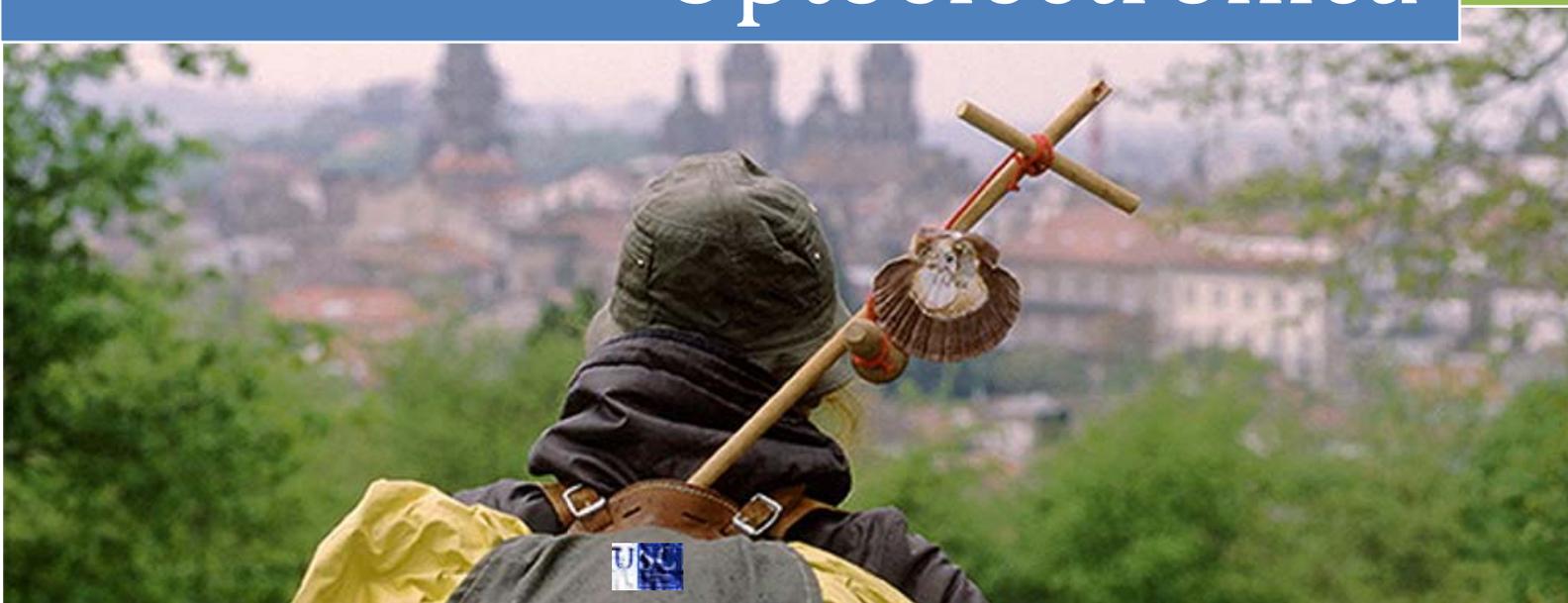




# 2017

## X Reunión Española de Optoelectrónica



Santiago de Compostela

12-14 Julio de 2017

**EDITADO POR:**

Justo Arines Piferrer

Manuel Blanco Fraga

María Teresa Flores Arias

María del Carmen Bao-Varela

María de la Inmaculada Aymerich López

**Publicado por:**

Asociación Científica de Óptica y Fotónica de Santiago

ISBN: 978-84-16989-81-2

ISBN 978-84-16989-81-2



# Medidas distribuidas a alta temperatura empleando fibra multimodo con cubierta de oro y un sensor BOTDA

## High temperature distributed measurements using multimode gold-coated fiber and BOTDA sensor

Rubén RUIZ-LOMBERA <sup>(1)</sup>, Ismail LAAROSI <sup>(1)</sup>, Luis RODRIGUEZ-COBO <sup>(1,2,3)</sup>, David PALLARES-ALDEITURRIAGA <sup>(1)</sup>, María Ángeles QUINTELA <sup>(1,2,3)</sup>, Jesús MIRAPEIX <sup>(1,2,3)</sup>, José Miguel LÓPEZ-HIGUERA <sup>(1,2,3)</sup>

