

# Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg (fbgs) para deformación y temperatura

## Fiber Bragg grating sensors' validation for strain and temperature

**Cristian Andrés Triana-Infante**

M.Sc Investigador Grupo de Investigación en Electrónica de Alta Frecuencia y Telecomunicaciones  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá, Colombia  
catrianai@unal.edu.co

**Margarita Varón-Durán**

Ph.D Profesor Asociado  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá, Colombia  
gmvarond@unal.edu.co

**Daniel Pastor-Abellán**

Ph.D Catedrático Universidad Politécnica de Valencia  
Valencia, España  
dpastor@dcom.upv.es

**Resumen—** Se determinaron los coeficientes característicos para redes de difracción de Bragg simples; usadas como sensores de deformación y temperatura en estructuras metálicas. Diferentes experimentos fueron realizados para establecer la relación entre la longitud de onda filtrada por una red de difracción simple y la temperatura y deformación a las cuales es sometida la fibra óptica. Se compara el desempeño de los sensores ópticos contra sensores eléctricos convencionalmente usados, bajo condiciones normales de operación de las estructuras metálicas. Se obtuvo el valor de la relación constante para valores de temperatura de 20 °C a 70 °C y de deformación en un rango de cero a 1800  $\mu\epsilon$ . Se obtuvo una mayor velocidad de respuesta en los sensores ópticos FBG frente a galgas extensiométricas o termopares. Los sensores FBG muestran un mayor rango de funcionamiento en pruebas de deformación destructivas.

**Palabras claves—** Sensor de fibra óptica, monitoreo estructural, *fiber Bragg gratings*, medición de deformación, medición de temperatura, sensor óptico, FBG.

**Abstract—** In this research, the characteristic constants for optical fiber Bragg grating strain sensors were determined for their use in metallic structures. Three different experiments were performed with the purpose of finding the constant relationship between the optical wavelength reflected by the FBG sensor and the strain or temperature incidents in a specific structure. It was established a comparison between the behavior of optical sensors versus electrical sensors used traditionally. From these experiments it was obtained a constant value for temperature values between 20 °C and 70 °C; and for strain from zero up to 1800  $\mu\epsilon$ . All measurements were taken in 'in-situ' conditions for tests of metallic structures. The results show a higher speed of response for the optical sensors when compared with electrical

resistance strain gauges or thermocouples. Also, fiber Bragg grating sensors show a larger operating range in tensile tests.

**Keywords—** Optical fiber sensor, structural health monitoring, fiber Bragg gratings, strain measurement, temperature measurement, optical sensor, FBG.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los años noventa el campo de las telecomunicaciones se vio potenciado por el descubrimiento de las propiedades de la fibra óptica monomodo y de los amplificadores de fibra óptica dopados con erbio (EDFA) [1]. A partir de estos descubrimientos y con el objetivo de obtener cada vez mejores velocidades de transmisión la investigación en la utilización y creación de dispositivos basados en fibra óptica ha aumentado considerablemente. Dentro de esta serie de investigaciones se dio lugar a la creación de dispositivos conocidos como redes de difracción de Bragg (FBGs por sus siglas en inglés) que tuvieron como función inicial el filtrado de determinadas frecuencias en la transmisión de datos [2]. En el año de 1993 se consolida la fabricación en masa de estos dispositivos debido a dos hallazgos cruciales: el método de fabricación de redes de difracción de Bragg por máscara de fase y las fibras ópticas cargadas con hidrógeno, que permiten, en primer lugar, estandarizar y optimizar el proceso de fabricación de las redes de difracción, y segundo, incrementar la

fotosensibilidad de la fibra óptica a la luz, lo que permite reducir el costo de fabricación [3].

Las redes de difracción de Bragg no solo se han estudiado para aplicaciones en telecomunicaciones; desde su creación se ha tenido interés en aprovechar las propiedades de estos dispositivos para la medición de diferentes variables físicas dadas las múltiples ventajas que supone la utilización de la fibra óptica como instrumento de medición (entre otras: tamaño y peso reducidos, capacidad de multiplexación e inmunidad a interferencias electromagnéticas).

Los sensores basados en FBGs son una fibra óptica a la que se le ha introducido una perturbación periódica en el índice de refracción de su núcleo. Esta perturbación es usualmente inducida por la exposición de la fibra a un patrón de luz ultra violeta generado por una máscara de fase. Debido a la periodicidad de esta perturbación, una longitud de onda específica se verá filtrada cuando es transmitida a través de la fibra óptica. Este hecho convierte automáticamente a la fibra óptica en un elemento sensor dado que las variables externas que afectan el entorno de la fibra óptica tienen un efecto en la periodicidad de la perturbación.

A partir de la fabricación en masa de los sensores basados en redes de difracción de Bragg y de su estudio teórico, los esfuerzos se han centrado en la utilización y aplicación de estos dispositivos [4]. Inicialmente los sensores de tipo FBGs fueron utilizados para tomar mediciones de temperatura y deformación, debido a que su construcción los hace inherentemente sensibles a estas variables, sin embargo, su gran aplicabilidad forzó rápidamente a que se diera su utilización en la medición de otro tipo de variables de manera indirecta. Es así como se han utilizado para el cálculo de otras variables como vibración, aceleración, presión, peso, entre otras.

Uno de los campos en los que esta tecnología ha tenido mayor acogida es la ingeniería civil [5], [6], en donde el análisis de una estructura en todo momento es de vital importancia para diagnosticar y tomar acciones de prevención que prolonguen la vida útil de las estructuras y garanticen la seguridad de las personas involucradas. Este artículo describe el trabajo realizado por el grupo de investigación en electrónica de altas frecuencias y telecomunicaciones CMUN en cuanto a la

caracterización y utilización de sensores basados en FBGs para monitoreo estructural. El documento presenta inicialmente, en el capítulo 2, la teoría básica de funcionamiento de las redes de difracción de Bragg y su metodología de fabricación. En el capítulo tres se presenta el comportamiento de las redes de difracción de Bragg ante perturbaciones en la temperatura o elongación de la fibra. Los resultados de los ensayos llevados a cabo para caracterizar los sensores son detallados en el capítulo 4, allí se presenta también un contraste entre el funcionamiento de las redes de difracción de Bragg y los sensores eléctricos convencionales. Finalmente, en el capítulo quinto se presentan las conclusiones generales del artículo.

