

Evaluación de FBGs como sensores de alta temperatura en aplicaciones de energía solar concentrada



Manuel JEREZ¹, Alejandro CARBALLAR¹, Joaquín GRANADO¹

¹ Dep. Ingeniería Electrónica – E.T.S. de Ingeniería – Universidad de Sevilla;
C/ Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla (Spain);
mjerez@us.es (M.J.), carballar@us.es (A.C.), j.granado@us.es (J.G.)

*Contacto: Manuel JEREZ (mjerez@us.es)



INTRODUCCIÓN

Objetivo: Evaluar y comparar el uso de distintos tipos de sensores FBG en aplicaciones de Energía Solar de Concentración (CSP/CST)

Redes de Difracción de Bragg en Fibra (FBGs)

El desarrollo de sensores ópticos en los últimos años ha estado ligado a los avances en el uso de FBGs, que se han consolidado como una de las tecnologías más extendidas para la medición en entornos extremos [1]. Aunque las FBGs de zafiro están cobrando protagonismo [4], existen dos técnicas ampliamente adoptadas en la industria para la fabricación de FBGs en fibras ópticas de alta temperatura: las FBGs inscritas con láser de femtosegundo (fsFBGs) [5,6] y las FBGs regeneradas (rFBGs) [5,7].

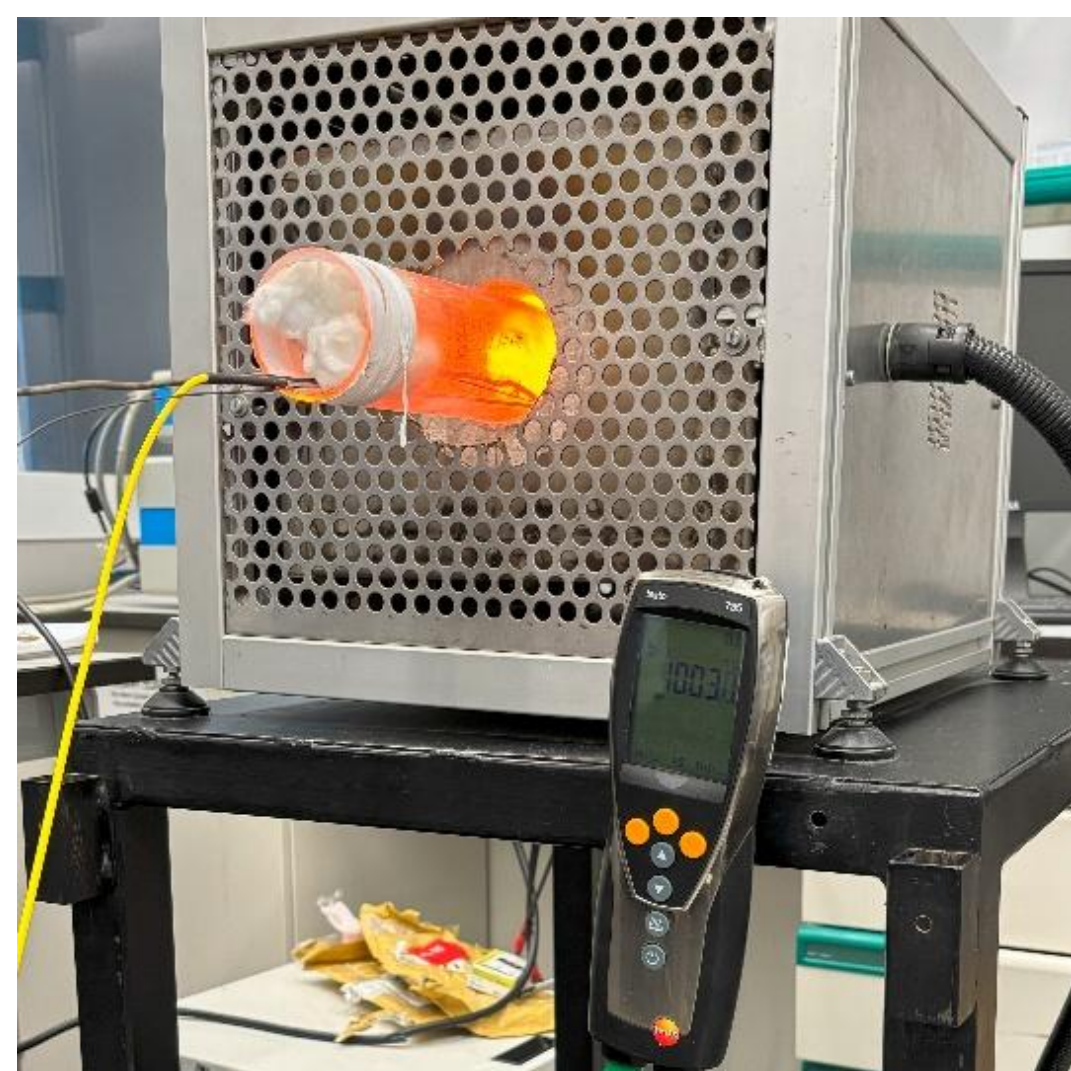
¿Por qué usarlas en aplicaciones CSP?

El uso de FBGs como sensores de temperatura en los receptores CSP surge como una opción viable para afrontar las condiciones extremas, con temperaturas superiores a 1000°C y niveles de radiación muy altos, presentes en estos sistemas de generación de energía renovable [2]. En este entorno, el uso de termopares y otros sensores tradicionales se hace difícil debido a los altos niveles de radiación, los cuales adulteran la medida y favorecen la descalibración, impidiendo su uso durante largos períodos de tiempo [3].

METODOLOGÍA

Montaje

Cada sensor fsFBG se colocó junto a uno de los rFBG en un horno tubular THHR/60/250/1300, acompañado de un termopar tipo K (TC K 003) utilizado como referencia de temperatura; uniendo los tres sensores con un hilo de platino para garantizar la coherencia espacial. Los experimentos se llevaron a cabo en el Centro de Investigación, Tecnología e Innovación de la Universidad de Sevilla (CITIUS).



Montaje experimental en el horno tubular

Experimentos realizados

El procedimiento en el horno consistió en incrementar progresivamente la temperatura hasta 1000°C, realizando distintas paradas en temperaturas intermedias donde tomar medidas. Una vez alcanzados los 1000°C, la temperatura se redujo a 750°C, seguida de un nuevo incremento hasta 1000°C. Además, se realizó una caracterización de los sensores a temperatura ambiente para analizar sus propiedades ópticas.

CONCLUSIONES

El estudio realizado ha demostrado que es posible obtener mediciones de temperatura consistentes y precisas hasta 1000°C utilizando tanto FBGs inscritas con láser de femtosegundo como FBGs regeneradas.

