

P

royecto eBridge 2.0 utiliza sensores de fibra óptica FBG para monitoreo de la salud estructural de puentes

Francisco Navarro Henríquez (*)
fnavarro@itcr.ac.c

1. Introducción

El proyecto de investigación que se desarrolla en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), denominado “*eBridge 2.0: sistema integrado para el desempeño de puentes*”, evalúa un sistema de instrumentación con sensores de fibra óptica FBG (*Fiber Bragg Grating*) que viene consolidándose en el monitoreo de la salud estructural de puentes, en pruebas no destructivas (NDT) estáticas y dinámicas con mediciones de deformación, desplazamiento, deflexión, temperatura y vibraciones.

Históricamente la fibra óptica ha sido utilizada en sistemas de comunicaciones que utilizan ondas luminosas para la transmisión y recepción de información. Pero desde el inicio de la década de los noventas se ha venido extendiendo la investigación en el campo de la optoelectrónica y, con esta, el desarrollo de productos en la industria de fibra óptica, especialmente la tecnología de sensores de fibra óptica. [1]

La tecnología de sensores de fibra óptica usa la fibra óptica ya sea como elemento sensor o como medio de transmisión de señales de un sensor remoto hacia un dispositivo electrónico que procesa las señales. Aunado al desarrollo de productos de alta calidad y confiables, ha ocurrido una rápida aceptación, e incluso el reemplazo en algunos casos, de los tradicionales sensores eléctricos, en una variedad de aplicaciones de detección, tales como: mediciones de deformación, esfuerzo (*strain*), temperatura, vibraciones, desplazamiento y deflexión, entre otras.

Particularmente en el área de aplicación de SHM, los sensores de fibra óptica han demostrado un gran potencial debido a que poseen una serie de ventajas únicas cuando se comparan con su contraparte tradicional.

La detección óptica usa luz en lugar de electricidad y fibra óptica estándar en lugar de cable de cobre. Las fibras ópticas, al no ser conductores de electricidad, son inmunes al ruido inducido por interferencia electromagnética (EMI) y a altos voltajes, así como resistentes a la corrosión metálica.

Además, son capaces de transmitir datos a largas distancias (hasta 10 km) con poca pérdida en la integridad de la señal. Igualmente, es posible interconectar múltiples sensores de fibra óptica con una sola fibra para reducir significativamente el tamaño, el peso y la complejidad de los sistemas de medición, y reducir potencialmente a largo plazo el costo de mantenimiento. [2]

Los sensores de fibra óptica son una alternativa muy apropiada para aplicaciones que se distribuyen o que abarcan una amplia zona geográfica. Decenas de sensores, incluyendo deformación, esfuerzo, aceleración y temperatura, pueden conectarse en cadena a lo largo de una sola fibra óptica. Los sensores ópticos son fiables para la instalación a largo plazo y, como resultado, se reduce el mantenimiento y la instalación de cableado requerido. Luego, la tecnología de sensores de fibra óptica permite realizar mediciones que antes eran imprácticas o, en algunos casos, imposibles con sensores convencionales.

2. Tecnologías de sensores de fibra óptica

En la actualidad existe una variedad de tecnologías de sensores ópticos, entre los cuales se pueden mencionar los interferómetros Fabry-Perot, Fiber Bragg Gratings (FBG), sensores distribuidos sobre la base de Rayleigh, Raman y técnicas de dispersión óptica de Brillouin. Dependiendo de la modulación de la luz y del efecto que se utiliza para medir los fenómenos físicos, estas tecnologías de detección óptica se pueden clasificar de la siguiente manera: [3]

- Intensidad
- Interferómetro
- Resonancia (Fabry-Perot)
- Distribución
- Polarimétrico
- Interferencia espectral (Fiber Bragg Grating)

Uno de los tipos de sensores ópticos más versátiles y ampliamente utilizados se denomina de rejilla de fibra Bragg (FBG, por sus siglas en inglés), el cual refleja una longitud de onda de luz específica que se transmite

en respuesta a variaciones de temperatura o esfuerzo (*strain*).

