

Método de calibración para interrogadores de redes de Bragg en fibra óptica

Method of calibration for fiber Bragg grating interrogators

Pedro Salgado^{(1,*),} Sonia Martín López^{(2),} Ana Carrasco-Sanz^(3,S) y Pedro Corredera^(2,S)

1. Instituto Mexicano del Petróleo - IMP, México D. F., México.

2. Instituto de Óptica "Daza de Valdés", CSIC, C/Serrano 121, 28006 Madrid, Spain.

3. Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 18071, Granada, Spain.

*Email: pedro.salgado@io.cfmac.csic.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 03/10/2011. Revisado / Revised: 24/01/2012. Aceptado / Accepted: 04/06/2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.45.3.361>

RESUMEN:

Se ha desarrollado un método de calibración de interrogadores de redes de Bragg en fibra óptica que compara la respuesta del equipo de prueba con un simulador de red de Bragg compuesto por un filtro sintonizable unido a un espejo de fibra óptica. La longitud de onda simulada obtenida se mide con un interferómetro de referencia calibrado en el Instituto de Óptica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IO-CSIC). Este método de calibración ha sido aplicado para calibrar varios tipos de interrogadores de redes de Bragg: estáticos y dinámicos. La incertidumbre en la calibración absoluta de los interrogadores es de ± 88 pm, y es debida principalmente a la anchura espectral del filtro que simula la red de Bragg. Sin embargo, en calibraciones relativas la incertidumbre baja a ± 3 pm, dominado por la incertidumbre en la calibración del interferómetro de referencia.

Palabras clave: Redes de Bragg, Calibración de Longitud de Onda.

ABSTRACT:

We have developed a method of calibration for Bragg grating interrogators that compares the response of the test equipment with a Bragg Grating simulator consisting in a tunable filter and an optical fiber mirror. The obtained simulated wavelength is measured with a reference interferometer calibrated at the Instituto de Óptica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IO-CSIC). This calibration method has been applied to calibrate various types of Bragg gratings interrogators: static and dynamic. The uncertainty in the absolute calibration of the interrogators is ± 88 pm, which is mainly due to the spectral width of the filter that simulates the Bragg Grating. However, for a relative calibration the uncertainty is ± 3 pm, dominated by the uncertainty in the calibration of the reference interferometer.

Key words: Fiber Bragg Grating, Wavelength Calibration.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. J. M. López Higuera, *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, John Wiley & Sons Ltd. (2005).
- [2]. R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press Inc. (1999).
- [3]. Y.-J. Rao, "In fibre Bragg grating sensors", *Meas. Sci. Technol.* **8**, 355-375 (1997).
- [4]. IEC 62129: "Calibration of optical spectrum analyzers", Geneva (2007)
- [5]. PTFO008 IFA-CSIC: "Procedimiento para la calibración de analizadores de espectro óptico y medidores de longitud onda usando una fuente de emisión conocida" (2008).
- [6]. Evaluation of measurement data - Guide Expression Uncertainty in measurements, JCGM 100 (2008).

1. Introducción

En los últimos años se ha desarrollado de forma espectacular los sensores de fibra óptica. La mejora en la calidad, sensibilidad y margen dinámico de éstos los ha convertido en sustitutos ideales de los sensores tradicionales utilizados en medidas de rotación, aceleración, campos eléctricos y magnéticos, temperatura, presión, vibración acústica, posición, humedad, sustancias químicas, etc. Los sensores de fibra óptica tienen como ventajas que requieren poco espacio, las técnicas de sensado suelen ser no invasivas y se controlan de forma remota, que pueden trabajar en entornos hostiles y los sensores son de bajo peso, flexibles e inmunes a las interferencias electro-magnéticas.

Las redes de Bragg (*Fibre Bragg Grating*, FBG) son uno de los sensores de fibra óptica más utilizados por su facilidad de integrar en la propia fibra y la posibilidad de multiplexar en longitud de onda decenas de sensores en una única fibra [1].