Entre las dos, las fsFBGs requerirían una recalibración para ampliar su rango operativo y garantizar la precisión de las mediciones. Dentro del rango de temperatura en el que ambos tipos de sensores se superponen, las dos fsFBGs proporcionaron mejores resultados que las rFBGs en comparación con el termopar de referencia. Esta mejora podría atribuirse al uso de un polinomio de grado superior. Entre las dos FBGs regeneradas, la integrada en el capilar de acero presentó mediciones más cercanas a las del termopar.

En cuanto a su posible aplicación en sistemas CSP, las fsFBGs parecen ser la opción más adecuada debido a la precisión en la fabricación y la capacidad de multiplexación que nos provee el fabricante, disminuyendo los costos y ofreciendo mayor control sobre los sensores, siendo su fabricación más cercana al diseño original.

Además, su potencia reflejada significativamente mayor y su perfil de potencia en comparación con las FBGs regeneradas permitirían una operación prolongada en condiciones extremas, ya que requerirían una degradación más avanzada antes de alcanzar el fallo.

RESULTADOS

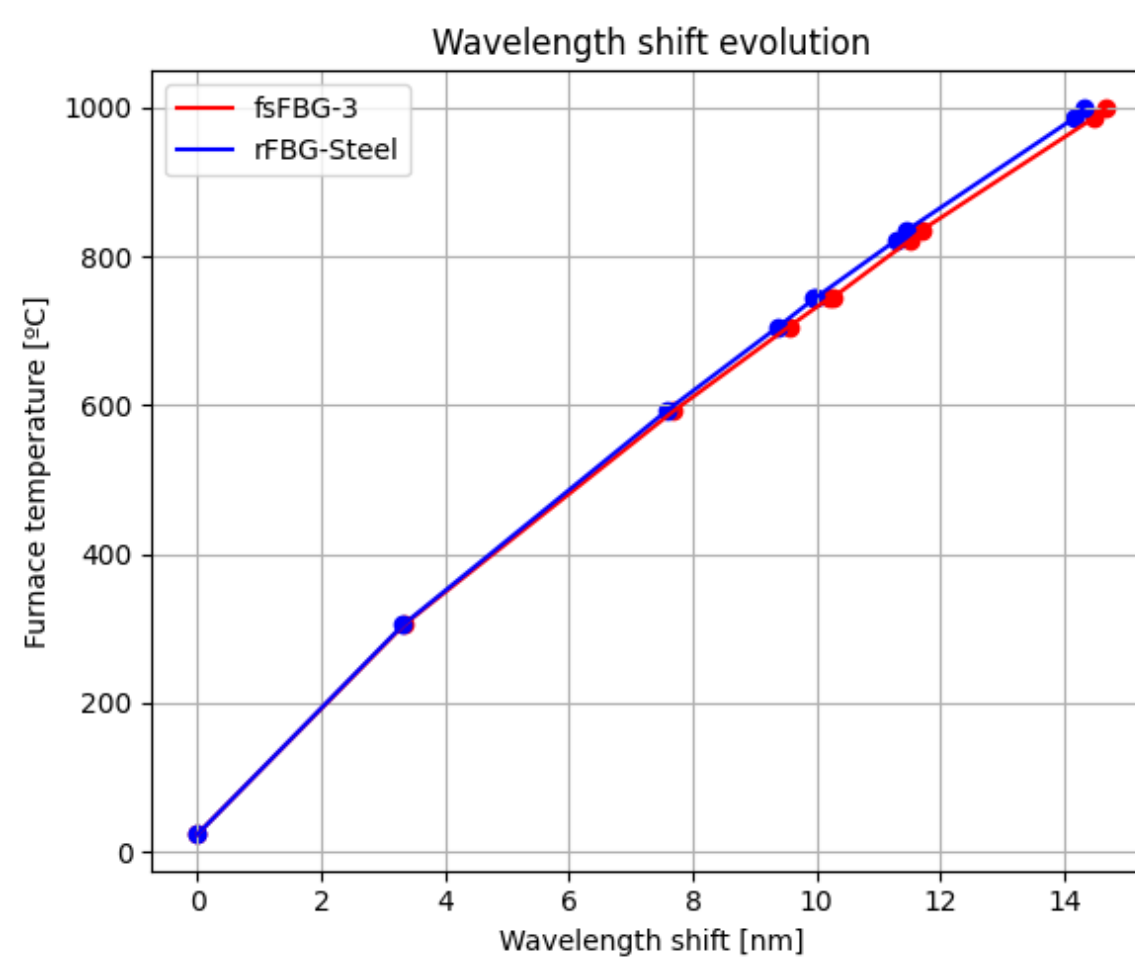
Propiedades ópticas

Antes de discutir los resultados relacionados con los experimentos realizados en el horno, es pertinente analizar los niveles y las formas de la potencia reflejada de los diferentes tipos de sensores. En la figura adyacente, en la parte superior, se presenta la traza de potencia resultante de combinar una fibra inscrita con tres fsFBGs con la rFBG inscrita en acero utilizando un divisor óptico. Resulta evidente observando la imagen comprobar que la potencia reflejada por los sensores inscritos con láser de femtosegundo es de aproximadamente 15dB mayor que la del sensor regenerado. Además, en la figura a la derecha, inferior; se ofrece una vista detallada de la forma de la potencia reflejada para cada sensor, destacando que la fsFBG presenta una respuesta significativamente más uniforme en comparación con la rFBG. Esta mayor regularidad permite que la robustez de la medición sea mayor, al proporcionar un punto de referencia bien definido para la detección del desplazamiento espectral, además de ser potencialmente mas resistente a la potencia degradación producida por las altas temperaturas.