Desde su descubrimiento en 1978 por Ken Hill [4] y su posterior desarrollo por varios centros de investigación, las rejillas dentro del núcleo de la fibra se han utilizado ampliamente en la industria de las telecomunicaciones.

3. Fundamentos de sensores de fibra óptica FBG

El espectro de frecuencias luminosas se puede dividir en tres bandas generales: infrarrojo, visible y ultravioleta [5]. Cuando se manejan ondas electromagnéticas de mayor frecuencia, como las luminosas, se acostumbra a usar unidades de *longitud de onda* y no de frecuencia, puesto que el orden de las unidades de las frecuencias de las ondas luminosas va desde decenas de era-hercios (THz, 1×10^{12}) para luz infrarroja, hasta decenas de peta-hercios (PHz, 1×10^{15}) para la luz ultravioleta, prefijos no comúnmente empleados para la unidad de frecuencia. La longitud de onda se suele expresar en *nanómetros* (1 nm equivale a 1×10^{-9} metros).

Una fibra óptica está compuesta por tres componentes principales: el núcleo, el revestimiento y la capa protectora. El revestimiento refleja la onda de luz de regreso al núcleo, asegurando la transmisión de la luz en el núcleo. Esta acción es posible debido a un índice refractivo más alto en el núcleo en relación con el revestimiento, lo que provoca una total reflexión interna de luz. La capa protectora sirve para proteger la fibra de condiciones externas y de daños físicos. [6]

Un sensor de fibra óptica funciona al modular una o más propiedades de una onda de propagación de luz -incluyendo intensidad, fase, polarización y frecuencia- en respuesta a la variable física que se mide.

Los sensores de fibra óptica FBG son manufacturados aprovechando la tecnología actual en la industria de la fibra óptica para grado de telecomunicaciones, por medio de técnicas de exposición [7].

Dos configuraciones típicas consisten en exponer una pequeña porción de la fibra óptica a dos rayos de luz ultravioleta (UV) que interfieren un haz de luz UV enfocado a través de una máscara de fase. Esto crea en el núcleo de la fibra óptica una pequeña modulación periódica del índice de refracción. Esta alternación del índice refractivo de la fibra es per-

manente dada la intensidad de luz a la que es expuesto. La variación periódica que resulta en el índice refractivo se llama un *fiber Bragg grating*.

Debido a que la longitud de onda Bragg (λ_B) es una función de la separación entre las rejillas, los sensores de fibra óptica FBG pueden ser fabricados con varias longitudes de onda Bragg, lo cual permite a diferentes sensores FBG reflejar longitudes de onda de luz específicas.

La figura 1 muestra en forma esquemática las características de transmisión y reflexión en los sensores de fibra óptica FBG.

Un sistema de sensores de fibra óptica FBG se compone al menos de: [8]

- Fuente y detector de luz.
- Elementos sensores de fibra óptica FBG.
- Fibra óptica y accesorios para la interconexión de la fibra.

La fuente y el detector de luz del sistema se incorporan en un equipo denominado interrogador óptico. Los métodos de interrogación óptica pueden categorizarse como: multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) y multiplexación por división de tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*).

La figura 2 muestra un diagrama genérico de la arquitectura interna de un interrogador óptico de láser de barrido rápido (*swept wavelength laser*) que usa el método de interrogación WDM para un sistema de sensores de fibra óptica FBG.

Los interrogadores típicos proporcionan un rango de medición estándar de 80 nm, por lo que cada serie de sensores FBG puede incorporar hasta 20 sensores por canal del interrogador, siempre y cuando las longitudes de onda reflejadas no se traslapen en el espectro óptico. Para asegurar una adecuada operación, se acostumbra a dejar un rango aproximado de 4nm para el desplazamiento de la longitud de onda de los sensores de fibra óptica FBG.

