

Calibración de resolución espacial y error de medida en sensores distribuidos de temperatura sobre fibra óptica

A. Herrero-Bermello⁽¹⁾, J. L. de Miguel⁽¹⁾, A. V. Velasco⁽¹⁾, J. Galindo-Santos⁽¹⁾
y P. Corredera^(1,2)

⁽¹⁾Instituto de Óptica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid 28006, España

⁽²⁾Tel. 915 61 88 06 ext. 208; e-mail: p.corredera@csic.es

RESUMEN: En este trabajo se presenta una técnica de fácil implementación para la calibración de sensores distribuidos sobre fibra óptica, capaz de caracterizar simultáneamente la resolución espacial y el error de medida. El método se basa en el uso de dos receptáculos de agua independientes de temperatura controlada. En el primero, más cercano al equipo interrogador, se caracteriza el error e incertidumbre de medida mediante un carrito de elevada longitud en ambiente controlado. En el segundo, ubicado en el límite del rango de medida, se introducen segmentos de fibra de longitud variable para verificación de resolución. La técnica propuesta se ejemplifica con la calibración experimental de un equipo comercial DTS basado en Raman espontáneo con resolución espacial teórica menor de 0.9 m y un rango de distancia de medida de 2 km.

1. INTRODUCCIÓN

Los sensores distribuidos de temperatura (DTS) basados en fibra óptica son dispositivos de monitorización de temperatura mediante reflectometría de luz láser pulsada, capaces de analizar de manera continua las modificaciones de temperatura; al contrario que otras alternativas quasi-distribuidas como las redes de Bragg [1]. Los sistemas DTS aprovechan fenómenos ópticos inherentes a las fibras ópticas, ya sean lineales como el scattering Rayleigh [2], o no lineales como el scattering Brillouin [3] y Raman [4]. Al tratarse de fenómenos inherentes a todas las fibras ópticas, estos sistemas permiten en muchos casos aprovechar fibras convencionales de telecomunicaciones ya instaladas [5]. Los mismos fenómenos no lineales pueden también ser aprovechados para amplificar de forma distribuida la luz láser [6], permitiendo a un solo equipo DTS alcanzar longitudes de monitorización de decenas de kilómetros [7]. Adicionalmente, presentan otras características ventajosas como bajo coste, tamaño reducido, inmunidad al ruido electromagnético, naturaleza químicamente inerte o robustez ante entornos extremos o no protegidos [8]. Estas ventajas han situado a los sistemas DTS en el foco de interés de la industria y la comunidad científica en los últimos años. Estos equipos son cada vez más requeridos para la monitorización de temperatura en áreas tan diversas como la aviónica, la producción energética, las redes de transporte o las canalizaciones de distribución de gas, petróleo o electricidad [9].

La gran acogida de estos dispositivos en el sector industrial ha llevado a la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) a trabajar en el desarrollo de estándares de evaluación de resolución, linealidad, error e incertidumbre de equipos DTS [10], con el fin de dotar a los mismos de trazabilidad. Sin embargo, la amplia longitud de sensor propia de estos sistemas, los elevados tiempos de medida y la significativa carga computacional resultante, suponen un obstáculo en la implementación de técnicas de calibración tipo. En este trabajo, presentamos una técnica de calibración de sistemas DTS que permite evaluar de forma precisa y simultánea la resolución y el error de medida y su incertidumbre.

2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

La técnica desarrollada para la calibración de dispositivos DTS basados en fibra proporciona una medida tanto del error de medición como de la resolución de la instrumentación DTS. Para ello son utilizados dos recipientes aislados y térmicamente controlados (**Fig. 1**), proporcionando el primero de ellos una caracterización del error y el segundo de la resolución espacial.