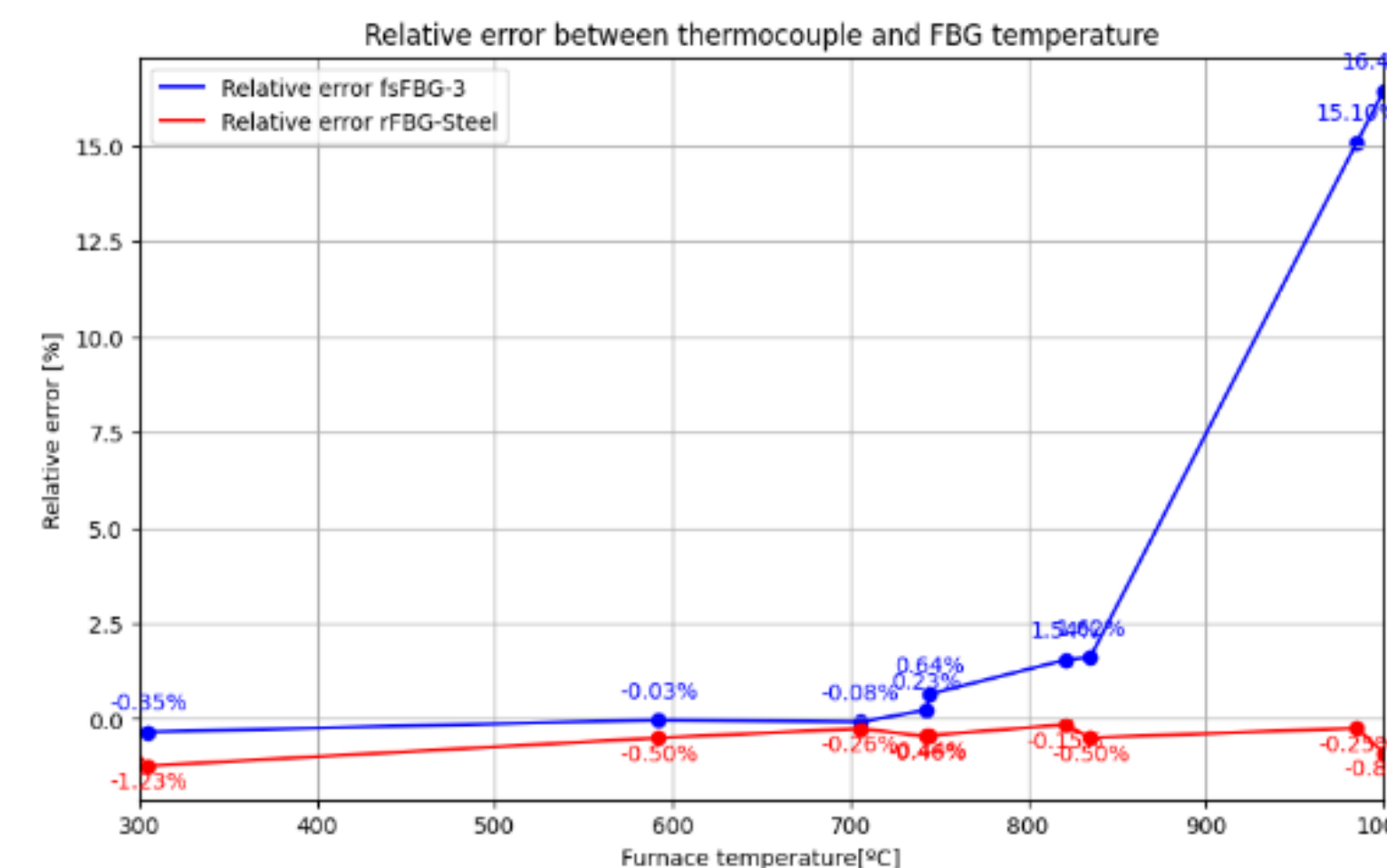
Pruebas de calentamiento

Los resultados obtenidos en los experimentos realizados en el horno se observan en las figuras inferiores. En la figura de la izquierda se analiza el desplazamiento espectral de ambos tipos de sensores, comparando el de una de las fsFBGs y la rFBG de acero. En este caso, la rFBG muestra un desplazamiento espectral ligeramente menor, específicamente 0.3nm menos en la temperatura más alta evaluada de 985°C. Un desplazamiento espectral más bajo permitiría conectar un mayor número de sensores al mismo interrogador. Sin embargo, esta diferencia no es lo suficientemente significativa como para considerarse una ventaja decisiva.

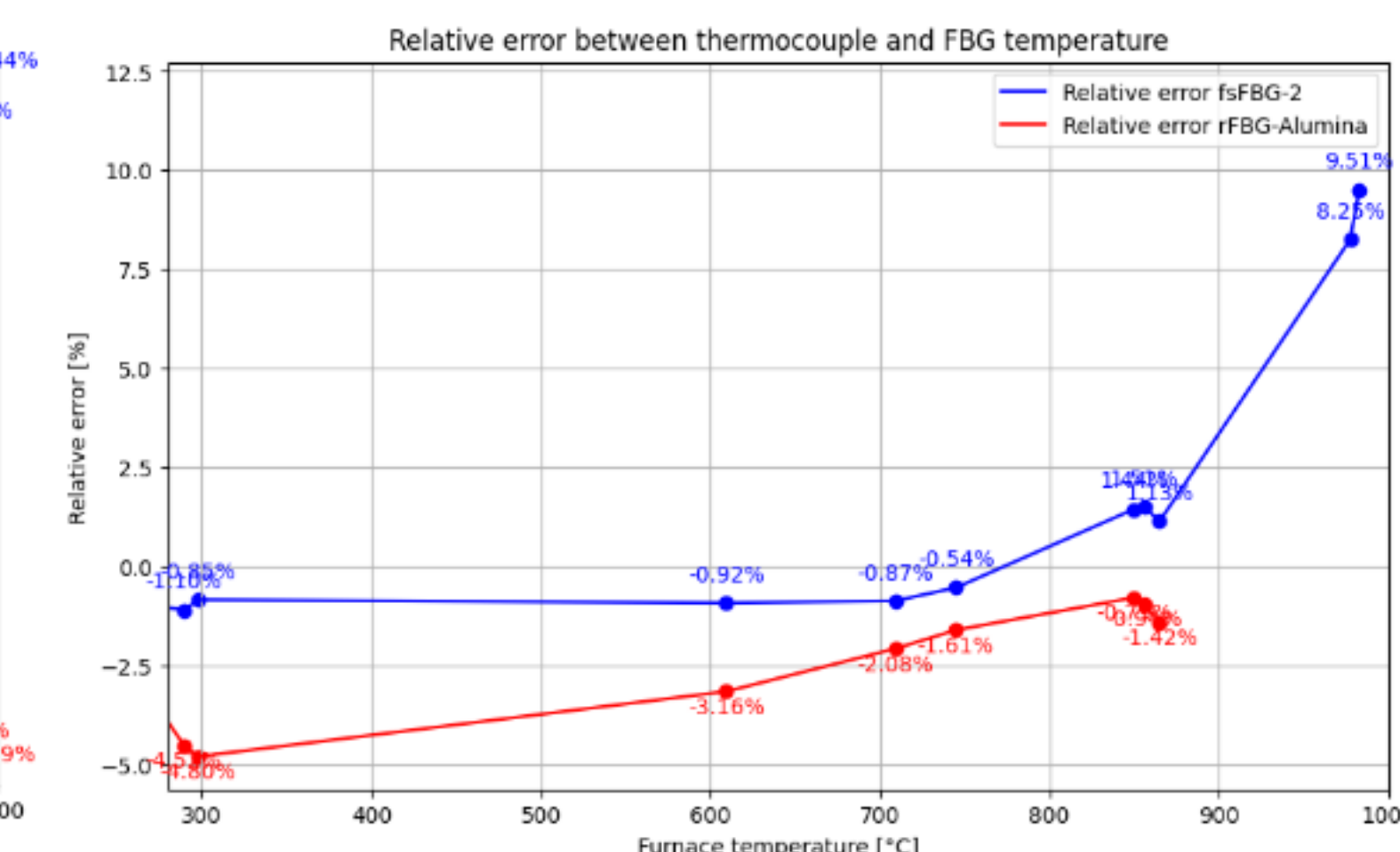
Las dos figuras restantes comparan la precisión en las medidas proporcionadas por los sensores ópticos frente a la temperatura de referencia; definida como el error relativo entre la temperatura de cada FBG y el termopar. La primera conclusión que se puede obtener es que todos los sensores muestran un desempeño adecuado en relación con la precisión de sus medidas, destacando las fsFBGs y la rFBG embebida en el capilar de acero, con errores inferiores al 2%. Entre ellas, las fsFBGs presentan errores más bajos para temperaturas por debajo de 700°C, probablemente gracias al tener un polinomio de calibración de un grado mayor, que hace que la curva de comportamiento se adapte mejor al funcionamiento del propio sensor. Los resultados correspondientes a la FBG regenerada del capilar de alúmina son llamativos en tanto que, a pesar de utilizar la misma tecnología de fabricación que la rFBG de acero, muestra errores significativamente más altos. Finalmente, resulta evidente comentar que para que las fsFBGs funcionen correctamente sería necesaria una recalibración, adaptando el polinomio de grado cinco que permite mayor fiabilidad hasta 1000°C.