## 2. REDES DE DIFRACCIÓN DE BRAGG

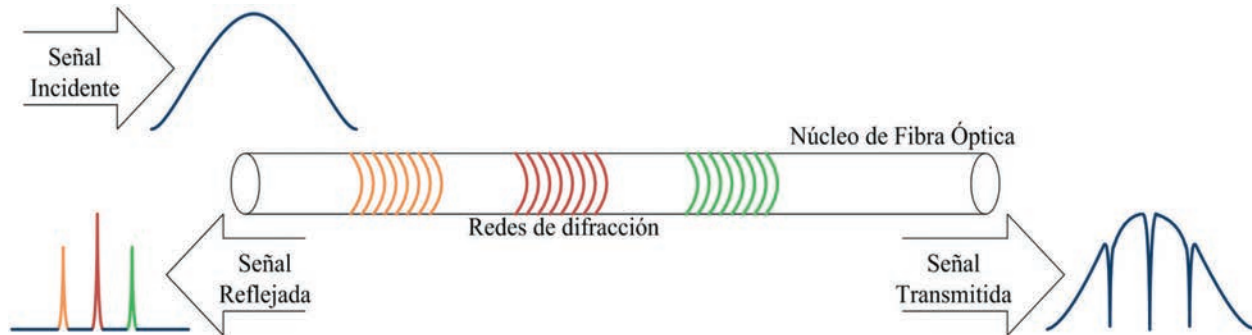
Las redes de difracción de Bragg son dispositivos construidos dentro del núcleo de la fibra óptica a partir de perturbaciones en su índice de refracción, la característica fundamental de estas perturbaciones es que tienen una relación periódica de distancia; cuando la distancia entre estas cumple la condición de Bragg [7], el dispositivo actúa como un filtro rechaza banda en transmisión y una longitud de onda específica se ve reflejada a lo largo de la fibra óptica. En la Fig. 1 se muestra un esquema básico de tres redes de difracción de Bragg, en el cual se observa que la señal reflejada contiene potencia en las longitudes de onda correspondientes a cada una de las redes inscritas en el núcleo de la fibra óptica, la señal restante es transmitida a través de la fibra.

Los sensores tipo FBG son principalmente redes de difracción uniformes para las cuales se asume que la fibra óptica no tiene pérdidas en las frecuencias de interés y que solo soportan un modo de transmisión propagante y otro contrapropagante [8]. La ecuación (1) describe la longitud de onda reflejada para este tipo de redes de difracción es:

$$\lambda_B = 2 \eta_{eff} \Lambda \quad (1)$$

En donde  $\lambda_B$  es la longitud de onda reflejada por la red de difracción,  $\eta_{eff}$  es el índice de refracción de la fibra óptica y  $\Lambda$  es el espaciado entre las rejillas inscritas en la fibra. Se observa que la longitud de onda reflejada por la red de difracción depende únicamente del factor  $\Lambda$ , ya que el índice de refracción es un parámetro inherente de la fibra óptica.

Fig 1. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS REDES DE DIFRACCIÓN DE BRAGG, CADA REJILLA O RED DE DIFRACCIÓN ACTÚA COMO UN FILTRO ESTRECHO ALREDEDOR DE UNA LONGITUD DE ONDA



Fuente: autores

### 2.1. Fabricación de FBGs por máscara de fase

Existen diferentes métodos de fabricación de las redes de difracción de Bragg [9]-[11], el de mayor utilización es el grabado externo por exposición a luz ultravioleta a través de una máscara de fase [12]. Este método consiste en atacar la fibra óptica con un haz de luz UV que previamente atraviesa una máscara de fase cuyo patrón superficial se calcula de tal forma que el componente de orden cero del haz de luz incidente es suprimido y los componentes de órdenes  $\pm 1$  son maximizados [13]. La interferencia de estos órdenes de difracción en la fibra modifica su índice de refracción. La distancia entre las rejillas inscritas en la fibra corresponde a la mitad del espaciamiento en la máscara de fase, ver (2).

$$\Lambda_{Bragg} = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (2)$$

La principal ventaja de fabricar redes de difracción con máscara de fase es que no es necesario utilizar elementos ópticos adicionales a la máscara de fase, por lo tanto, es un montaje muy poco susceptible a vibraciones y perturbaciones externas y más fáciles de llevar a la práctica.

### 2.2. Sensores basados en redes de difracción de Bragg

Como se ha mencionado previamente, la reflexión de ciertas longitudes de onda debido a las redes de difracción de Bragg permite el uso de la fibra óptica como elemento sensor de perturbaciones externas que ejerzan un cambio en el espaciamiento de la red de difracción  $\Lambda$ , ver

(1). Cambios de elongación o temperatura en la fibra se traducen, entonces, en un cambio en la longitud de onda reflejada ( $\Delta\lambda_B$ ) que se expresa en términos de la elongación y la temperatura en (3). En donde el primer término de la ecuación está asociado con el cambio en la longitud de la fibra ( $\Delta l$ ) y el segundo término refleja el efecto de los cambios en la temperatura ( $\Delta T$ ) en la fibra óptica.

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (3)$$

Aunque el campo de aplicación de las redes de difracción de Bragg como sensores es bastante amplio y son utilizados para medir gran variedad de variables físicas directa o indirectamente, las variables que están directamente relacionadas con la longitud de onda de Bragg son las deformaciones mecánicas y la temperatura. Adicionalmente, su correspondencia con la longitud de onda reflejada es lineal en rangos amplios tanto de temperatura como de deformación mecánica [14].

### 3. SENSIBILIDAD DE LAS FBG

La longitud de onda reflejada por una FBG está directamente relacionada con los cambios en tensión mecánica o temperatura que se ejercen directamente sobre el área de la fibra óptica en el cual se encuentra inscrita la FBG; a continuación se aborda la relación existente entre la longitud de onda de Bragg y cada una de estas variables.