El primer recipiente (Rec_1) contiene un carrete de fibra sumergido de longitud L_2 igual al 10% de la longitud máxima de medida del dispositivo. Con el fin de adecuarnos al rango de temperaturas especificado por el fabricante para cada equipo DTS, este primer receptáculo cuenta con un minucioso control térmico mediante un termostato de alta precisión y estabilidad. Esto permite calibrar el error de medida a distintas temperaturas del medio acuoso (T_1, T_2, T_3). Para sistemas DTS industriales con un mayor rango de temperaturas [11] otros medios de calibración distintos al agua, con mayores temperaturas de ebullición y solidificación, pueden ser utilizados. Para evitar los efectos transitorios [12] a la salida del equipo DTS, el carrete L_2 es alejado una distancia L_1 del equipo emisor mediante un carrete auxiliar. Esto también permite la validación de la técnica en distintas regiones del rango espacial del dispositivo, variando la longitud L_1 de dicho carrete auxiliar.

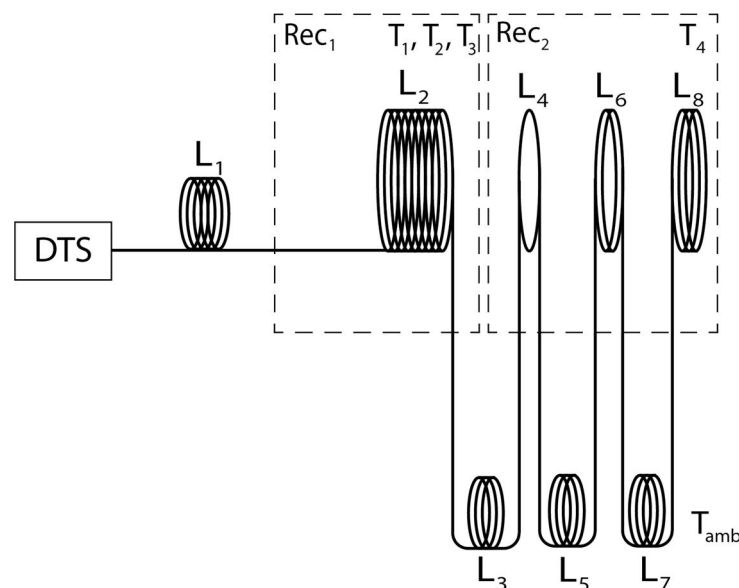


Fig.1: Esquema de calibración.

En el segundo receptáculo (Rec_2) se introducen tres segmentos de fibra de longitud creciente L_4 , L_6 y L_8 separados entre sí mediante dos segmentos auxiliares de longitudes L_5 y L_7 . Una tercera sección auxiliar de longitud L_3 es introducida para separar ambos recipientes. Al igual que con el carrete L_1 , esta tercera sección permite evaluar distintas regiones de medida. Las longitudes de las distintas secciones deben verificar las relaciones siguientes:

$$L_4 < R_{teo}; L_6 = R_{teo}; L_8 > 4 \cdot R_{teo} \quad (1)$$

$$L_5 = L_7 > 4 \cdot R_{teo} \quad (2)$$

Si la resolución teórica (R_{teo}) es correcta, la medición en el segmento L_8 debería alcanzar un valor estable igual a la temperatura del segundo recipiente (T_4); la medición en el segmento L_6 una

medida similar dentro de un rango del 10% respecto a la variación con la temperatura ambiente; y la medición en el segmento L_4 una medida menor que no representa adecuadamente dicha temperatura T_4 .