Una red de Bragg consiste en un segmento de la propia fibra óptica en cuyo núcleo se ha grabado una variación de índice periódica que actúa como una red de difracción, de forma que refleja una única longitud de onda (λ_B). Esta longitud de onda reflejada se relaciona con la condición de Bragg como: $\lambda_B = 2n_e\Lambda$, donde n_e es el índice de refracción efectivo núcleo/revestimiento de la fibra y Λ es el periodo de la red (ver Fig. 1). Las redes de Bragg se fabrican de diversos tipos dependiendo de la aplicación específica que se les vaya a dar. De forma general se clasifican en redes de periodo

largo y corto, y pueden fabricarse en fibras estándar de telecomunicaciones, en fibras mantenedoras de polarización y en fibras de cristal fotónico. La longitud de la parte de fibra óptica donde se graba la red de Bragg para uso en sensores suele ser de entre 5 a 10 mm [1] y [2]. Siguiendo la condición de Bragg, la longitud de onda reflejada por la red de Bragg cambia en una magnitud ($\Delta\lambda_B$) linealmente con el "strain" y la temperatura (en un cierto rango de medida).

Aplicando este principio de funcionamiento se han desarrollado numerosos dispositivos sensores como hidrófonos, magnetómetros, giróscopos, acelerómetros, extensómetros, etc. En todos ellos la técnica de detección que se usa para la monitorización con redes de Bragg es la medida del desplazamiento de la longitud de onda que se produce cuando actúa la magnitud física a medir.

La bondad de las mediciones realizadas con redes de Bragg dependerá de la fiabilidad de los equipos de medida de la longitud de onda reflejada o transmitida por la FBG. Esta fiabilidad dependerá de la calibración de los interrogadores de redes de Bragg. La calibración de los equipos interrogadores de FBG consiste principalmente en establecer una relación entre la longitud de onda medida del interrogador a calibrar con respecto a la longitud de onda real, que normalmente se establece con una fuente conocida o fuente patrón. En este trabajo describimos un método de calibración realizado en el Instituto de Óptica del CSIC aplicable a los interrogadores en la región espectral entre 1420 y 1630 nm.

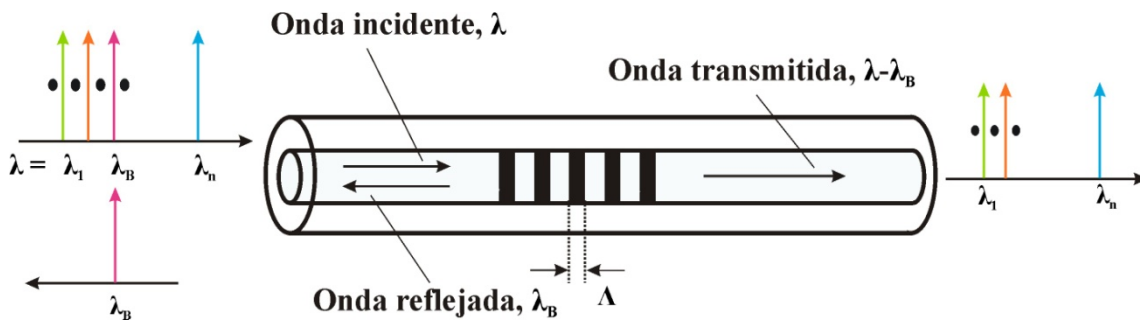


Fig. 1. Representación esquemática del funcionamiento de una red de Bragg.

2. Tipos de interrogadores de redes de Bragg

Los instrumentos de medida de las FBG (interrogadores), constan de una fuente de iluminación, un detector, un sistema de discriminación de la longitud de onda y un conjunto de funciones para el procesado de la señal. Dependiendo de las necesidades del dispositivo de sensado a interrogar (extensómetro o acelerómetro, por ejemplo) el interrogador será de respuesta rápida (>1 muestra/s, en adelante denominaremos como interrogadores dinámicos) o de respuesta lenta (<1 muestra/s, en adelante estáticos). Como norma general los interrogadores que muestran rangos largos de longitud de onda tendrán una respuesta dinámica más pobre y no superarán la tasa de muestreo de 1000 muestras/s, sin embargo los instrumentos que interrogan en bandas estrechas disponen de detectores rápidos (de ancho de banda superior a 1MHz) y son capaces de tener respuestas dinámicas de varios kHz.