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, Santander, España.
2. Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Cantabria, España.
3. Instituto de Investigación Sanitaria Valdecilla (IDIVAL), Cantabria, España

Persona de contacto: Rubén Ruiz-Lombera ([ruben.ruiz@unican.es](mailto:ruben.ruiz@unican.es)).

### RESUMEN:

En este trabajo se presenta un sensor distribuido basado en la dispersión estimulada de Brillouin combinado con el empleo de una fibra multimodo con cubierta de oro que permite la realización de medidas distribuidas a alta temperatura. Con este sistema de medida se han realizado medidas de zonas calientes en la fibra hasta alcanzar una temperatura máxima de 600°C sin que la fibra presente degradación en sus propiedades. La precisión de las medidas está en torno a los 10°C.

**Palabras clave:** Dispersión estimulada de Brillouin, medidas de alta temperatura, fibra cubierta de oro, sensor distribuido

### ABSTRACT:

We present a distributed sensor based on stimulated Brillouin scattering with a gold-coated multimode fiber to carry out high temperature distributed measurements. With this sensor system, it is possible to measure hotspots in the optical fiber up to 600°C ensuring that the optical fiber does not suffer any detrimental effect on its properties. The achieved accuracy of the measurements is about 10°C.

**Key words:** Stimulated Brillouin Scattering, high temperature measurements, gold-coated fiber, distributed sensor

## 1.- Introducción

Desde que apareció la primera propuesta para medir la temperatura a través del efecto Brillouin [1], los sensores Brillouin en el dominio del tiempo (*BOTDA*, *Brillouin Optical Time Domain Analysis*) han sido muy estudiados gracias a la gran capacidad que poseen estos sistemas distribuidos para medir tanto la temperatura como el *strain* a lo largo de una fibra óptica de decenas de kilómetros de longitud con una resolución espacial en torno al metro.

Están basados en la dispersión estimulada de Brillouin (*SBS*, *Stimulated Brillouin Scattering*) que consiste en la interacción de dos ondas contrapropagantes, la prueba y el bombeo, a través de los denominados fonones acústicos.

Al tratarse de sensores ópticos donde el elemento sensor es la fibra óptica, éstos presentan la ventaja de que son inmunes a las interferencias electromagnéticas, lo que hace que sean idóneos para ambientes industriales [2].

Estas características hacen que este tipo de sensores sean muy empleados en la monitorización de la salud estructural de edificios [3]. También existen aplicaciones para la detección de fugas en tuberías de gas, petróleo o agua [4], o la detección de fallos, generalmente debido a el sobrecalentamiento, en cables eléctricos [5]. Dependiendo del tipo aplicación, estos sistemas de monitorización también pueden estar desarrollados empleando otro tipo de dispersión conocida como dispersión Raman, pero sólo se ven afectados por cambios de temperatura, siendo insensibles al *strain*. Entre otras diferencias, los sensores Raman basan su funcionamiento en cambios entre las intensidades de las señales de Stokes y anti-Stokes medidas para calcular los cambios de temperatura, mientras que en los sensores basados en Brillouin, los cambios de temperatura o *strain* se reflejan en cambios en el desplazamiento que sufre la frecuencia de Brillouin (*BFS, Brillouin Frequency Shift*).

Existen aplicaciones en ciertos sectores industriales, en torno a los 300°C que han sido exploradas utilizando soluciones basadas en Raman. Pero realizar medidas a temperaturas más elevadas resulta una tarea difícil. Mediante el empleo de fibra dopada con germanio y fibra con el núcleo de silicio puro se ha llegado a medir hasta 600°C en un sistema basado dispersión Raman [6]. Pero el máximo de temperatura medido mediante un sensor distribuido ha sido de 1200°C gracias a un sistema BOTDA que emplea una fibra de cristal fotónico de silicio puro [7]. Por lo tanto, existen soluciones para la medida de altas temperaturas mediante el empleo de fibra óptica, pero poder hacer esas medidas en un escenario industrial ya se convierte en una tarea mucho más compleja.