### 3.1. Respuesta de los sensores a cambios en deformación

En el primer término de (3) se relaciona el cambio de la longitud de onda de Bragg con la deformación mecánica a la que es sometida la fibra a lo largo de su eje óptico; este cambio es descrito por (4):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_e)\varepsilon_z \quad (4)$$

Con:

$$\rho_e = \frac{\eta_{eff}^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})] \quad (5)$$

En donde  $\rho_{11}$  y  $\rho_{12}$  son constantes de relación tensión-óptica para el material, es decir, la capacidad de cambio de la fibra óptica ante deformaciones axiales, y tienen valores típicos de 0.113 y 0.252 respectivamente.  $\nu$  y  $\eta_{eff}$  son constantes asociadas al material y tienen valores típicos de 0.16 y 1.482 para una fibra de silicio.  $\varepsilon_z$  es la deformación ejercida en el eje axial de la fibra en micrones. Para el caso general de una fibra óptica de silicio con longitud de onda de Bragg de 1544 nm, se obtiene una sensibilidad ante deformaciones axiales en la fibra de 1,2157 pm/ $\mu\varepsilon$ . En la Fig. 2a, se muestra la relación teórica entre la deformación y la longitud de onda de Bragg de una red de difracción inscrita en 1544 nm.

$$\Delta\lambda_B = 1544e^{-9} \left[ 1 - \left( \frac{1,482^2}{2} [0,252 - 0,16(0,113 + 0,252)] \right) \right] = 1,2157 \text{ pm}/\mu\varepsilon \quad (6)$$

### 3.2. Respuesta de los sensores a cambios de temperatura

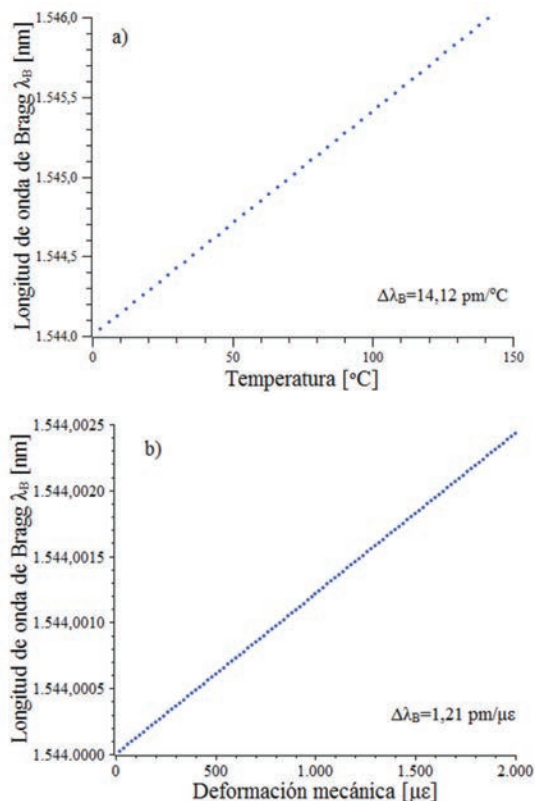
Por otra parte, el segundo término de (3) establece la relación entre la longitud de onda reflejada y el cambio de temperatura de la fibra óptica; esta relación es descrita a través de (7). En donde  $\alpha_\lambda$  es el coeficiente de expansión térmico para la fibra con un valor de  $0,55e^{-6}$  y  $\alpha_n$  es una constante termo-óptica con valor aproximado de  $8,6e^{-6}$ . Esta relación se ve gráficamente en la Fig. 2 b).

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_\lambda - \alpha_n)\Delta T \quad (7)$$

Se establece, entonces, para una red de difracción de 1544 nm inscrita en fibra óptica de silicio,

una sensibilidad dependiente de la temperatura de 14,12 pm/ $^\circ\text{C}$ .

Fig 2. RELACIÓN TEÓRICA PARA UNA RED DE DIFRACCIÓN DE BRAGG INSCRITA EN 1544 NM ENTRE LA LONGITUD DE ONDA REFLEJADA Y LA TEMPERATURA (A) DE 14,1 PM Y DEFORMACIÓN MECÁNICA (B) DE LA FIBRA DE 1,2 PM



Fuente: autores.

## 4. RESULTADOS

A partir de la teoría de funcionamiento de las redes de difracción de Bragg como sensores para diferentes variables físicas, se planteó la caracterización de este tipo de sensores contra las variables que los afectan directamente, temperatura y deformación mecánica. La sensibilidad de este tipo de sensores es considerablemente alta, principalmente debido a su tamaño y peso reducidos; por lo tanto, es importante obtener una caracterización del sensor bajo condiciones reales de funcionamiento que permitan validar el funcionamiento de los sensores directamente en la industria.

La aplicación para la cual se realizó la validación de los sensores es el monitoreo estructural [15] en ingeniería civil. En este campo, los sensores FBG ofrecen la posibilidad de tomar medi-

ciones de manera constante y con facilidad para adquirir y procesar señales de diferentes sensores al mismo tiempo [16]. Las aplicaciones más frecuentes de los sensores FBG en este campo son: el monitoreo de distintos tipos de concreto, análisis de esfuerzo o fatiga en infraestructuras civiles (vigas en edificios o puentes), pruebas de materiales, compresión de cemento, entre otros [17] -[21].