Además de diferenciarse por la frecuencia de muestreo, los interrogadores de FBG se diferencian por la forma de interrogar los sensores. De forma general la interrogación la realizan de tres maneras [3]: mediante un láser de emisión monocromática y sintonizable que se refleja en la FBG y que se detecta en un detector de espectro ancho; mediante una fuente de espectro ancho (LED, ELED o ASE un amplificador óptico) y la potencia reflejada por la FBG se mide con un detector con selección de longitud de onda (analizador de espectros ópticos - OSA, detector con filtro de espectro estrecho sintonizable, Fabry Perot, o filtro interferencial, o por varios detectores filtrados con filtros de borde); finalmente mediante la detección de la interferencia de la señal emitida por una fuente y la reflejada en la propia FBG.

Normalmente, los fabricantes ajustan sus equipos mediante la comparación con un OSA calibrado [4] sobre una FBG similar a la usada como sensor. Este tipo de calibración tiene dos problemas: la dificultad de calibrar cuando el interrogador usa un láser sintonizable o un interferómetro que barren la FBG a velocidades superiores a los OSA, y por otra parte, en el caso

de los que convierten diferencias de potencia en longitud de onda mediante un filtro y detector, no se evalúan las posibles variaciones de la forma de la FBG y su influencia en la longitud de onda medida.

3. Descripción del método de calibración implementado

El método de calibración implementado pretende su aplicación extensiva a todos los posibles interrogadores de FBG tanto en la medida absoluta de la longitud de onda como en la medida de las variaciones de la longitud de onda respecto de una inicial (medida relativa).

El artefacto de calibración usado está compuesto por un filtro sintonizable (JDSU MAPF+1GGP01FA) unido a un espejo de fibra óptica que simulan una red de Bragg de 0,175 nm de anchura espectral (FWHM: *Full Width at Half Maximum*), similar a las FBG usadas habitualmente como sensores. La anchura espectral del filtro sintonizable usado es de 0,250 nm, sin embargo al usarse en reflexión mediante el espejo, el valor de la anchura espectral a mitad de altura se afina pasando a ser de 0,175 nm. Este artefacto de calibración puede ser sintonizado pm a pm en todas las longitudes de onda desde 1420 a 1630 nm (Fig. 2).

La longitud de onda reflejada por el artefacto de calibración se mide por comparación directa con un interferómetro de referencia. Este interferómetro está calibrado en el Instituto de Óptica del CSIC (IO-CSIC) [4,5]. Para poder hacer la calibración se ha introducido una fuente de espectro ancho a través de un *switch* de fibra óptica, para que alternativamente podamos medir la longitud de onda del artefacto de calibración con nuestro interferómetro de referencia y con el equipo bajo test.

Las ventajas del esquema de calibración propuesto son: la red de Bragg que forma el filtro sintonizable más el espejo tiene forma constante a lo largo de todo el espectro y no se deforma por torsión o tensión, como sucede a las redes de Bragg. La forma de la red de Bragg simulada por el artefacto se muestra en Fig. 3.

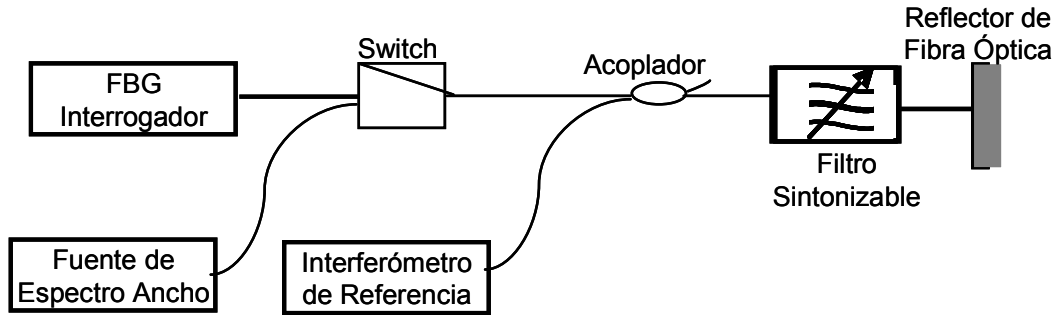


Fig. 2: Dibujo esquemático de la técnica de calibración.