Para temperaturas por debajo de los 300°C, la poliamida que recubre la fibra es una protección que puede resultar suficiente, pero si se superan estos valores hay que recurrir a otras opciones como son las fibras recubiertas con metal, como puede ser el oro o el aluminio [8]. Este tipo de fibras se suelen fabricar, por lo general, empleando una técnica conocida como el método de congelación (*freezing method*). Consiste en que la fibra desnuda pasa a través de una fina capa de unos pocos milímetros del metal fundido que se quiere depositar

sobre ella. Este metal se encuentra a una temperatura cercana a su punto de fusión, de manera que al entrar en contacto con la fibra, que se encuentra a una temperatura inferior, se solidifica sobre ella. Este tipo de fibras presentan la gran ventaja de que pueden soportar temperaturas muy elevadas, pero presentan una atenuación bastante elevada debido al hidrógeno y a las micro-curvaturas que sufre durante los distintos procesos térmicos.

En este trabajo se presenta un sistema BOTDA para medidas distribuidas a alta temperatura empleando fibra multimodo recubierta con oro. En comparación con otros artículos donde se trata el tema de las medidas distribuidas a alta temperatura empleando BOTDA [8], este sistema presenta la ventaja de que la fibra seleccionada puede ser empleada en escenarios reales soportando un amplio rango de temperaturas (desde -269 hasta 700°C), sin que la fibra pierda las propiedades de protección mecánica que tiene la cubierta de oro.

## 2.- Montaje experimental

La fibra de medida (*FUT, Fiber Under Test*) empleada es una fibra multimodo con la cubierta de oro. Por ello, en la Fig.1 (a) se describe de manera gráfica como es la conexión entre el sistema BOTDA, que emplea fibra monomodo, y la mencionada fibra. Se ha fusionado a cada uno de los extremos de la fibra recubierta con oro unos pocos metros de fibra multimodo de índice gradual convencional, y a continuación, otros tramos de fibra monomodo que dan acceso al sistema BOTDA, tanto a la señal de prueba como al bombeo. Los sistemas BOTDA, por lo general emplean fibra monomodo, ya que con ella se consigue un mejor rendimiento, pero existen algunos trabajos, tanto simulaciones teóricas como medidas experimentales, empleando fibra multimodo [9].

La fibra con cubierta de oro empleada es la AFS50/125/155G de la marca FiberGuide. Se trata de una fibra compuesta por un núcleo de 50µm de silicio puro y de un recubrimiento de silicio dopado con flúor de 125µm. Se ha empleado una longitud de 78m, de la que se colocan los 4 últimos metros dentro de un horno capaz de llegar hasta 1200°C. Como se ha

mencionado antes, este tipo de fibras presentan la desventaja de que tienen una gran atenuación, pudiendo llegar incluso hasta los 20dB/km, lo que dificulta el empleo de longitudes de fibra muy largos.

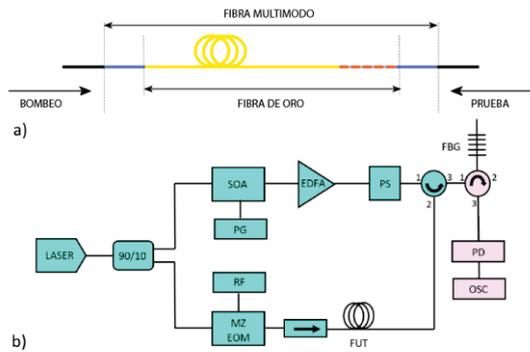


Fig. 1: Montajes experimentales. a) Descripción gráfica de la disposición de la fibra de medida. b) Sensor BOTDA.