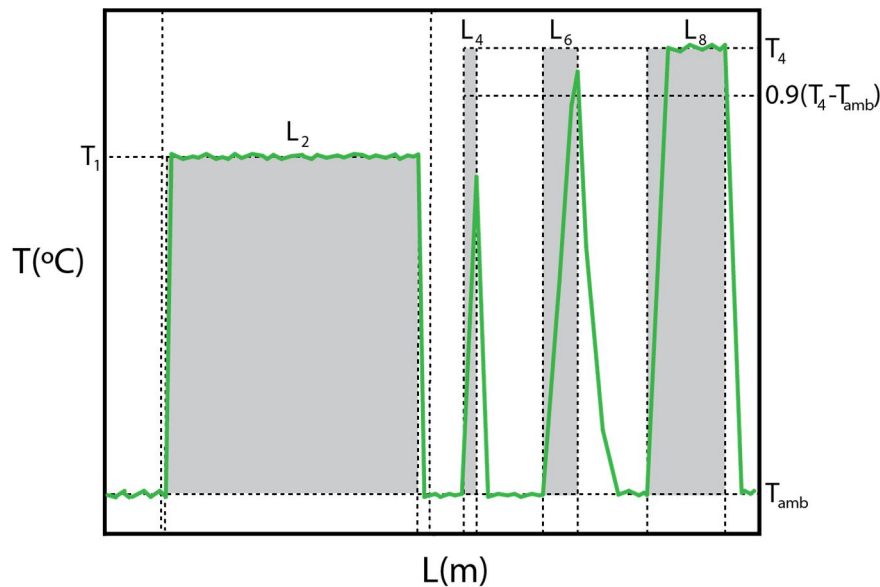


Fig.2: Ejemplo esquemático de una traza de calibración.

Los comportamientos descritos pueden observarse de manera esquemática en la traza de la **Fig. 2**. Una misma traza del DTS incorpora, por lo tanto, información de error de medida (diferencia entre T_1 y su caracterización en L_2) y de resolución (medidas relativas entre L_4 , L_6 y L_8). Adicionalmente, el esquema permite evaluar la linealidad en temperatura variando las condiciones de Rec_1 ; la linealidad en longitud variando L_1 ; así como la repetibilidad y los efectos de los parámetros de control del DTS (promediados, tiempos de medida, etc.).

3. APLICACIÓN EN UN DTS COMERCIAL

3.1 Descripción del equipo bajo test y del montaje experimental

El esquema de calibración propuesto se demostró con un equipo DTS comercial (N4385A-002, Agilent) basado en reflectometría Raman. El scattering Raman es un efecto no-lineal que genera dos bandas de amplificación, comúnmente denominadas Stokes y anti-Stokes [5]. La banda anti-Stokes presenta una dependencia con la temperatura mucho mayor que la banda Stokes, por lo que la medida relativa de potencia entre ambas, resuelta temporalmente, proporciona una medida distribuida de la temperatura de la fibra. Utilizando esta tecnología, el equipo bajo test proporciona una resolución espacial teórica menor de 0.9 m en un rango de distancias de 2 km. El dispositivo opera en un rango de temperaturas comprendido entre -10 °C y $+60\text{ °C}$, con una resolución en temperatura del orden de 0.12 °C , una repetibilidad de 0.8 °C , y una desviación estándar de 1 °C en la medida absoluta.

En la calibración del equipo se utilizó fibra multimodo de gradiente de índice G.651, caracterizada por una apertura numérica de 0.2 y $50/125\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro de núcleo/cladding. Para la evaluación del error de medida las longitudes de los segmentos utilizados fueron de $L_1 \approx 500\text{ m}$ y $L_2 \approx 200\text{ m}$, realizando medidas a tres temperaturas diferentes dentro del rango del equipo ($T_1 = 25\text{ °C}$; $T_2 = 45\text{ °C}$; $T_3 = 65\text{ °C}$). La monitorización de la temperatura del primer recipiente, Rec_1 ,

se llevó a cabo mediante un termómetro Delta Ohm, modelo HD2101.1R, con una resolución de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el rango de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el caso de la validación de la resolución, se utilizaron segmentos de longitudes $L_3 \approx 650\text{ m}$, $L_4 = 0.4\text{ m}$, $L_5 \approx 10\text{ m}$, $L_6 = 0.8\text{ m}$, $L_7 \approx 10\text{ m}$ y $L_8 = 10\text{ m}$, manteniendo el segundo recipiente Rec_2 a una temperatura de referencia constante de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para cada uno de los tiempos de adquisición bajo análisis (30 segundos, 5 minutos y 10 minutos) se realizaron 20 medidas en condiciones estables. En la **Fig. 3** se pueden ver ejemplos de las trazas experimentales capturadas.