Como puede verse la red simulada es simétrica respecto del centro, con forma gaussiana (que permite la determinación unívoca del pico independientemente del método implementado por el fabricante del interrogador), con una anchura espectral a mitad de altura de 0,175 nm y la influencia de los lóbulos laterales de la red de Bragg (ver figura insertada en Fig. 3) es inferior a 40 dB respecto del pico de la señal.

Distinguimos dos tipos de calibración para los interrogadores: calibrado absoluto, en el que se determina el error entre la longitud de onda indicada por el interrogador y la longitud de onda real, y calibrado relativo que determina la diferencia entre la variación de longitud de onda medida en el interrogador respecto de una longitud de onda inicial y las variaciones reales de ésta. El calibrado relativo es el que se precisa en los interrogadores FBG ya que la diferencia de longitud de onda es la que se relaciona con la magnitud física a sensar.

El método de calibración, en ambos casos, consiste en comparar la longitud de onda de referencia λ_{REF} medida en el interferómetro de referencia, con la longitud de onda λ_{TEST} medida por el interrogador. El factor de calibración para cada longitud de onda será, en el caso de la calibración absoluta:

$$K_\lambda = \lambda_{TEST} - \lambda_{REF}, \quad (1)$$

y, en el caso de la calibración relativa

$$\begin{aligned} \Delta K_\lambda &= \Delta \lambda_{TEST} - \Delta \lambda_{REF} = \\ &= (\lambda_{TEST} - \lambda_{0(TEST)}) - (\lambda_{REF} - \lambda_{0(TEST)}). \end{aligned} \quad (2)$$

Hay que aclarar que las longitudes de onda definidas en las fórmulas (1) y (2) pueden ser

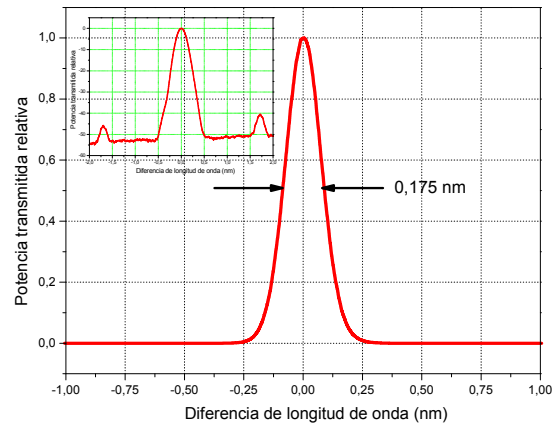


Fig. 3. Forma y anchura espectral de la red formada por el filtro sintonizable y el espejo. En el dibujo insertado se muestra en escala logarítmica resaltando el rechazo a los lóbulos laterales.

medidas de diferente manera por los interrogadores dependiendo del fabricante. Por ejemplo, algunos de ellos usarán el valor de pico de la señal medida y otros usarán el valor medio de la distribución de potencias medida. El interferómetro de referencia mide esta longitud de onda como el valor promedio de la distribución de potencia que le llega, que como es gaussiana, coinciden en el valor de pico y el valor promedio.

La incertidumbre en la determinación del factor de calibrado absoluto está afectada por:

- La resolución de muestreo del interrogador
- La resolución de lectura del interferómetro de referencia
- La anchura a mitad de altura de la red medida (considerada como una distribución gaussiana)

- La incertidumbre en la calibración absoluta del interferómetro de referencia.

La incertidumbre obtenida considerando estos factores para la calibración absoluta del filtro sintonizable es de $\pm 87,5$ pm [6], dominada por el ancho espectral óptico del mismo.

La incertidumbre en la determinación del factor de calibrado relativo está afectada por:

- La resolución de muestreo del interrogador.
- La resolución de lectura del filtro sintonizable.
- La incertidumbre en la calibración relativa del filtro sintonizable.

La incertidumbre en la calibración relativa en las condiciones controladas de laboratorio es de ± 3.1 pm, debida fundamentalmente a la incertidumbre en la medida de la longitud de onda del IO-CSIC en la tercera ventana de comunicaciones (1550 nm).