4. Características de sensores de fibra óptica FBG para SHM

Los sistemas ópticos con sensores de fibra FBG han demostrado ser efectivos en el monitoreo de la salud estructural de obras civiles en diferentes áreas de aplicación, tales como: industria de petróleo y gas, generación eléctrica, transporte, aeroespacial e infraestructura civil. [9]

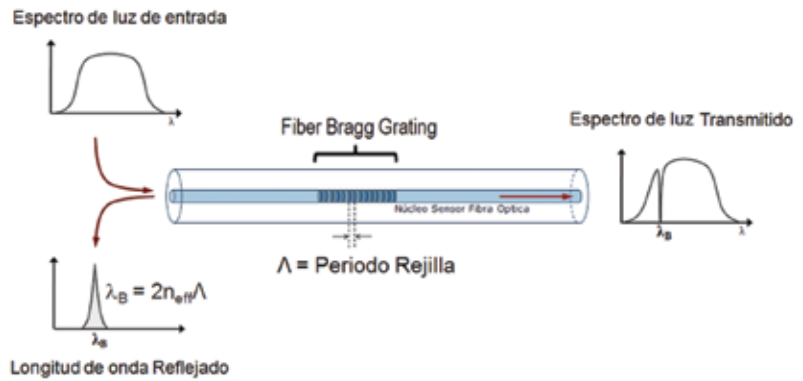


Figura 1. Operación de un sensor de fibra óptica FBG.

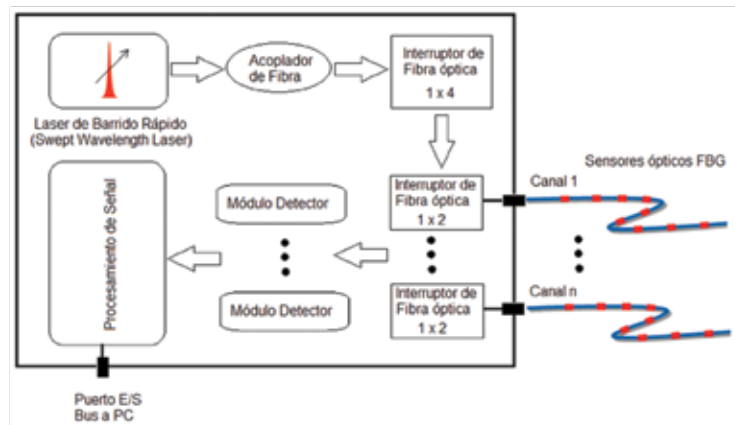


Figura 2. Diagrama interrogador láser de barrido rápido para sensores FBG.

Particularmente en la infraestructura de puentes, el monitoreo de la salud estructural basado en una plataforma de sensores FBG ha permitido implementar estrategias para la identificación de daños en varios niveles (detección, localización, tipificación, severidad), alertando por anticipado sobre posibles condiciones de riesgo de un puente. Además, si se cuenta con una base de datos y un sistema de monitoreo a largo plazo, es factible evaluar la magnitud de los daños y estimar la vida útil restante de una estructura. [10]

Entre las principales mediciones que se requiere realizar en pruebas no destructivas para valorar el estado o desempeño de un puente, se encuentran: deformaciones, desplazamiento, deflexión y vibraciones. Estas mediciones, estáticas o dinámicas, pueden relacionarse directamente con los siguientes tipos de sensores de fibra óptica FBG:

- Esfuerzo (strain)
- Temperatura
- Acelerómetros

A continuación se expone cada uno de los tipos de sensores FBG mencionados, tomando

como referencia el catálogo de productos de la empresa Micron Optics disponible en [11].

4.1 Medidor de esfuerzo (strain) FBG

La figura 3 muestra un sensor de esfuerzo (*strain*) de fibra óptica FBG con compensación de temperatura para medir deformación. Su tamaño aproximado es de 14cm de largo por 2,5 cm de ancho.

El límite de medición es de $\pm 2500\mu\epsilon$, con una sensibilidad $\approx 1.2\text{pm}/\mu\epsilon$. La vida útil por fatiga es de 100×10^6 ciclos a $\pm 2000\mu\epsilon$, con un rango operativo de temperatura de -40 a 80°C .