En la Fig. 1 (b) se describe el montaje experimental empleado para llevar a cabo las medidas. El sistema BOTDA está formado por un láser DFB a 1550nm; a través de un acoplador óptico, la señal generada se divide por dos caminos ópticos que guiarán las señales de prueba y bombeo. La primera de ellas es una señal continua, modulada a una frecuencia en torno a los 10-11 GHz mediante un modulador electro-óptico y un generador de RF y se inyecta en la fibra bajo test. Sobre la frecuencia de la señal de prueba se hace un barrido para completar el espectro de ganancia de Brillouin (BGS, Brillouin Gain Spectrum) y poder obtener la frecuencia Brillouin de la fibra (BFS, Brillouin Frequency Shift). Por la otra parte se encuentra el bombeo. Gracias al empleo de un amplificador óptico semiconductor (SOA) se consigue obtener una señal pulsada con una gran relación de extinción de unos 40 dB. La duración de los pulsos, 10ns en este caso, marca la resolución espacial (1m) que tiene el sensor. Tras generar el pulso es necesario amplificarlo, mediante el empleo de un EDFA, para que llegue a la fibra con la potencia óptica necesaria para que se produzca el SBS. La última parte del montaje es la parte del filtrado y detección, donde se emplea una red de difracción de Bragg para eliminar una de las dos bandas laterales de la señal de prueba amplificada y un detector a 125 MHz conectado a una

tarjeta de adquisición. La señal capturada se promedia 1024 veces para mejorar la SNR.

### 3.- Medidas experimentales

Se han realizado medidas experimentales, con la ayuda de un horno, para verificar la capacidad que este montaje experimental tiene para la medida distribuida de altas temperaturas. Para ello se han introducido los últimos 4 metros de la fibra con cubierta de oro en el horno y se ha procedido a realizar ciclos, tanto de subida como de bajada, desde los 50°C hasta los 600°C con pasos de 50°C. Para comprobar la capacidad del sensor de repetir los mismos resultados se han realizado varias medidas para cada temperatura.

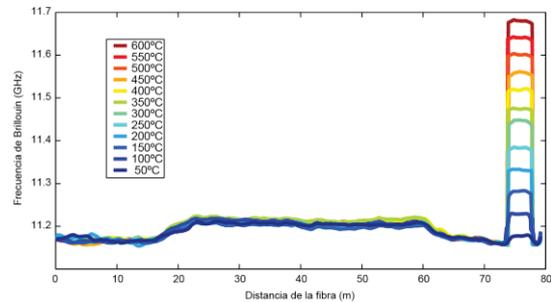


Fig. 2: Frecuencia de Brillouin durante el ciclo de calentamiento.

La Fig. 2 representa la BFS resultante tras realizar el ajuste Lorentziano sobre los datos medidos durante el ciclo de subida frente a la distancia de la fibra. Cada línea se corresponde con una medida realizada para cada temperatura. Se puede observar claramente cómo va aumentando el valor de la BFS con cada traza en la zona de la fibra que está en el horno. Una vez obtenidas todas las medidas, tanto de calentamiento como de enfriamiento, se realiza un ajuste entre la BFS estimada en la zona que se ha calentado y la temperatura de referencia que da el horno.

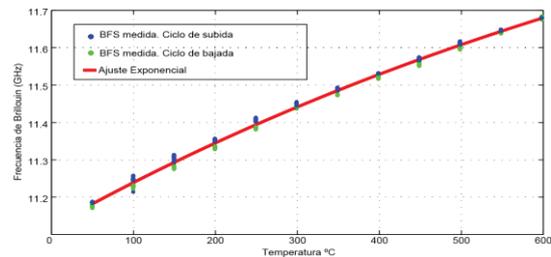


Fig. 3: Ajuste resultante entre la frecuencia de Brillouin obtenida y la temperatura.