4. Aplicación a interrogadores estáticos y dinámicos

Se ha aplicado la técnica descrita a varios tipos de interrogadores mostrados en la Tabla 1. Los tres primeros miden la longitud de onda en las FBG mediante el barrido de una fuente láser sintonizable, calibrada con un filtro Fabry-Perot y detectando la señal con un detector síncrono. El último de ellos (FS 1500) interroga a las FBG mediante una fuente de espectro ancho, ocho filtros de borde y sendos detectores centrados en cuatro longitudes de onda fijas para las que está diseñado. Este tipo de interrogador no realiza ningún barrido mecánico y la diferencia de longitud de onda se calcula a través de parejas de señales detectadas por los conjuntos detectores-filtros.

Tabla I
Descripción de los interrogadores usados

Equipo (Fabricante)	Rango de λ (nm)	Velocidad de muestreo (muestras/s)	Resolución (pm)
FS 4200 (Fibersensing)	1510-1590	1	1,0
SM125-700 (Micron Optics)	1520-1570	de 1 a 1000	0,1
SM130-700 (Micron Optics)	1520-1570	de 1000 a 2000	0,1
FS 1500 (Fibersensing)	1542, 1547, 1555 y 1561	de 1000 a 4000	0,1

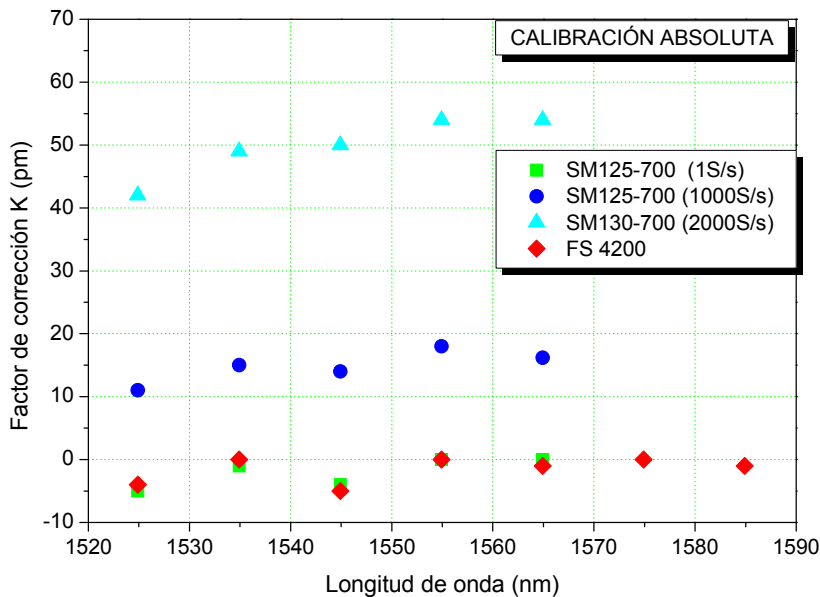


Fig. 4: Factor de calibración absoluto.

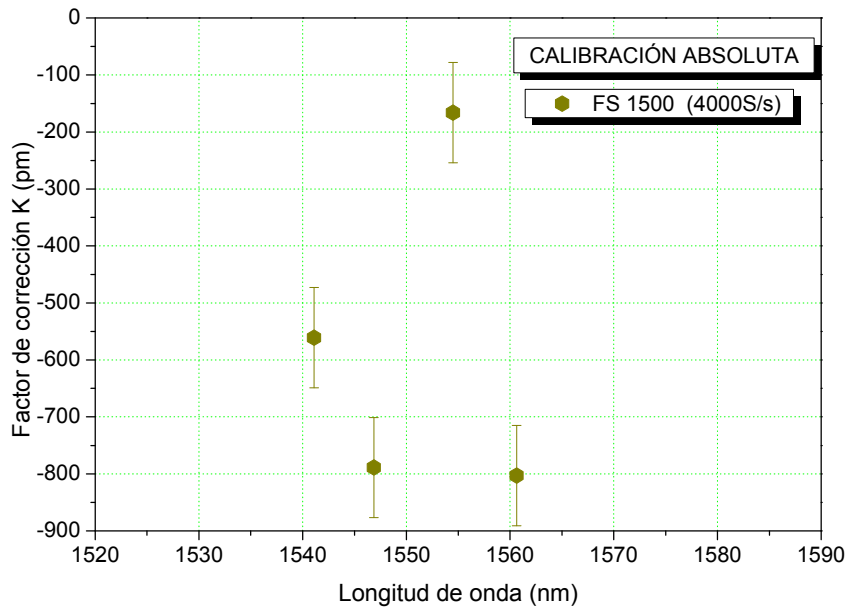


Fig. 5: Factor de calibración absoluto para FS-1500.