En cuanto a las especificaciones ópticas, el rango estándar de longitud de onda se extiende de 1512 a 1586nm, para un rango operativo de 74nm, dejando un distanciamiento recomendado de 4nm entre la medición de esfuerzo ($\mu\epsilon$) y la temperatura, para el desplazamiento de las longitudes de onda sin interferencia.

La figura 4 muestra en forma de bosquejo un gráfico sin escala con el espectro de las longitudes de onda de un sensor FBG de esfuerzo,



Figura 3. Sensor óptico FBG de esfuerzo. Os3155.

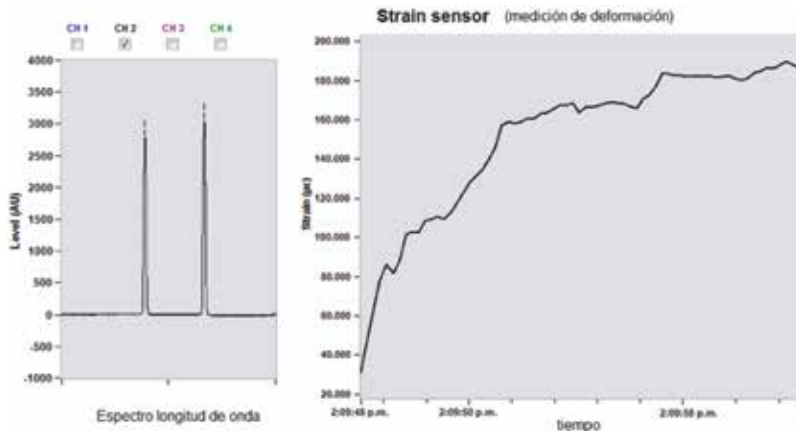


Figura 4. Curvas sensor óptico FBG de esfuerzo.



Figura 5. Sensor óptico FBG de temperatura.

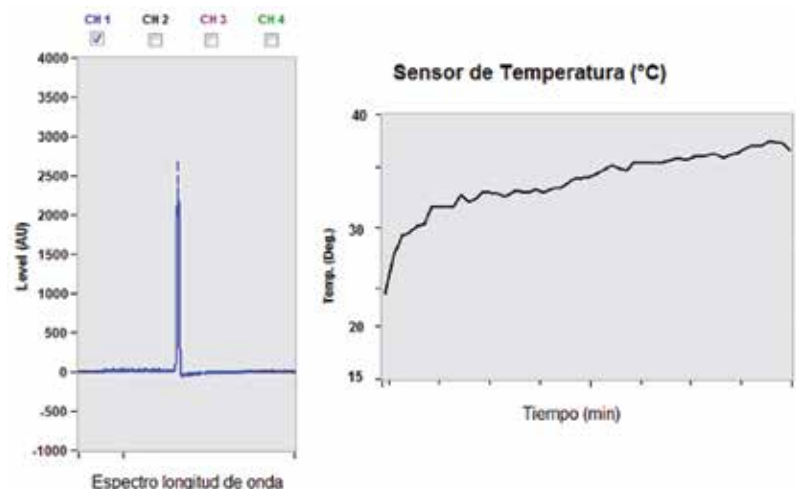


Figura 6. Ejemplo medición de temperatura de sensor óptico FBG.

compensado en temperatura y ejemplifica la correspondiente medición de $\mu\epsilon$.

4.2 Medidor de temperatura FBG

La figura 5 muestra varios sensores de temperatura de fibra óptica FBG. El os4100 es un medidor diseñado específicamente para proporcionar compensación de temperatura en mediciones de deformación. El os4230 es una sonda de temperatura robusta, cuyo cuerpo es un tubo de acero inoxidable sellado, que protege la FBG. El os4300 es un sensor de temperatura no metálico.