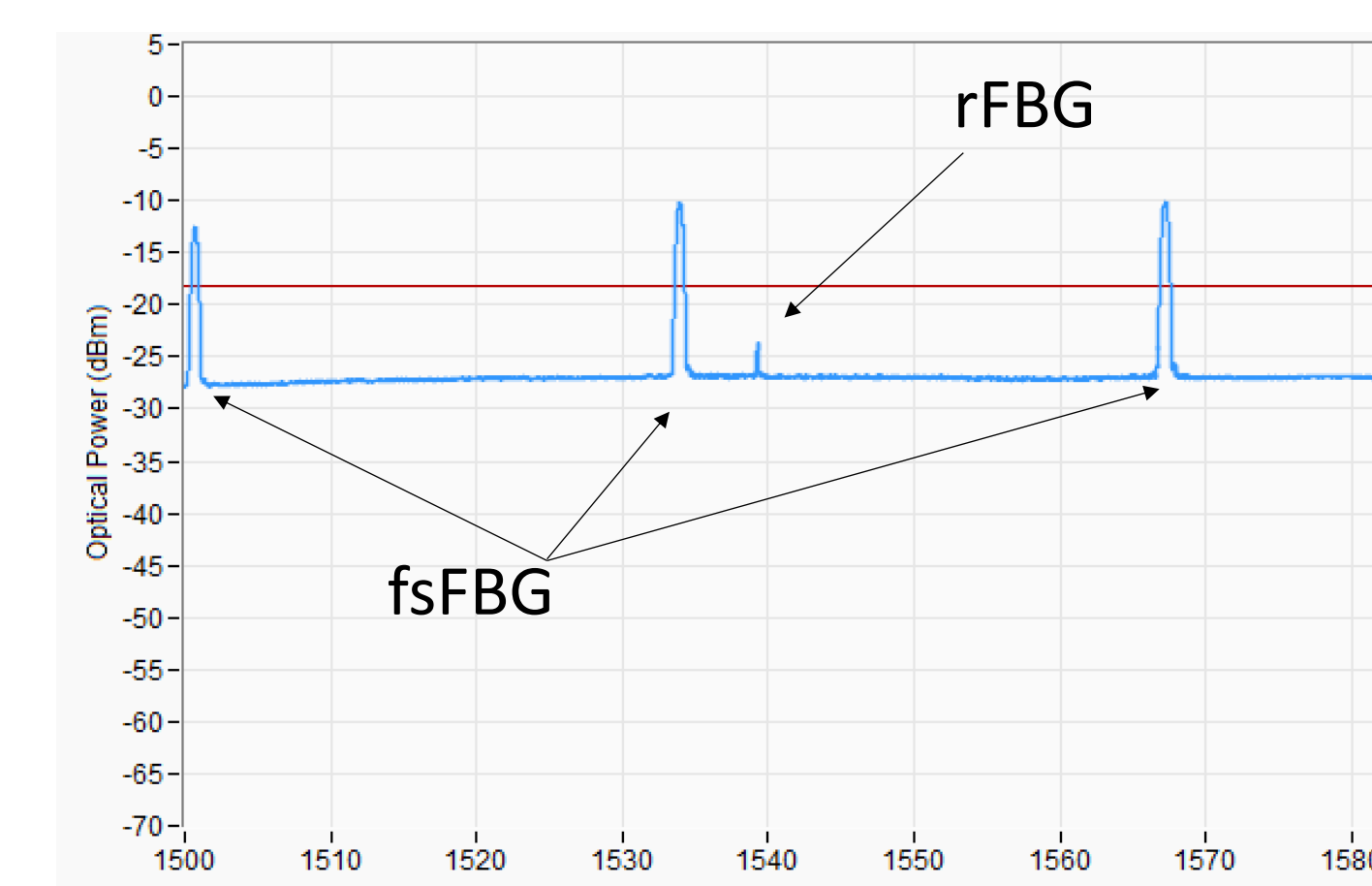
Desplazamiento espectral de las diferentes FBGs durante los experimentos