**4.1. Medición de temperatura**

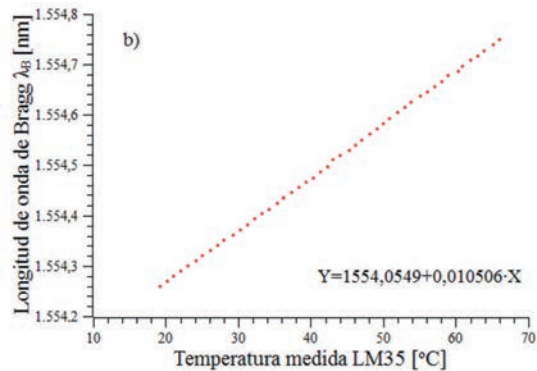
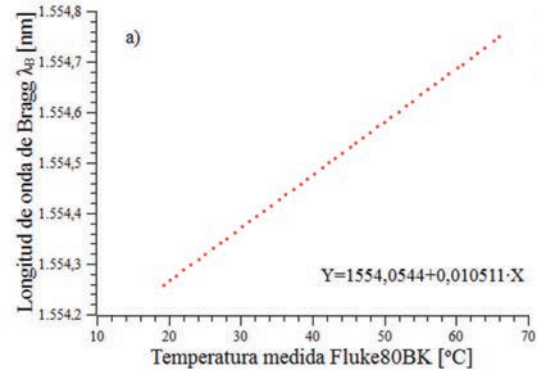
Para realizar la caracterización de los sensores FBG respecto al cambio de temperatura se usó una estructura metálica en la cual se dispusieron la fibra óptica y dos sensores convencionales de temperatura, en esta estructura se aumentó gradualmente la temperatura mediante resistencias de potencia distribuidas uniformemente a lo largo de la estructura metálica; el voltaje de alimentación en las resistencias se controló gradualmente y se tomaron medidas de los tres sensores simultáneamente. En la Tabla I se muestran los datos registrados a partir de este montaje mientras que en las Figs. 3a y 3b se observa la comparación de los datos medidos de temperatura por cada uno de los sensores Fluke80BK y LM35 contra la longitud de onda de la fibra.

TABLA I

COMPARACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA MEDIDA POR LOS SENSORES FLUKE80BK Y LM35 Y LA LONGITUD DE ONDA REFLEJADA POR LOS SENSORES FBG

Temperatura		Longitud de Onda	
Fluke80BK	LM35	FBG1	FBG2
19,25	19,25	1554,2602	1554,257125
22,075	22,125	1554,28958	1554,287313
24,975	25,05	1554,31974	1554,318025
27,9	28,075	1554,35016	1554,349788
30,975	31,25	1554,38214	1554,383125
33,9	34,3	1554,41256	1554,41515
36,967	37,367	1554,444453	1554,44735
39,833	40,3	1554,474267	1554,47815
43,2	43,1	1554,50928	1554,50755
46	46,1	1554,5384	1554,53905
49,2	49,1	1554,57168	1554,57055
52,3	52	1554,60392	1554,601
55,4	55,1	1554,63616	1554,63355
58,3	58,1	1554,66632	1554,66505
61,1	60,9	1554,69544	1554,69445
64,1	63,9	1554,72664	1554,72595
65,3	65,2	1554,73912	1554,7396

Fig 3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES FBG PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA, EN A) SE UTILIZÓ EL SENSOR FLUKE80BK Y EN B) UN SENSOR LM35



Fuente: autores.

Los resultados obtenidos confirman la linealidad esperada en la respuesta de las redes de difracción de Bragg respecto al cambio en la temperatura, la sensibilidad obtenida para los sensores FBG es de 10,5 pm por cada °C. Resultado que se encuentra dentro de lo esperado para las fibras fabricadas en el GCOC (cita requerida), este resultado es diferente del calculado teóricamente debido a las impurezas de la fibra y al proceso de fabricación.

Como ya se ha mencionado, la longitud de onda reflejada por un sensor FBG depende directamente, tanto de la temperatura en el entorno de la fibra como de la deformación a la cual es sometida. La longitud de onda reflejada por una red de difracción de Bragg contiene información de los dos fenómenos. Existen diferentes métodos por medio de los cuales se logra la discriminación de cada una de las variables sobre la longitud de onda de Bragg (cita requerida), el más sencillo y a la vez uno de los más eficaces es el método de discriminación me-

diante un sensor de referencia, en este método se aísla una FGB de manera que solo sea afectada por una variable, generalmente la temperatura, de esta manera, se tiene la información de la temperatura en un solo sensor y se puede compensar la medida de los demás sensores. En la Fig. 4 se observa el resultado del uso de este método para comprobar que el efecto de la temperatura, por ser de una dinámica más lenta que el efecto de la deformación durante un ciclo de carga y descarga del experimento, no afecta la medida obtenida.

#### 4.2. Medición de deformación

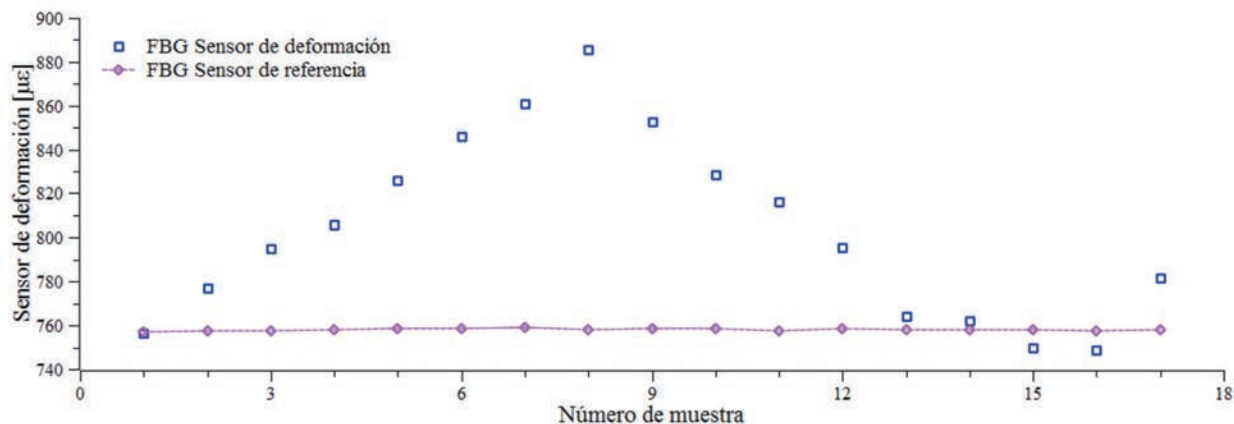
La unidad de medida de la deformación en un objeto o estructura se denomina ‘strain’ [ $\epsilon$ ] y, dado que su magnitud comúnmente es pequeña, suele representarse en unidades de ‘micro-strain’ o micro deformaciones [ $\mu\epsilon$ ] que corresponde a una elongación de  $1\mu\text{m}$  por metro en una determinada estructura.

