE, Optical Engineering 59, pp 4-7, 2020.

[18] Iraj Sadegh Amiri, et al, *Introduction to Photonics: Principles and the Most Recent Applications of Microstructures*, Micromachines 9, pp.13. 2018.

[19] Hill, K.O.; Fujii, Y.; Johnson, D.C.; Kawasaki, B.S. *Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication.* Applied Physics Letters,32, pp.647–649, 1978.

[20] Marcelo Martins M. Werneck, Regina C. S. B. Allil, Fábio V. B. de Nazaré , *Fiber Bragg Gratings: Theory, Fabrication, and Applications.* Tutorial Texts in Optical Engineering, Vol. TT114, SPIE PRESS, pp. 22-29, 2017.

[21] Chaluvadi V. Naga Bhaskar, Subhradeep Pal, Prasant Kumar Pattnaik, *Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement*, Results in Optics 5 pp.1-13, 2021.

[22] Yage Zhan, et al, *Fiber grating sensors for high-temperature measurement*, Optics and Lasers in Engineering 46, pp. 349–354, 2008.

[23] Xiaoyong Zhong, et al, *Temperature-insensitivity gas pressure sensor based on inflated long period fiber grating inscribed in photonic crystal fiber*, Optics Letters, Vol. 40, No. 8, pp. 1791-1794, 2015.

[24] Yinping Miao, et al, *Relative Humidity Sensor Based on Tilted Fiber Bragg Grating With Polyvinyl Alcohol Coating*, IEEE Photonics Technology Letters Vol. 21, NO. 7, pp.441-443, 2009.

[25] Campopiano, S. et al, *Acoustic Sensors Based on Fiber Bragg Gratings*, Sensors, 9, pp.4446–4454, 2009.

[26] Abraham Perez-Alonzo, G.E. Sandoval-Romero, *Accelerometer prototype based on enhanced fiber Bragg grating overlapping interrogation method*, Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 242 167027, pp 1-3, 2021.

[27] Lukasz Dziuda, et al, *Fiber Bragg Grating Strain Sensor Incorporated to Monitor Patient Vital Signs During MRI*, IEEE Sensors Journal, Vol. 13, No. 12, pp.4986-4991, 2013.

[28] Charles R. Farrar, Keith Worden, *An Introduction to Structural Health Monitoring,* Philos Trans A Math Phys Eng Sci, Vol. 365, pp. 303-315, 2007.

[29] W.H. Duan, Q. Wang , S.T. Quek, *Applications of Piezoelectric Materials in Structural Health Monitoring and Repair: Selected Research Examples*, Materials , 3(12), pp. 5169-5194, 2010.

[30] Gustavo S. Duffó, Silvia B. Farina, *Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures*, Construction and Building Materials Vol. 23, pp. 2746-2751, 2009.

[31] Shima Taheri, *A review on five key sensors for monitoring of concrete structures*, Construction and Building Materials Vol.204, pp. 492-509, 2019.

[32] Jerome P. Lynch, Kenneth J. Loh *A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring*, Shock Vib. Digest, Vol. 38, pp. 91-130, 2006.

[33] Pu-Woei Chen, D. D. Chung, *Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection*, Smart Mater. Struct., Vol. 2 (1), pp. 22-24, 1993.

[34] Mousumi Majumder, et al, *Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications*, Sensors and Actuators, Vol. 147, pp.150–164, 2008.

[35] Yoshida, Y. et al,*Development of the monitoring system for slope deformations*, Proc. SPIE, 4694, pp. 296–302, 2002.

[36] H.J. Patrick, et al, *Long period fibre gratings for structural bend sensing*, IET, Vol. 34, pp. 1773-1775, 1998.

[37] Li Xiong, et al, *Fiber Bragg Grating Displacement Sensor With High Measurement Accuracy for Crack Monitoring*, IEEE Sensors Journal, Vol. 19, pp. 10506-10212, 2019.

[38] Hyo Seon Park, et al, *A Wireless Laser Displacement Sensor Node for Structural Health Monitoring*, Sensors 13, pp. 13204-13216, 2013.

[39] Dongming Feng, Maria Q. Feng, *Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 88, pp. 199–211, 2017.