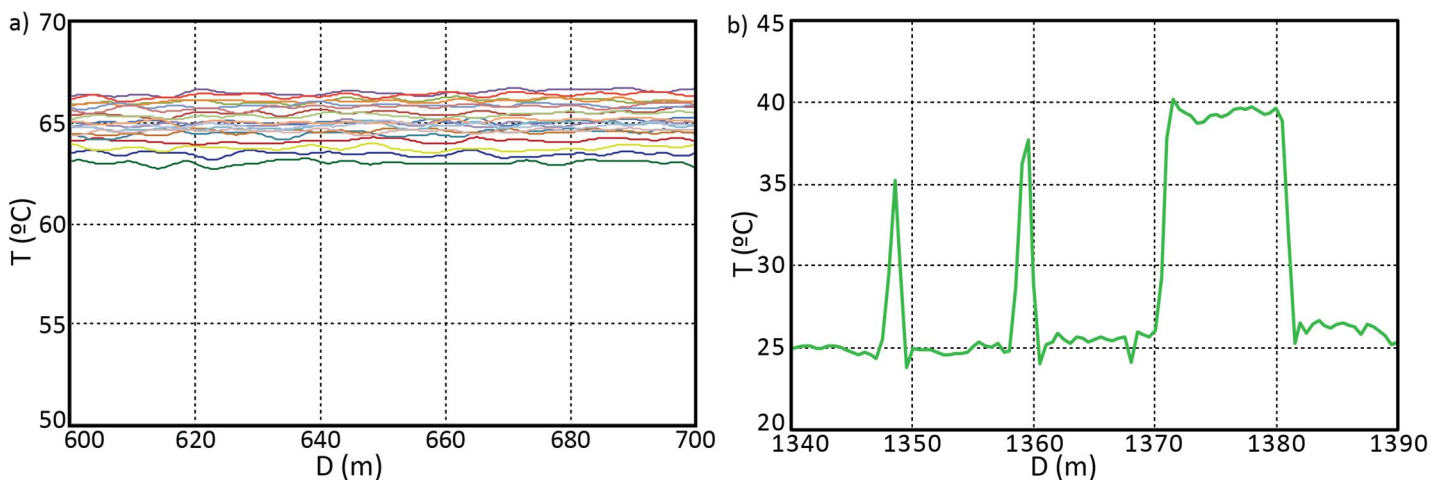


Fig.3:Trazas experimentales de la calibración del equipo DTS N4385A-002 en los segmentos L_2 (a) y L_4 - L_6 (b).

3.2 Resolución

Para validar el método de calibración, la caracterización de la resolución en el segundo recipiente se repitió asumiendo tres resoluciones teóricas distintas en torno al valor establecido por el fabricante. En particular, se modificaron las longitudes de los segmentos L_4 y L_6 , de acuerdo con la Eq. 1 para los valores $R_{teo} = 0.8\text{ m}$, $R_{teo} = 1\text{ m}$ y $R_{teo} = 1.2\text{ m}$. En la **Fig. 4** puede observarse que a partir de $L_6 = 0.8\text{ m}$ se alcanza el umbral mínimo establecido como válido (10% de error en la medida de la diferencia de temperatura entre el ambiente y el segundo recipiente), validando así las especificaciones del fabricante. El error de medida pasa a ser constante para resoluciones mayores o iguales a 1 m . Para resoluciones menores a 0.8 m , la medida proporcionada por el equipo DTS difiere significativamente de la temperatura real del medio, desaconsejando por lo tanto su uso.