Los resultados de la calibración absoluta se muestran en las Figs. 4 y 5. Los interrogadores basados en fuentes sintonizables de espectro estrecho (con dispositivo interno de autocalibración), muestran diferencias entre la longitud de onda medida y la real inferior a la incertidumbre de la técnica (± 88 pm). También se aprecia que el error absoluto es mayor en los equipos que barren a frecuencias más altas. En particular los equipos que barren a 1 muestra/s tienen diferencias menores de -2 pm, el equipo que mide a 1000 muestras/s su error en la determinación de la longitud de onda está en $+15$ pm, y el equipo que mide a 2000 muestra/s presenta diferencias de alrededor de $+50$ pm. En el caso del FS-1500, que mide convirtiendo cambios de potencia en longitud de onda, presenta errores que van desde 150 a 800 pm dependiendo del canal (el equipo está diseñado para la medida en los canales correspondientes a las longitudes de onda 1541,7, 1547,6, 1554,7 y 1561,4 nm).

Como interrogadores de redes de Bragg se debe estimar los errores de medida relativa a la longitud de onda Bragg inicial. Esto se evalúa con la calibración relativa. La calibración relativa se ha realizado con el mismo sistema. Para los primeros cuatro interrogadores se ha realizado tomando como referencia la longitud de onda de 1535 nm, y barriendo ± 5 nm que equivalen a ± 5000 $\mu\epsilon$ en la medida de "strain".

En el caso del FS-1500 se ha realizado para cada uno de los canales de medida del interrogador y sobre el rango de medida que el equipo trabaja $\pm 1,6$ nm. Los resultados se muestran en las Fig. 6 y Fig. 7.

Al igual que en la calibración absoluta los interrogadores basados en fuentes estrechas sintonizables presentan diferencias en la variación de la longitud de onda inferiores a ± 3 pm, que está dentro de la incertidumbre de la técnica diseñada. Sin embargo el interrogador FS-1500 presenta también grandes diferencias respecto a la diferencia real que pueden llegar a ser de ± 300 pm.

5. Ventajas de la técnica

Encontramos las siguientes ventajas de este método como destacables:

- Es aplicable a todas las longitudes de onda en la que funciona el filtro sintonizable desde 1420 a 1630 nm.
- Con el artefacto de calibración se simula una red simétrica y puede usarse tanto en los interrogadores que determinan la longitud de onda como el valor de pico del espectro reflejado por la red, como para los interrogadores que determinan la longitud de onda de reflexión de la red como el valor promedio de la potencia óptica reflejada.

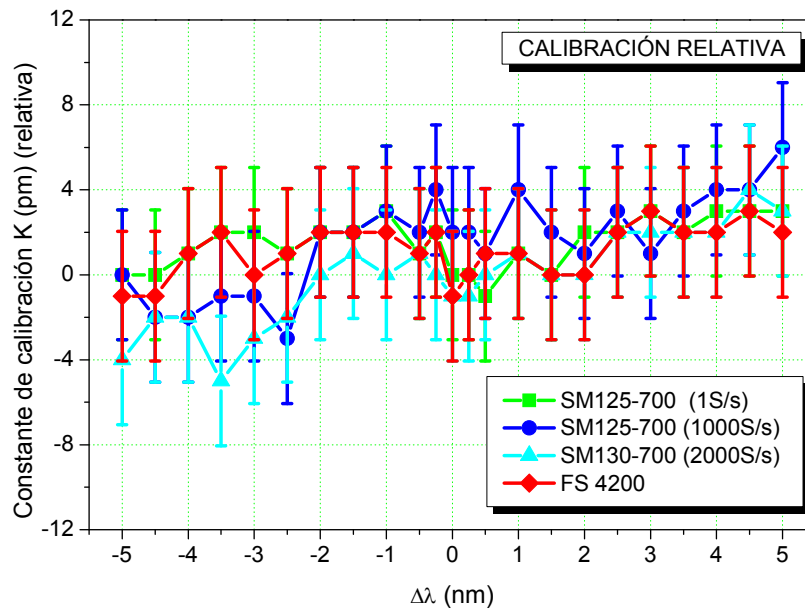


Fig. 6: Factor de calibración relativo.