[40] Seok Been Im,et al, *Summary Review of GPS Technology for Structural Health Monitoring*, J. Struct. Eng., Vol. 139(10), pp. 1653-1664, 2013.

[41] Wenlong Liu, Yongxing Guo, Li Xiong, Yi Kuang, *Fiber Bragg grating based displacement sensors: state of the art and trends*, Sensor Review, Volume 39, Number 1, pp. 87-93, 2019.

[42] Yong Li, et al , *Structural Stability Monitoring of a Physical Model Test on an Underground Cavern Group during Deep Excavations Using FBG Sensors*, Sensors, Vol. 15, pp. 21696-21709, 2015.

[43] M.H. Yau, *Static Vertical Displacement Measurement of Bridges Using Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors*, Advances in Structural Engineering, pp. 1-17, 2013.

[44] Weilai Li, et al , *Displacement monitor with FBG deforming ring and its application in high speed railway*, Proc. of SPIE Vol. 8421, pp. 1-4, 2012.

[45] Junlin Lv, et al, *Research on new FBG displacement sensor and its application in Beijing Daxing Airport project*, Optik - International Journal for Light and Electron Optics 178, pp. 146–155, 2021.

[46] Christoph M. Monsberger, Werner Lienhart, *Distributed fiber optic shape sensing along shotcrete tunnel linings: Methodology, field applications, and monitoring results*, Journal of Civil Structural Health Monitoring Vol 11, pp.337–350, 2021.

[47] Qi Wang, Yu Liu, *Review of optical fiber bending/curvature sensor*, Measurement, Volume 130, pp. 161-163, 2018.

[48] Fuxing Zhu, Yundong Zhang, Yanchen Qu, Weiguo -Jiang, Huaiyin Su, Ying Guo, Kaiyue Qi, *Stress-insensitive vector curvature sensor based on a single fiber Bragg grating* .Optical Fiber Technology, Volume 54, 102133, pp. 1-4, 2020.

[49] G. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor and J.Z. Zhu. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Butterworth-Heinemann 6th Edicion, pp.19-23, 2005.

[50] Xingzhou Tu, *Implementation of 2D stress-strain Finite Element Modeling on MATLAB*, OPTI 521 Tutorial, Universidad de Arizona, pp.1-5, 2016.

[51] Klaus-Jurgen Bathe, *Finite Element Procedures* ,Prentice Hall 2nd Edicion, pp.642-650, 2014

[52] Hua-Ping Wang, Jian-Guo Da, Xing-ZheWang, *Improved temperature compensation of fiber Bragg grating-based sensors applied to structures under different loading conditions*, Optical Fiber Technology, Vol. 63, 102506, 2021.

[53] Min Yong Jeon, et al, *Dynamic sensors based on wavelength-swept lasers*, SPIE NEWS, online, 2015, https://spie.org/news/5653, visto el 28/02/2022.

[54] Si-155 HYPERION Optical Sensing Instrument, LunaInc, 2021.

[55] Intelligent Picomotor Control Modules, New Focus, 2003.

[56] Li Xu, et al, *Stretchable Fiber Bragg Grating Based Sensor*, Optics Letters 43, pp. 2503-2506, 2018.

[57] Lucas Negri, et al, *Benchmark for Peak Detection Algorithms in Fiber Bragg Grating Interrogation and a New Neural Network for its Performance Improvement*, Sensors 11, pp. 3466-3482, 2011.

[58] Kourosh Kalantar-Zadeh, *Sensors An Introductory Course*, Springer, pp.18-19, 2013.

[59] David S. Nyce, *Linear position sensors: theory and application*, John Wiley and Sons, pp-14-16, 2004.

[60] Li Sun, et al, *Superwide-Range Fiber Bragg Grating Displacement Sensor Based on an Eccentric Gear: Principles and Experiments*, J. Aerosp. Eng., Vol. 32, pp.04018129-4. 2019.

[61] Yun, Ying-wei, Jang, Il-Young, *Temperature Compensation Technique for Steel Sleeve Packaged FBG Strain Sensor and Its Application in Structural Monitoring*, KoreaScience, Vol. 8, pp. 1-8, 2008.