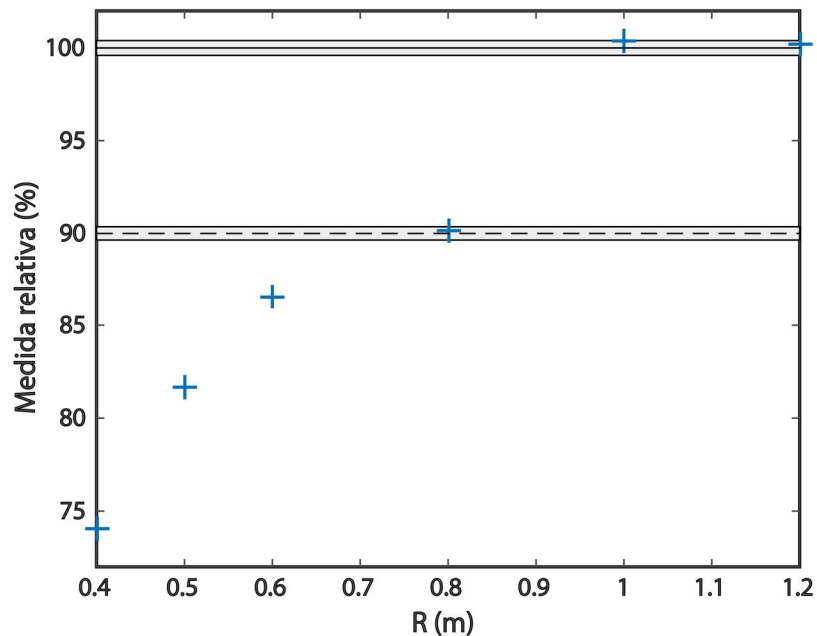


Fig.4: Medida relativa proporcionada por los segmentos L_4 y L_6 respecto a L_8 en función de su longitud. Las bandas grises indican la desviación típica de las medidas proporcionadas por el segmento L_8 .

3.3 Error de medida

Con las medidas de cada grupo de 20 trazas para los tres tiempos de adquisición (30 segundos, 5 minutos y 10 minutos) y a las tres temperaturas de estudio ($T_1 = 25\text{ °C}$; $T_2 = 45\text{ °C}$; $T_3 = 65\text{ °C}$), se calcularon tanto el error promedio en la medida de temperatura como la desviación típica en torno a dicho promedio. Tal y como se puede observar en la **Fig. 5**, el error de medida de temperatura puede presentar signos contrarios en distintas franjas de temperatura, imposibilitando la aplicación de un factor de corrección constante o monótonico. Asimismo, el error de medida no disminuye para tiempos de adquisición elevados, pero se mejora ligeramente la repetibilidad entre medidas, especialmente para temperaturas bajas, tal y como se observa en los coeficientes de variación (σ_T/T) de la **Tabla 1**. En todos los casos, el error absoluto de medida está por debajo de 1.6 °C y los coeficientes de variación por debajo de 0.4% , de nuevo dentro de las especificaciones del fabricante.

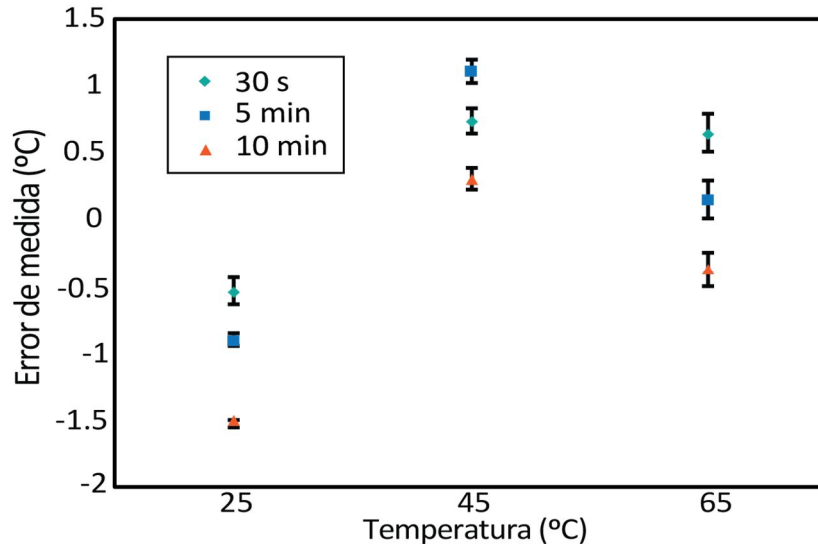


Fig. 5: Error promedio de medida de la temperatura y desviación típica para las tres temperaturas de estudio y los tres tiempos de adquisición utilizados.