La caracterización de los sensores ópticos tipo FBG se llevó a cabo mediante comparación directa de su respuesta en el dominio óptico contra las medidas obtenidas por galgas extensiométricas, las cuales son sensores de tipo eléctrico usados convencionalmente. El experimento realizado para caracterizar inicialmente los sensores ópticos se conoce como ‘viga en voladizo,’ consiste en sujetar un extremo de una viga metálica y agregar peso progresivamente

en su extremo libre obteniendo una deformación en la viga en intervalos discretos. La deformación en este experimento se acentúa en el extremo empotrado de la viga, es allí donde los sensores tanto eléctricos como ópticos son ubicados para medir la deformación a la cual se somete la estructura cada vez que se incrementa el peso en su extremo libre.

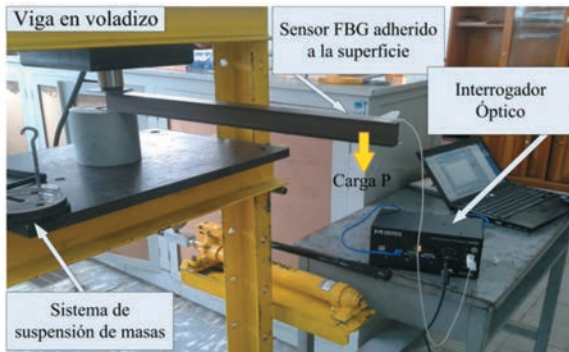
En este trabajo, los sensores FBG son redes de difracción uniformes diseñadas para reflejar una longitud de onda entre 1534 y 1560 nm. Construidas en el Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas de la Universidad Politécnica de Valencia. El puente de Wheatstone utilizado para medir la deformación percibida por las galgas extensiométricas es un indicador de deformación (Portable Strain Indicator P-3500) de la empresa *Vishay measurements group*, que proporciona medición directa de micro-deformación con resolución de  $1\mu\epsilon$  (cita requerida). La caracterización de los sensores consistió, entonces, en la comparación directa entre la medida del puente de *wheatstone* en unidades de  $\mu\epsilon$  y la longitud de onda registrada simultáneamente por el interrogador de fibras ópticas. En la Fig. 5 se muestra el montaje del experimento y la respuesta obtenida de caracterización para la cual se obtiene una relación directa entre la deformación de la estructura y la longitud de onda de Bragg reflejada por el sensor de  $1,2\text{ pm} / \mu\epsilon$ .

Fig 4. MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN CON UN SENSOR ÓPTICO FBG EN CONTACTO CON LA ESTRUCTURA Y UN SENSOR DE REFERENCIA DURANTE UN ENSAYO DE TRACCIÓN EN UNA ESTRUCTURA METÁLICA

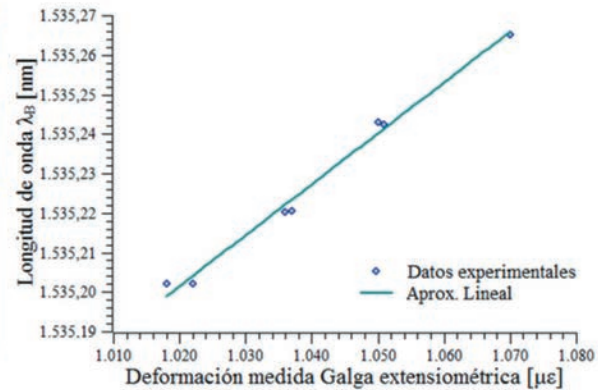


Fuente: autores.

Fig 5. (IZQ.) MONTAJE EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE MEDICIÓN, UNA VIGA EN VOLADIZO METÁLICA ES SUJETADA EN UNO DE SUS EXTREMOS Y SOMETIDA A DEFORMACIONES MEDIANTE LA SUMA DE PESOS EN SU EXTREMO LIBRE, SE INTERROGA UN SENSOR ÓPTICO TIPO FBG ADHERIDO A LA SUPERFICIE. (DER.) COMPARACIÓN ENTRE LAS MEDIDAS OBTENIDAS POR EL SENSOR ÓPTICO Y UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA



Montaje experimental Viga en voladizo



Fuente: autores.

A partir de esta caracterización inicial con el experimento de la viga en voladizo, en el cual los valores de deformación son discretos, es importante validar el funcionamiento de los sensores para condiciones reales de ensayos industriales. Para esto, se realizaron pruebas de caracterización de materiales en las cuales se somete a tracción una lámina metálica y una varilla estructural.

#### 4.3. Instrumentación distribuida de una lámina metálica

El propósito principal de este experimento fue la validación del comportamiento de diferentes sensores FBG embebidos en una misma fibra óptica contra la medición arrojada por sensores ERSG o galgas extensiométricas. En este se plantea perfilar la deformación inducida en cuatro puntos de una lámina metálica. Mediante este tipo de análisis se puede comprobar el modo de respuesta de cada sección de la estructura ante perturbaciones de tipo mecánico. Para medir este comportamiento se debe instrumentar la estructura con varios sensores de tipo resistivo, en donde cada galga extensiométrica debe formar parte de un puente de wheatstone para transformar su variación en resistencia en un cambio de voltaje que cuantifique la deformación a la cual está siendo sometida la estructura en los puntos de interés. En cuanto a la instrumentación con sensores ópticos se propone el diseño de cuatro redes de difracción

de Bragg, cada una inscrita dentro de la misma fibra óptica, multiplexadas en longitud de onda, es decir, cada uno de los sensores FBG trabaja dentro de la fibra a una longitud de onda distinta y se encuentran separados espacialmente aproximadamente 5 cm.

Teniendo estas consideraciones en cuenta, la lámina metálica es instrumentada a lo largo de una línea paralela al eje en el cual se ejerce la fuerza, se estudia la deformación distribuida en la lámina desde uno de sus extremos y a medida que el punto de medición se acerca a la mitad de la lámina. La disposición de los sensores en el experimento se puede observar en la Fig. 6, junto con el detalle de las galgas extensiométricas adheridas a la superficie de la lámina.