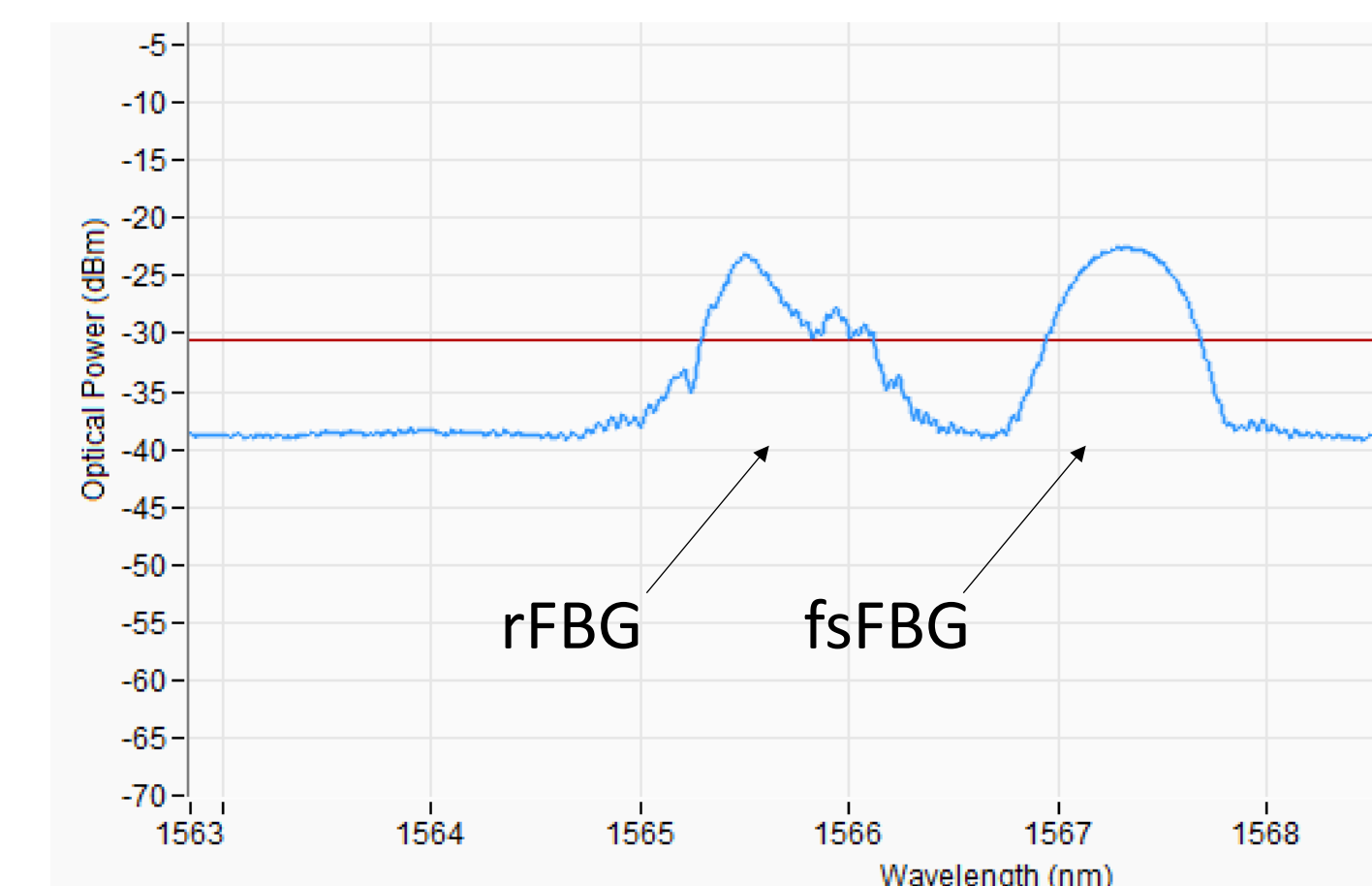
Error relativo entre fsFBG3 y rFBG de acero frente al termopar



Error relativo entre fsFBG2 y rFBG de alúmina frente al termopar



Traza de potencia de 3 fsFBGs y una rFBG combinados con un divisor óptico



Detalle de la curva de potencia reflejada de una fsFBG y una rFBG

ACKNOWLEDGEMENTS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los proyectos de investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación, CHLOE con referencia PID2021-125786OB-C22, y CATION con referencia TED2021-132190B-C22; así como del proyecto ASTERIX-CAESAR, que ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizon Europe de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención N° 101122231.

REFERENCIAS

- [1] Y. Deng et al., "Optical fiber sensors in extreme temperature and radiation environments: A review", IEEE Sensors Journal 22 (2022), pp. 13811-13834.
- [2] R. Rodríguez-Garrido et al., "High-Temperature Monitoring in Central Receiver Concentrating Solar Power Plants with Femtosecond-Laser Inscribed FBG", Sensors 21 (2021), 3762[3].
- [3] Z. Kou et al., "Heat transfer error analysis of high-temperature wall temperature measurement using thermocouple", Case Studies in Thermal Engineering 59 (2024), pp. 104518.
- [4] B. Wang et al., "Review of high temperature measurement technology based on sapphire optical fiber", Measurement 184 (2021), 109868.
- [5] S. J. Mihailov, "Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments," Sensors 12 (2012), pp. 1898-1918.
- [6] A. Lerner et al., "An intrinsic sensitivity calibration scheme for high temperature measurements using femtosecond point-by-point written fiber Bragg gratings", Optics & Laser technology 170 (2024), 110278.
- [7] D. Barrera et al., "Packaged Optical Sensors Based on Regenerated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Applications", IEEE Sensors Journal 12 (2012), pp. 107-112

Using Semiconductor Photodiodes as Detector Element for Solar Radiation Measurements



Manuel JEREZ¹, Alejandro CARBALLAR¹, Joaquín GRANADO¹

¹Dep. Ingeniería Electrónica – E.T.S. de Ingeniería – Universidad de Sevilla;
C/ Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla (Spain);
mjerez@us.es (M.J.), carballar@us.es (A.C.), j.granado@us.es (J.G.)

*Contact: Manuel JEREZ (mjerez@us.es)



INTRODUCTION

Objective: Evaluate and compare the use of different photodetectors when measuring solar irradiance in a novel pyrheliometer configuration

¿What is solar irradiance?

Solar irradiance is defined as the radiant flux received by a surface per unit area. It is decomposed into two main components, Direct Normal Irradiance (DNI) when talking about the solar radiation coming directly from a small solid angle centered in the solar disk, and Diffuse Horizontal Irradiance (DHI), which refers to the radiation received from any path but the one directly from the sun. The sum of both components is known as Global Horizontal Irradiance (GHI) [1].

¿How is solar irradiance measured nowadays?

Following International Organization for Standardization (ISO) norms, the device used for measuring DNI is the pyrheliometer, while DHI and GHI are measured with a pyranometer [2]. In both cases, the solar radiation captured needs to be converted into an electrical signal to be processed digitally. Two options are available for this process: a thermopile in conjunction with a surface that absorbs light and converts it into heat, or a semiconductor photodiode, which transforms incident light into electric current [3].

SYSTEM DESCRIPTION

The proposed optical fiber-based pyrheliometer and its calibration algorithm has already been presented in [4,5], where only results corresponding to a silicon photodiode were showcased. In this work, three photodetectors are compared, two Si-based photodetectors (volumetric THORLABS S140C and compact S150C) and volumetric InGaAs-based THORLABS S144C.