	25 °C	45 °C	65 °C
30 s	0.40%	0.22%	0.22%
5 min	0.28%	0.22%	0.23%
10 min	0.12%	0.18%	0.20%

Tabla 1: Repetibilidad de medida (σ_{π}/T).

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un esquema de calibración de sensores distribuidos de temperatura basados en fibra óptica, capaz de evaluar simultáneamente error de medida, resolución y repetibilidad. El sistema ha sido demostrado experimentalmente mediante la calibración de un equipo comercial N4385A-002 Agilent basado en reflectometría Raman con una resolución menor de 0.9 m en un rango de longitud de 2 km. La técnica es fácilmente escalable a cualquier otra combinación de prestaciones variando la longitud de los segmentos de fibra. La calibración propuesta resulta de elevada utilidad para sensado en sectores tan diversos como generación y distribución de energía, aeronáutica, redes de transporte o detección de incendios.

5. REFERENCIAS

- [1] J. Y. Rao, Meas. Sci. Tech. **8** (1997) 355.
- [2] J. Jin, H. Zhang, J. Liu, Y. Li, IEEE Sens. J. **16** (2016) 8928.
- [3] T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda, Opt. Lett. **15** (1990) 1038.
- [4] G. Bolognini, A. Hartog, Opt. Fib. Tech. **19** (2013) 678.
- [5] J. S. Selker, L. Thévenaz, H. Huwald, A. Mallet, W. Luxemburg, N. van de Giesen, M. Stejskal, J. Zeman, M. Westhoff, M. B. Parlange, Water Resour. Res. **42** (2006) W12202.

- [6] F. Rodríguez-Barrios, S. Martín-López, A. Carrasco-Sanz, P. Corredera, J. D. Ania-Castañón, L. Thévenaz, M. González-Herráez, J. Lighthwave Tech. **28** (2010) 2162.
- [7] X. Angulo-Vinuesa, M. A. Soto, S. Martin-Lopez, S. Chin, J. D. Ania-Castañón, P. Corredera, E. Rochat, M. Gonzalez-Herraez, L. Thévenaz, 22nd Inter. Conf. Opt. Fiber Sens. (2012) 8421C9.
- [8] A. Ukil, H. Braendle, P. Krippner, IEEE Sens. J. **12** (2012) 885.
- [9] D. Inaudi, B. Glisic, J. Pressure Vessel Tech. **131** (2009) 011701.
- [10] IEC 61757-3-1/Ed1, "Fibre optic sensors- Part 3-1: Temperature measurement- Distributed sensing," (2015). <http://www.iec.ch/>.
- [11] G. R. Williams, G. Brown, W. Hawthorne, A.H. Hartog, P.C. Waite, in Environmental and Industrial Sensing, Inter. Soc. Opt. Phot., 2000.
- [12] B. Walker, Measurement Good Practice Guide **31** (2000).

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el Ministerio de Economía y competitividad (MINECO) de España a través de los proyectos TEC2015-71127-C2-1-R y TEC2015-71127-C2-2-R, la Comunidad de Madrid (programa SINFOTON-CM S2013/MIT-2790), y EURAMET a través del proyectos JRP-i22 14IND13-PhotInd y el programa de investigación e innovación del Horizonte 2020 de la Unión Europea a través del proyecto Marie Skłodowska-Curie No. 734331 (SENSIBLE). La iniciativa EMPIR está co-financiada por los países participantes y el programa de investigación e innovación del Horizonte 2020 de la Unión Europea. Aitor V. Velasco agradece al MINECO el contrato FJCI-2014-22836.