El esfuerzo al cual se somete la lámina se logra a través de una máquina de tracción manual, dispuesta en el laboratorio de estructuras del instituto de ensayos industriales (I.E.I) de la Universidad Nacional de Colombia, que logra imprimir un esfuerzo axial sobre la lámina de hasta 2000 kgf. Las consideraciones adicionales para la disposición de los sensores ópticos se basan en la limpieza del área en la cual se disponen los sensores, tanto ópticos como eléctricos, y la adhesión que se realiza con pegamento flexible loctite, teniendo en consideración que el pegamento sea aplicado de manera uniforme en el área de sensado para lograr contacto total entre los sensores y la estructura de estudio.

Fig 6. ENSAYO ATRACCIÓN DE UNA LÁMINA METÁLICA INSTRUMENTADA CON SENSORES TIPO FBG Y GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS. MONTAJE EXPERIMENTAL (IZQ.), DETALLE DE LA DISPOSICIÓN DE LOS SENSORES ELÉCTRICOS (DER.)



Fuente: autores.

En la Tabla II se presentan las longitudes de onda diseñadas para la realización de este experimento, y sus valores medidos después de adherir la fibra óptica a la estructura, de esta manera, se puede observar la diferencia entre la caracterización del sensor bajo condiciones controladas en un laboratorio y su desempeño bajo condiciones reales de operación.

TABLA II

LONGITUDES DE ONDA REFLEJADAS POR CADA SENSOR ÓPTICO UTILIZADO EN LA INSTRUMENTACIÓN DE LA LÁMINA ANTES Y DESPUÉS DE SER ADHERIDOS A LA SUPERFICIE DE ESTUDIO

Sensor número	Longitud de onda. Diseño [nm]	Longitud de onda. Condiciones prácticas [nm]
1	1535	1534,9132
2	1544	1543,8039
3	1554	1553,8555
4	1564	1563,4034

Fuente: autores.

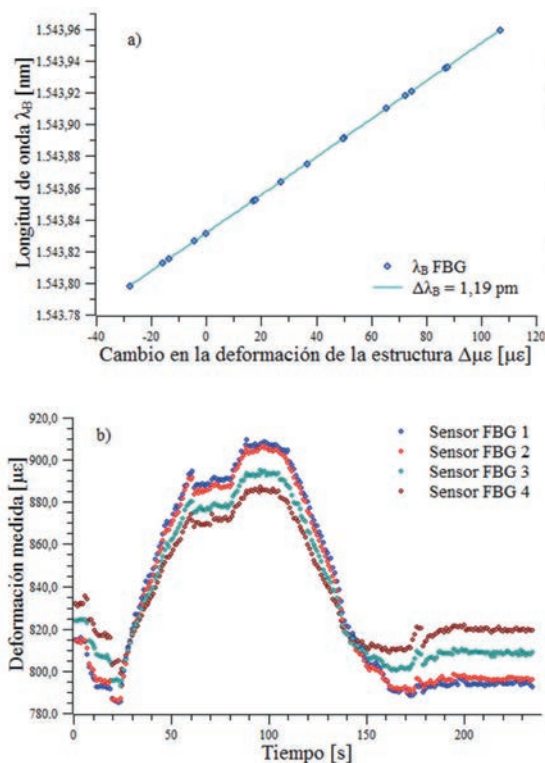
A partir del experimento se obtiene la comparación directa entre la respuesta del sensor ERSG traducida a unidades de micro-deformaciones y la longitud de onda del sensor FBG en nanómetros. El ajuste de lineal de los datos, Fig. 7a, relaciona la longitud de onda con la deformación de la estructura (8).

$$\lambda_B = 0,0011969 \cdot X + 1552,8984 \pm 3,135e^{-5} \quad (8)$$

A partir de (8), se obtiene la deformación correspondiente para cada uno de los 4 sensores de fibra óptica en la lámina. La magnitud del cambio es de 140 micro-strains medidos en el sensor número 1 que se situó más cerca del centro de la lámina, mientras que para el sensor número 4, se tienen cerca de 90 micro-strains, esto se debe a que la deformación se presenta en mayor medida hacia el centro de la lámina, ver Fig. 7b).

mero 1 que se situó más cerca del centro de la lámina, mientras que para el sensor número 4, se tienen cerca de 90 micro-strains, esto se debe a que la deformación se presenta en mayor medida hacia el centro de la lámina, ver Fig. 7b).

Fig 7. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SENSOR ÓPTICO CONTRA LOS VALORES DE DEFORMACIÓN MEDIDOS A) Y, B) COMPARACIÓN DE LA DEFORMACIÓN MEDIDA EN LOS CUATRO PUNTOS DE LA LÁMINA DURANTE UN ENSAYO DE CARGA Y DESCARGA



Fuente: autores.



#### 4.4. Ensayo a tracción de una varilla estructural

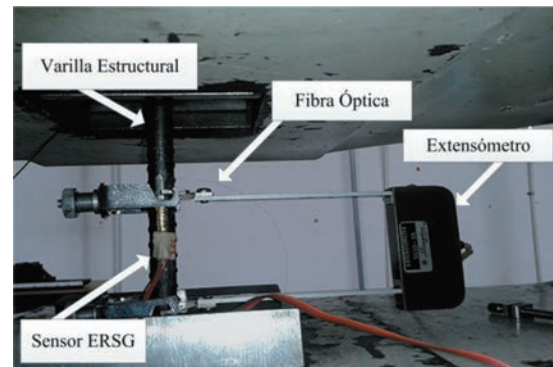
En este experimento se instrumenta una varilla estructural en un solo punto con el fin de medir la deformación que se presenta al someterla a tracción con una fuerza de aproximadamente 33 kN, el sensor de tipo óptico es adherido al eje de la varilla tras la limpieza de la misma, para este sensor sólo se debe tener en consideración que la superficie de metal esté libre de impurezas para garantizar una adherencia completa a la estructura, la galga extensiométrica responde al mismo procedimiento con la salvedad de que se hace necesario pulir la superficie sobre la cual va adherida, el extensómetro con el que cuenta la máquina de ensayos industriales shimadzu debe ser fijado a dos extremos equidistantes del punto en el cual se toma la medida de deformación. De esta manera, el sensor registra el desplazamiento que se presenta entre los dos puntos con los que está en contacto.