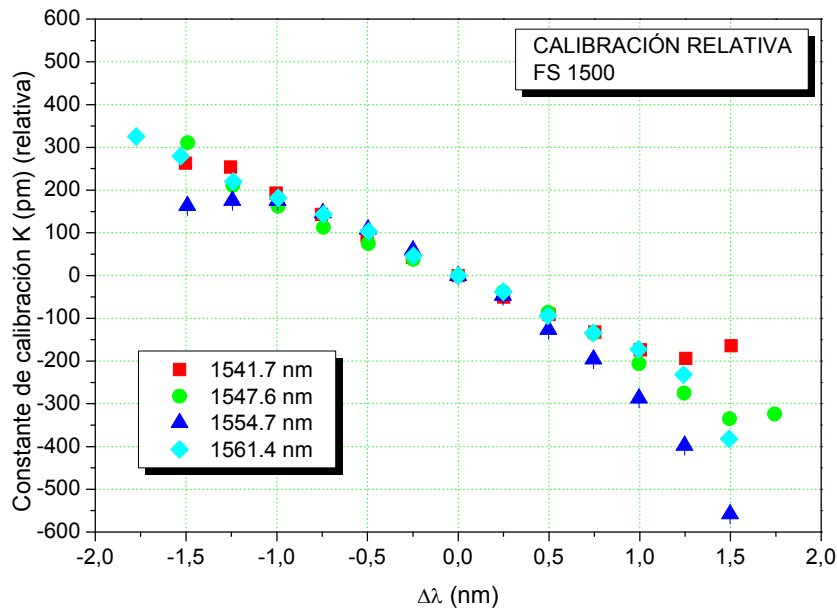


Fig. 7: Factor de calibración relativo FS-1550.

- El espectro de la luz reflejada en el artefacto de calibración no se deforma cuando se cambia de longitud de onda, por lo que no genera problemas en la calibración de equipos de gran rango de medida ($> \pm 5000$ pm).
- Es directamente trazable a los medidores interferómetros de referencia, que presentan la menor incertidumbre en la medida de la longitud de onda en comunicaciones ópticas.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un método de calibración absoluta y relativa de la longitud de onda medida con interrogadores de redes de Bragg. El método de calibración se basa en la comparación directa de la longitud de onda reflejada por un filtro sintonizable y un espejo, medida por un interferómetro de referencia con la medida por el interrogador de redes de Bragg.

La incertidumbre del método en la calibración absoluta de la longitud de onda es de ± 88 pm debido fundamentalmente a la incertidumbre que introduce la anchura espectral del filtro usado. Cuando se realiza la calibración en valores relativos (diferencia de la longitud de onda con respecto a una longitud de onda inicial) la incertidumbre en la diferencia de longitud de onda medida tiene una incertidumbre de ± 3 pm, debido fundamentalmente a la incertidumbre en la calibración del interferómetro de referencia del IO-CSIC.

Se ha aplicado este método de calibración a varios tipos de interrogadores de redes de Bragg: estáticos y dinámicos, y basados en fuentes láseres sintonizables sincronizadas, o los que convierten diferencias de potencia en longitud de onda. Los resultados obtenidos muestran que los interrogadores que disponen de un patrón de calibración interno presentan incertidumbre por debajo de la conseguida por esta técnica (± 3 pm), mientras que los otros equipos sin dispositivos de calibración interna

presentan errores e incertidumbres mucho más altos. Este método de calibración es aplicable a la mayoría de los interrogadores comerciales y en cualquier longitud de onda entre 1420 y 1630 nm.

Agradecimientos

Al Ministerio de Educación y Ciencia proyecto TEC2009-14423-C02-00, a la Comunidad Autónoma de Madrid a través del proyecto FACTOTEM2 (S2009/ESP-1781), al Ministerio de Fomento por los proyectos MIFFO (FOM-77/07) e IZONE (FOM-38/08).

Pedro Salgado Díaz agradece al Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y al "Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos", por el apoyo recibido.

Sonia Martín López agradece la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación a través de un contrato "Juan de la Cierva".