Device	Sensitivity	Response time
Silicon S140C	1nW	<1μs
Silicon S150C	10pW	<1μs
InGaAs S144C	1nW	<1μs



Mounting of the fibers onto the solar tracker and placed next to a commercial pyrheliometer

For the evaluation of the photodetectors, two optical fibers have been mounted next to a commercial KIPP & ZONEN CHP1 pyrheliometer and mounted on the KIPP & ZONEN SOLYS Gear Drive solar tracker to ensure consistent tracking of the sun throughout the day; while the other tips were connected to the different photodetectors, which were linked to the optical power monitor (OPM) THORLABS PM320E.

APPLICATION REQUIREMENTS

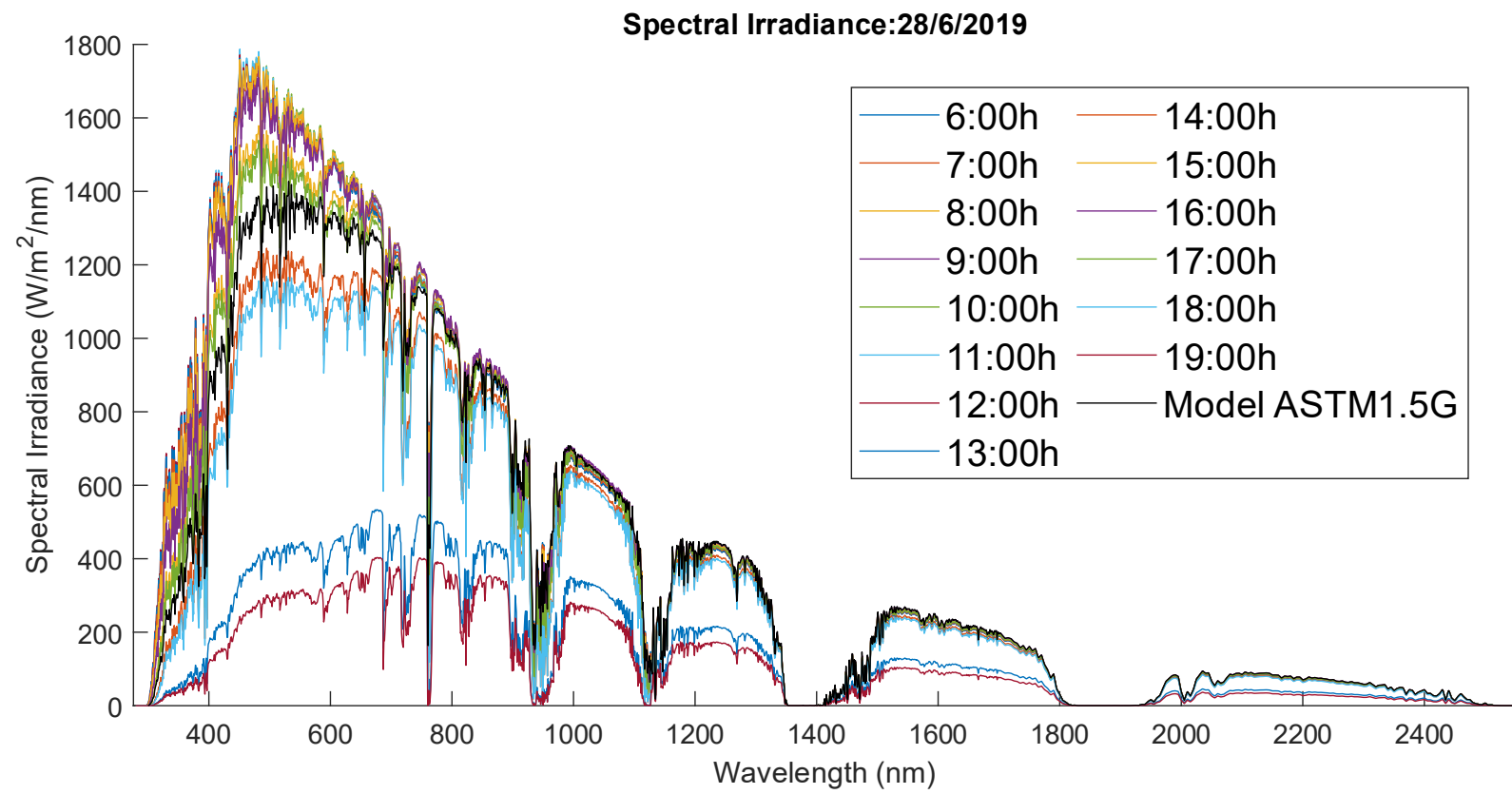
Key parameters

The photodetector is responsible for transforming captured radiation into electrical energy to generate an optical power measurement. While any photodetector could theoretically fulfil this function, certain specifications are essential:

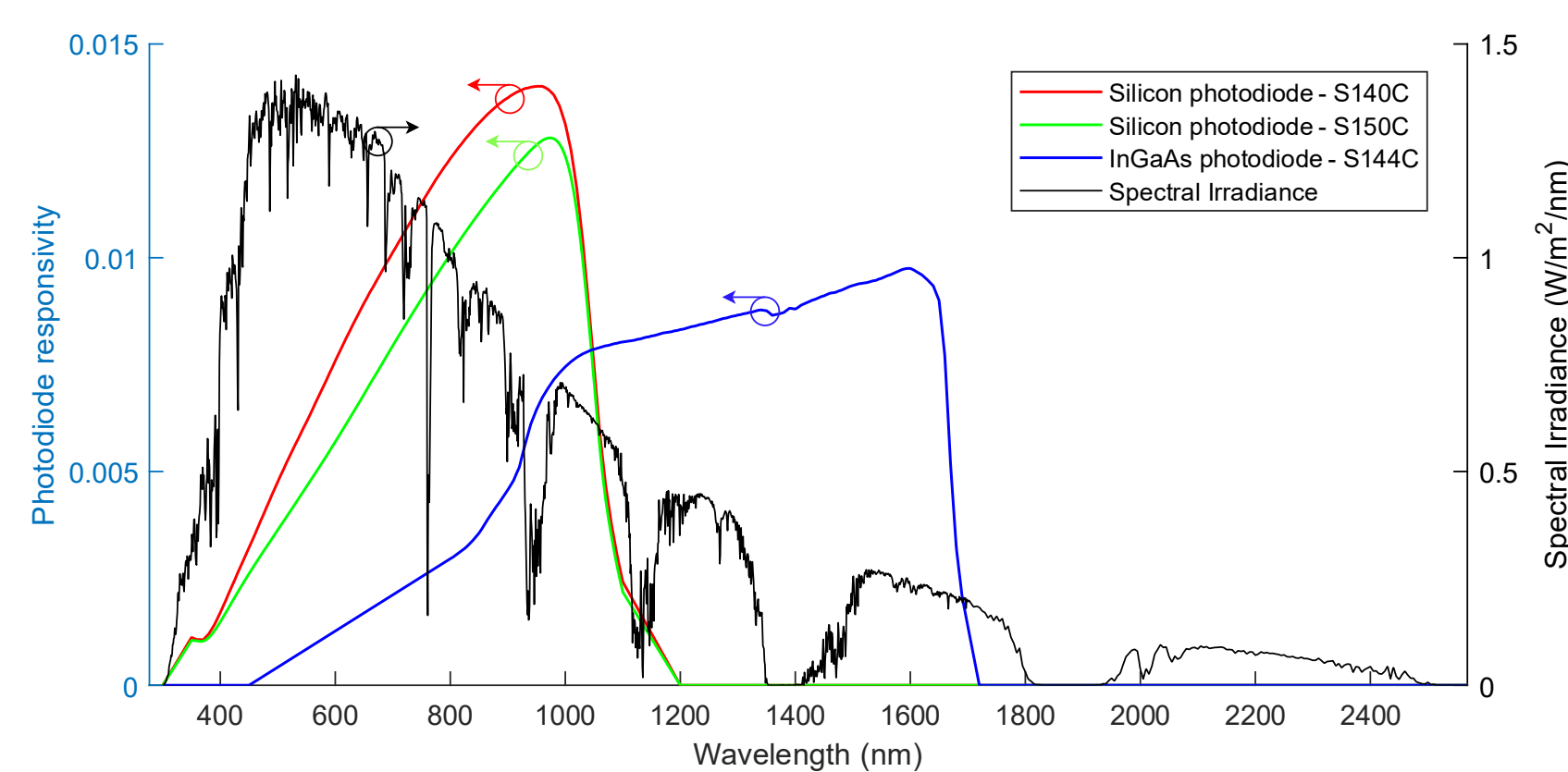
- Sensitivity: Ensure the smallest changes on irradiance are detected.
- Response time: Enable real-time detection.
- Spectral response: Cover most of the solar radiation spectrum, ranging between 300nm to 4000nm, as flat as possible to react equally to all radiation captured.

¿Why photodiodes?

Due to their superior sensitivity and faster response time, which are crucial for detecting small, rapid variations in irradiance. While thermopiles offer a flatter spectral response, their reliance on thermal processes leads to slower reaction times and insufficient sensitivity for this application, where changes in the order of microwatts must be detected reliably, making unsuitable for this application. The spectral disadvantages of photodiodes, whose response is irregular and limited, imposes the use of the calibration algorithm documented in [4,5].



Spectral irradiance evolution measured in Seville, Spain over 28th June 2019, compared against ASTM 1.5 G173-03 Reference Spectra.

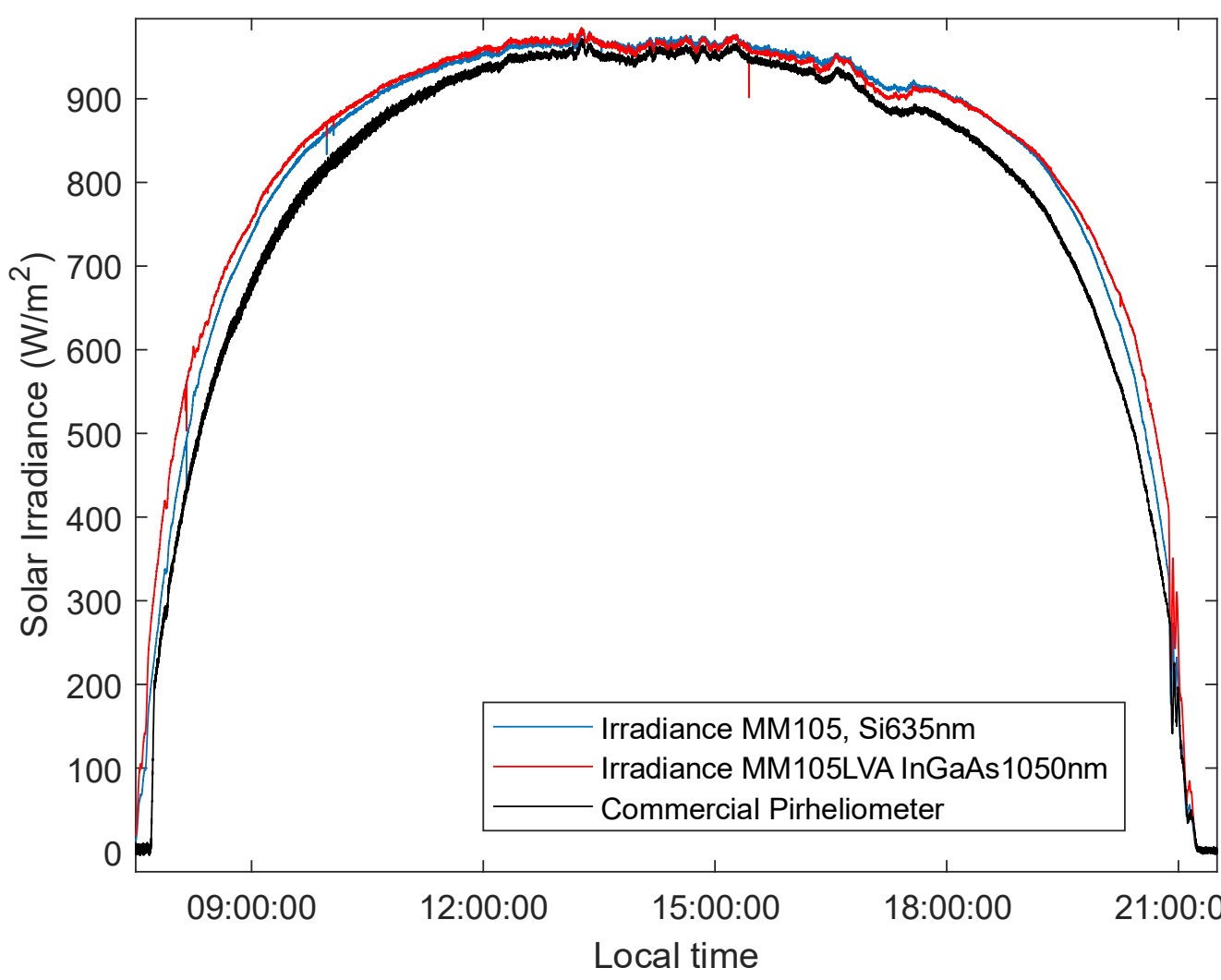


Spectral response of the semiconductor photodiodes [8] analyzed against the reference solar spectrum [7]. The spectral response of photodiode S150C has been scaled for the purpose of the illustration.