De este modo, se instrumenta una varilla estructural en su punto medio con tres tipos de sensores, dos de ellos de tipo eléctrico (ERSG y extensómetro), que medirán la deformación a la que es sometida la estructura y que se contrastarán con la señal óptica obtenida a través del sensor óptico FBG. La máquina se programa para realizar un incremento en la tracción ejercida cada segundo, de manera que todos los sensores estén tomando un dato de deformación en el mismo período de tiempo.

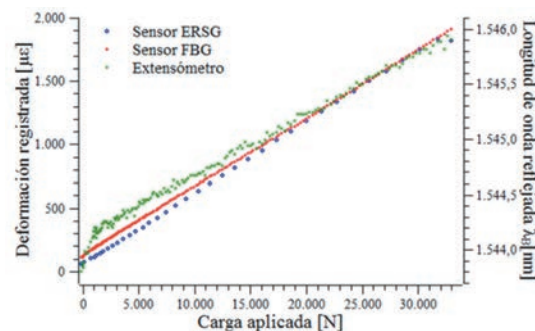
El experimento se realizó con una varilla estructural de 60 cm de largo y un diámetro de 10 mm. Sometida a varios ciclos de tensión a lo largo de su eje en su zona elástica en donde la fuerza aplicada varía entre 0 y 33 kN. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de análisis de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. La máquina se adecúa al tamaño de la muestra y se aseguran las mordazas que ejercen la tensión, se deben tener en cuenta ciertas precauciones para que los sensores queden libres y no se ejerza presión sobre ellos. En la Fig. 8 se observa la disposición de los sensores (izquierda), en esta imagen se identifican los sensores eléctricos y se debe tener en cuenta que la fibra óptica se adhiere en la parte posterior de la varilla, justo detrás de la galga extensiométrica. A la derecha de la Fig. 8, se tienen los datos obtenidos por cada uno de los sensores durante un ciclo de incremento de

la fuerza ejercida en la estructura, en esta gráfica se tiene la longitud de onda reflejada por el sensor FBG y las deformaciones medidas por los sensores ERSG y extensómetro contra la fuerza ejercida en la estructura.

Fig 8. A LA IZQUIERDA, IMAGEN DE LOS SENSORES DISPUESTOS EN LA ESTRUCTURA DURANTE EL EXPERIMENTO. EN LA IMAGEN DE LA DERECHA SE MUESTRAN LOS DATOS OBTENIDOS POR CADA UNO DE LOS SENSORES (DEFORMACIÓN Y LONGITUD DE ONDA), CONTRA LA FUERZA EJERCIDA EN LA ESTRUCTURA



Montaje del ensayo a tracción de una varilla estructural

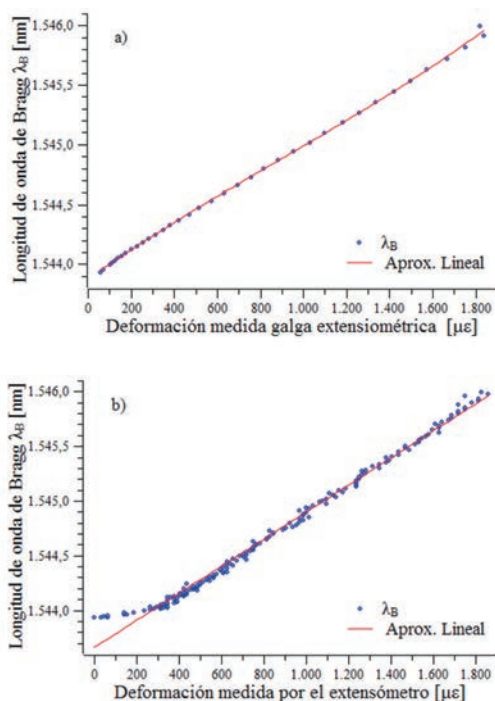


Fuente: autores.

La realización de este experimento tiene como resultado una comparación directa entre tres tecnologías de medición de deformación en una varilla estructural, se contrasta la longitud de onda reflejada por un sensor óptico tipo FBG con longitud de onda central de 1544 nm contra las medidas de deformación obtenidas a través de una galga extensiométrica y un extensómetro dispuestos en el mismo experimento. Los resultados obtenidos durante estas pruebas muestran una buena relación entre las medidas de cada uno de los sensores. La respuesta de cada uno es lineal con respecto a la fuerza ejercida y se encuentra en el mismo rango de medición de los demás sensores involucrados. En la Fig. 9a se presenta la relación entre los datos obtenidos por el sensor óptico FBG y la galga

extensiométrica, este resultado muestra una gran aproximación entre las medidas de cada uno de los sensores, la medida de la correlación entre estas dos series de datos es de  $R^2=09991$ . Por su parte, la Fig. 9b muestra la comparación entre las medidas obtenidas por el sensor óptico FBG versus la deformación medida a través del extensómetro. En esta gráfica, se tiene un comportamiento similar durante la mayor parte del tiempo de duración del experimento, en donde los datos coinciden y se comportan de manera lineal, sin embargo, durante la primera parte del experimento, no se observa un cambio constante en la longitud de onda reflejada por el sensor óptico FBG. Esto se debe a que dentro de las condiciones del ensayo se planteó un incremento constante del alargamiento de la estructura, no de la deformación, por lo tanto, al inicio del ensayo no se tiene una relación lineal entre el alargamiento y la tensión ejercida. Mientras que una vez se rompe la inercia en el sistema, estas dos variables tendrán un incremento constante, en esta comparación se obtiene una correlación entre los datos de  $R^2=09917$ .

Fig 9. SE MUESTRA LA COMPARACIÓN DIRECTA ENTRE LAS RESPUESTAS DE LOS SENSORES FBG Y ERSG DISPUESTOS EN EL ENSAYO A TRACCIÓN DE UNA VARILLA ESTRUCTURAL EN A), EN B) SE TIENE LA COMPARACIÓN DIRECTA ENTRE LAS RESPUESTAS DE LOS SENSORES FBG Y EXTENSÓMETRO DISPUESTOS EN EL ENSAYO A TRACCIÓN EN LA VARILLA ESTRUCTURAL



Fuente: autores.