En la Fig. 3 se muestra el resultado del ajuste obtenido. Los puntos azules se corresponden con las medidas realizadas durante el ciclo de subida y los verdes con el enfriamiento. Estos puntos representan el valor medio de la BFS en la zona que sufre los cambios de temperatura. El ajuste resultante se puede expresar mediante la siguiente expresión:

$$v_B = -1269e^{-0.00107T} + 12390 \quad (1)$$

Donde  $v_B$  es la BFS expresada en MHz y  $T$  la temperatura en Celsius. Aplicando la ecuación anterior sobre los datos medidos mediante el sensor y comparándolos con los que indica el horno se ha obtenido que el montaje desarrollado presenta un error medio de unos 10°C.

#### 4.- Conclusión

En este trabajo se ha comprobado experimentalmente la capacidad de un sensor distribuido BOTDA junto a una fibra multimodo recubierta con oro de alcanzar y medir temperaturas de hasta 600°C sin que la cubierta pierda sus propiedades mecánicas de protección y sin que la fibra sufra deterioro en sus características ópticas. Se ha comprobado como el sistema responde de manera eficaz en un rango de medidas desde los 50°C hasta los 600°C tanto para ciclos de calentamiento como de enfriamiento, ajustando su comportamiento a una curva exponencial negativa. Además, se ha estimado una precisión de medida de unos 10°C en todo el rango de trabajo del sensor.

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido cofinanciado por los proyectos TEC2013-47264-C2-1-R, TEC2016-76021-C2-2-R (AEI/FEDER, UE), por la beca BES-2014-069736 del gobierno de España y por la beca postdoctoral del parlamento de Cantabria.

#### Referencias

- [1] D. CULVERHOUSE, F. FARAH, C. PANNELL, and D. JACKSON, "Potential of stimulated brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors," *Electronics Letters*, vol. 25, no. 14, pp. 913–915, 1989.
- [2] I. TOCCAFONDO, T. NANNIPIERI, A. SIGNORINI, E. GUILLERMAIN, J. KUHNHENN, M. BRUGGER, and F. DI PASQUALE, "Raman distributed temperature sensing at cern," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 27, no. 20, pp. 2182–2185, 2015.
- [3] J. M. LÓPEZ-HIGUERA, L. RODRIGUEZ COBO, A. Q. INCERA, and A. COBO, "Fiber optic sensors in structural health monitoring," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 29, no. 4, pp. 587–608, 2011.
- [4] M. NIKLES, B. H. VOGEL, F. BRIFFOD, S. GROSSWIG, F. SAUSER, S. LUEBBECKE, A. BALS, and T. PFEIFFER, "Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring," in *Smart Structures and Materials*. International Society for Optics and Photonics, Conference Proceedings, pp. 18–25.
- [5] G. YILMAZ and S. E. KARLIK, "A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables," *Sensors and Actuators A:Physical*, vol. 125, no. 2, pp. 148–155, 2006.
- [6] S. MANDAL, S. DEKATE, B. K. LEE, R. GUIDA, M. MONDANOS, J. YEO, and M. GORANSON, "Characterization and calibration of raman based distributed temperature sensing system for 600 c operation," in *SPIE Sensing Technology+ Applications*. International Society for Optics and Photonics, Conference Proceedings, pp. 94 910A–94 910A–8.
- [7] Y. DONG, P. XU, C. FU, C. ZHANG, D. ZHOU, T. JIANG, H. ZHANG, Z. LU, L. CHEN, and X. BAO, "1200 c high-temperature distributed brillouin optical fiber sensing based on photonics crystal fiber," in *International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24)*. International Society for Optics and Photonics, Conference Proceedings, pp. 963 485–963 485–4.
- [8] T. REINSCH and J. HENNINGES, "Temperature-dependent characterization of optical fibres for distributed temperature sensing in hot geothermal wells," *Measurement Science and Technology*, vol. 21, no. 9, p. 094022, 2010.
- [9] A. MINARDO, R. BERNINI, and L. ZENI, "Experimental and numerical study on stimulated brillouin scattering in a graded-index multimode fiber," *Optics express*, vol. 22, no. 14, pp. 17 480–17 489, 2014.