Tomando como referencia la sonda de temperatura para describir las características del sensor, el rango operativo de medición es de -40 a 120°C , o de -200 a 275°C , con una sensibilidad $\approx 10\text{pm}/^\circ\text{C}$ ($\pm 1.7^\circ\text{pm}/^\circ\text{C}$). El tiempo de respuesta es de 1,5 segundos y una exactitud a largo plazo de 1°C para la calibración estándar. En cuanto a las especificaciones ópticas, el rango estándar de longitud de onda se extiende de 1512 a 1588nm, para un rango operativo de 76nm, en intervalos de 4nm para el desplazamiento de las longitudes de onda sin interferencia.

La figura 6 muestra en forma de bosquejo un gráfico sin escala del espectro de la longitud de onda de un sensor FBG de temperatura y la medición de temperatura correspondiente.

4.3 Acelerómetros FBG

La figura 7 muestra acelerómetros de fibra óptica FBG para la medición de vibraciones. Los acelerómetros FBG pueden ser unidos a un bloque de montaje para configuraciones de uno, dos o tres de ejes, como se muestra en la figura.

El propósito de este tipo de sensor es realizar mediciones de la aceleración en grandes estructuras y en un rango de frecuencias bajas, desde 0 a 300 Hertz. Soporta un pico de impacto máximo de 100 g. El rango operativo de temperatura es de -40 a 80°C . Para propósito de análisis dinámico presenta una frecuencia de resonancia de aproximadamente 700 Hertz, con un peso de 28 gramos. Nótese que la frecuencia de resonancia del dispositivo es superior al rango de medición establecido y, por su peso, puede considerarse despreciable su contribución en los resultados de un análisis dinámico, aún en componentes de frecuencia de orden superior. En cuanto a las especificaciones ópticas, el rango

estándar de longitud de onda se extiende de 1516 a 1588nm, para un rango operativo de 72nm, con intervalos al menos de 4nm entre cada eje.

La figura 8 muestra en forma de bosquejo un gráfico sin escala del espectro de la longitud de onda de un acelerómetro óptico FBG y la medición de vibraciones correspondiente (1g equivale $\approx 9.8m/s^2$).

5. Referencias

[1] Kumar, K., Madhav, V. "Review on developments in fiber optical sensors and applications". SPIE Digital Library de la sociedad internacional de óptica y fotónica [en línea] [citado el 20 de agosto del 2013].

Disponible en: <http://spiedigitallibrary.org>

[2] "FBG Optical Sensing: A New Alternative for Challenging Strain Measurements". National Instruments, Inc. Austin, Texas, [en línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/opticalsensing/esa/>

[3] "Overview of Fiber Optic Sensing Technologies". NI-Tutorial-12953-en. National Instruments, Inc. [en línea]. Austin, Texas, junio 2011. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/12953/en/>

[4] K.O. Hill et al., "Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflective Filter Waveguide," Appl. Phys. Lett., Vol. 32, pp. 647-649, 1978.

[5] Tomasi, Wayne. "Sistemas de comunicaciones eléctricas". Cuarta edición, cap. 11, pp. 422-465, Pearson educación, México 2003.

[6] "Fundamentos de la Detección Óptica FBG". NI-Tutorial-11821-es. National Instruments, Inc. [en línea]. Austin, Texas, noviembre 2010. Disponible en:

<http://www.ni.com/white-paper/11821/es/>

[7] M. A., Davis, D. G. Bellemore, T. A. Berkoff y otros. "Fiber optic sensor system for bridge monitoring with both static load and dynamic modal sensing capabilities". SPIE Digital Library de la sociedad internacional de óptica y fotónica [en línea] [citado el 28 de agosto del 2013].

Disponible en: <http://spiedigitallibrary.org>

[8] "Optical fiber sensor guide: fundamentals and applications". Micron Optics, Inc. [en línea]. Atlanta, USA, Disponible en: http://www.micronoptics.com/technology/document_library/index.php

[9] Shijie Zheng, Gautam Naik y otros. "Sensing platforms for structural health monitoring". SPIE Digital Library de la sociedad internacional de óptica y fotónica [en línea] [citado el 2 de septiembre del 2013].