## 5. CONCLUSIONES

La caracterización de los sensores FBG se llevó a cabo mediante la comparación de su respuesta contra la de un sensor eléctrico convencional tipo ERSG. Esta caracterización dio como resultado una correspondencia de  $1,19 \text{ pm} / \mu\epsilon$ . Esto es, una relación de cambio en la longitud reflejada de  $1,19 \text{ pm}$  por cada micro-strain inducido en la estructura.

El tratamiento de la señal emitida por los sensores FBG es necesario para la interpretación de los parámetros físicos medidos en la estructura, se realizó en una interfaz en el software LabView, la visualización de la dinámica en el tiempo de las deformaciones medidas en términos de  $\mu\epsilon$  y de temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ .

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos por los sensores FBG se dispusieron otros experimentos, el primero de ellos es el análisis de las deformaciones sufridas en diferentes zonas de una lámina metálica, para este experimento se aprovechó la ventaja de los sensores FBG en cuanto a multiplexación de sensores por longitud de onda. De la misma manera, estas mediciones son validadas contra un sensor ERSG y se obtiene un análisis del comportamiento de las deformaciones en cuatro puntos diferentes de la estructura a lo largo del tiempo.

Finalmente, se realiza el ensayo a tracción de una varilla estructural instrumentándola con sensores FBG, ERSG y con un extensómetro calibrado incorporado en la máquina hidráulica de ensayos industriales, el objetivo de este ensayo fue contrastar el comportamiento de cada uno de los sensores ya estudiados contra las mediciones registradas por el extensómetro. A partir de este ensayo, se obtiene una validación del sensor óptico tipo FBG para mediciones de deformación en estructuras, se obtienen resultados similares para el sensor FBG y el extensómetro y se comprueba la linealidad y repetibilidad de las medidas obtenidas con el sensor FBG.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente mediante el proyecto “Sensor óptico para monitoreo de estructuras” con código DIB 13279.

## REFERENCIAS

- [1] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings, "Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing"*. Boston: Artech House, 1999.
- [2] A. Méndez, "Fiber Bragg grating sensors: a market overview," presented at Third European Workshop on Optical Fibre Sensors, Napoli, Italy, 2007.
- [3] J. Albert, A. Cusano, A. Cutolo, "Fiber Bragg Grating Sensors: A Look Back, Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation," Bentham Science Publishers Ltd., 2011.
- [4] J. W. Miller y A. Méndez, "Fiber Bragg grating sensors: Market overview and new perspectives, de Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation" Bentham Science Publishers Ltd., 2011.
- [5] Liang Ren ; Hong-Nan Li ; Jing Zhou ; Dong-Sheng Li and Li Sun "Health monitoring system for offshore platform with fiber Bragg grating sensors", *Opt. Eng.* 45(8), 084401 (August 16, 2006). ; <http://dx.doi.org/10.1117/1.2335858>
- [6] Z. Zhou, T. Graver y J. Ou, "Techniques of advanced FBG sensors: Manufacturing, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges," *Pacific Science Review*, vol. 5, no. 1, pp. 116-121, 2003.
- [7] K. O. Hill y G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *Journal of Lightwave technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1263-1276, 1997.
- [8] T. Erdogan, "Fiber Grating Spectra," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1277 - 1294, 1997.
- [9] I. Bennion, J. A. R. Williams, L. Zhang, K. Sugden y N. Doran, "UV-written in-fiber bragg grating," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 28, pp. 93-135, 1996.
- [10] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson y B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Applied Physic Letters*, vol. 32, no. 10, pp. 647-649, 1978.
- [11] B. Malo, K. Hill, F. Bilodeau, D. Johnson and J. Albert, "Point-by-point fabrication of micro-bragg gratings in photosensitive fibre using single excimer pulse refractive index modification techniques," *Electronic Letters*, vol. 29, no. 18, pp. 1668-1669, 1993.
- [12] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson y J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by uv exposure through a phasemask," *Applied Physics Letters*, vol. 62, no. 10, pp. 1035-1037, 1993.
- [13] A. Othonos y X. Lee, "Novel and improved methods of writing Bragg gratings with phase masks," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 7, no. 10, pp. 1183-1185, 1995.
- [14] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. Leblanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam y E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [15] H. L. J. Ou, "Recent advances of structural health monitoring in mainland china", *Proc. of I International Conf. on Structural health monitoring and Intelligent Infrastructures*, 2003.
- [16] M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta and D. Bhattacharya, "Fibre bragg gratings in structural health monitoring—present status and applications", *Sensors and Actuators A: Physical*. vol. 147, pp 150-164, 2008.
- [17] E. J. Antilla, O. H. Krintila, T. K. Laurila, L. V. Lassila, P. K. Vallitu y R. G. Hernberg, "Evaluation of polymerization shrinkage and hydroscopic expansion of fiberreinforced biocomposites using optical fiber bragg grating sensors," *Dental Materials*, vol. 24, no. 12, pp. 1720-1727, 2008.
- [18] S. Prasad, M. Anitha, K. S. Rao y S. Asokan, "Measurement of stress-strain response of a rammed earth prism in compression using fiber bragg grating sensors," *International Journal on Smart Sensing and Intelligent systems*, vol. 4, no. 3, pp. 376-387, 2011.
- [19] J. López-Higuera, L. Rodríguez, A. Quintela y A. Cobo, "Fiber optic sensors in structural health monitoring," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 4, pp. 587-608, 2011.
- [20] W. Habel y K. Krebber, "Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering," *Photonic Sensors*, vol. 1, no. 3, pp. 268-280, 2011.
- [21] C. Venditozzi, G. Sindoni, C. Paris y P. del Marmo, "Application of an fbg sensors system for structural health monitoring and high performance trimming on racing yacht," presented at Fifth International Conference on Sensing Technology (ICST), Palmerston North, New Zealand, 2011.