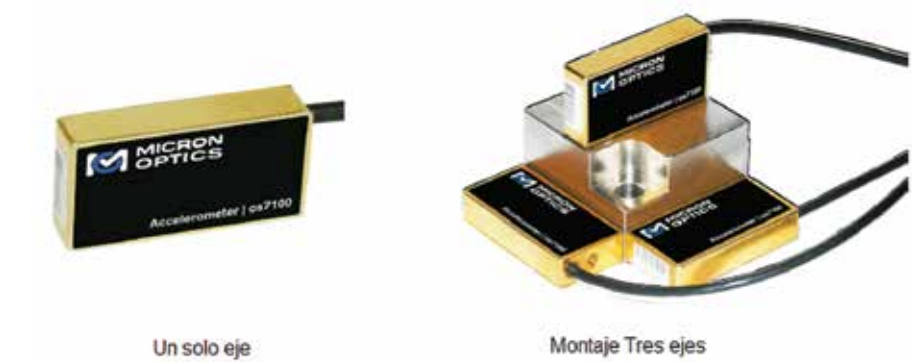


Figura 7. Acelerómetro FBG para medición de vibraciones. Os 7100.

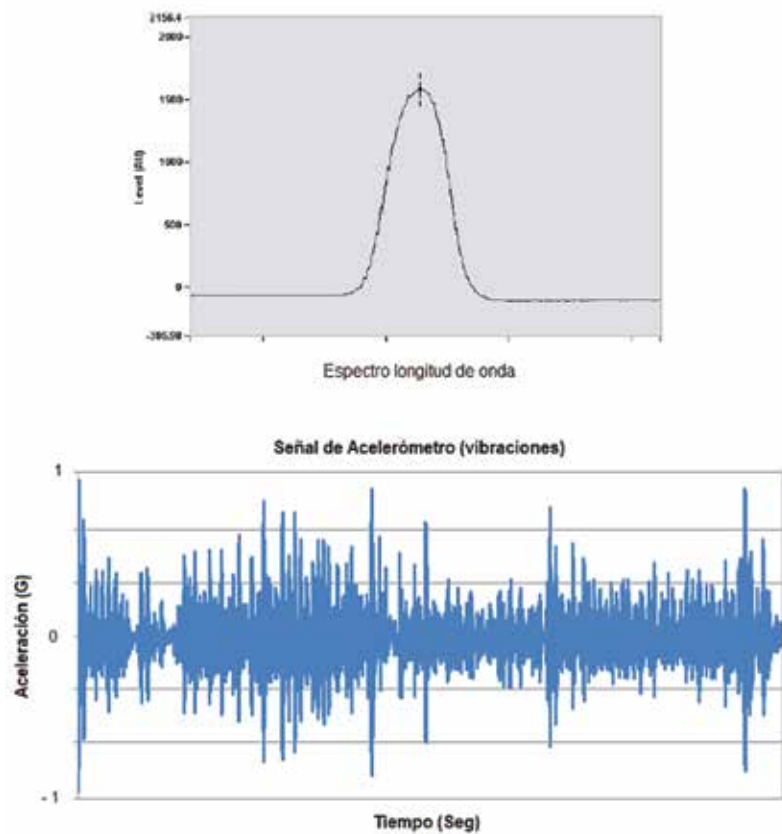


Figura 8. Ejemplo acelerómetro FBG para medición de vibraciones.

[10] Wenzel, Helmut. "Health Monitoring of Bridges". VCE Holding GmbH, John Wiley & Sons, Ltd., Vienna, Austria, 2009.

[11] "Optical fiber sensor datasheet". Micron Optics, Inc. [en línea]. Atlanta, USA, Disp. en: http://www.micronoptics.com/products/sensing_solutions/sensors/

(*)Francisco Navarro Henríquez es profesor e investigador del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) en la Escuela de Ingeniería Electrónica. Es ingeniero en electrónica y tiene una maestría en computación y una maestría en administración de negocios.