RESULTS

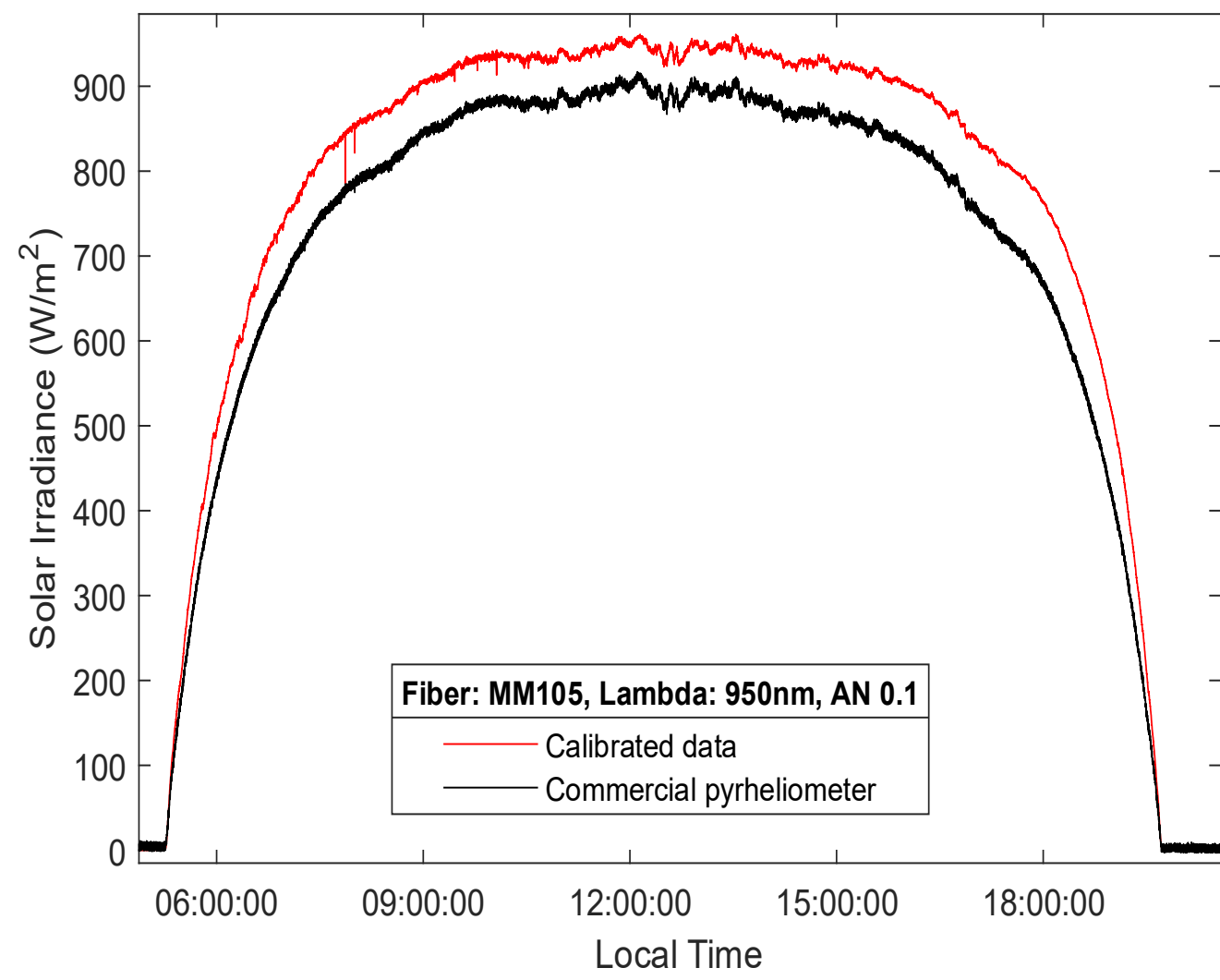
First results presented are for measurements during the same day with two different photodiodes (silicon S140C and InGaAs S144C) using fiber THORLABS FG105LVA, with 105μm core diameter and 0.22AN, compared against a commercial pyrheliometer; it is clear that the behavior of both photodiodes is similar during the central hours of the day, where the irradiance values after being processed are similar to those from the commercial device, proving great sensitivity and similar response times to the pyrheliometer, keeping relative errors below 5% from 10:30h to 19:00h.

If the analysis is focused on the divergencies seen on the comparison, they happen mainly at dawn and dusk, where the spectral irradiance suffers most variations against the model used in the calibration algorithm. If examined with further detail, the values from the InGaAs photodiode are higher than the silicon photodiode also at these times, while this did not happen at central hours of day. As shown in previous section, the responsivity of the InGaAs photodetector covers higher wavelengths in the spectrum, having more influence of these components at sunrise and sunset.



DNI measurement using as optical collector an optical fiber with 105μm core-diameter and silicon S140C and InGaAs S144C photodiodes, compared against commercial pyrheliometer.

Lastly, figure on right side demonstrates that the performance of the S150C photodiode is analogous to previous photodiodes. However, the divergence between the curve generated by this device and the commercial pyrheliometer is more pronounced, although the relative error consistently remains below 10%, which could be due to fiber misalignment, manufacturing tolerance or a divergence between theoretical and real photodiode response curves. This phenomenon is consistently observed across all measurements conducted with this fiber and detector, so it could potentially be mitigated by refining the calibration algorithm. This could be done in several ways, but current work focuses on changing the spectra used as a reference for the calibration factor computing depending on different conditions, such as time of day and season of the year. Besides, the use of a photodiode that is less sensitive to changes in spectrum could be beneficial, reducing the influence of these changes. In this sense, the InGaAs photodiode S144C has a flatter response, and covers a side of the spectrum with less changes along the day, potentially being the best option.



DNI measurement using as optical collector an optical fiber with 105μm core-diameter and silicon S150C photodiode, compared against commercial pyrheliometer.

CONCLUSIONS

In this work, various photodetectors were analyzed as solar radiation detectors in a new optical fiber-based pyrheliometer configuration. The study encompassed two stages: an initial phase examining the specifications of different employed devices and assessing their suitability for the intended application, followed by a second phase where the photodetectors were tested in a novel radiometer setup previously demonstrated. **Among the options considered, semiconductor photodiodes exhibited superior performance leveraging their sensitivity and response time capabilities while overcoming spectral response curve limitations through the calibration algorithm employed; compared to the thermopile, which was considered an invalid option for this application due to its low sensitivity and response time.** Among the evaluated photodiodes, the two volumetric models demonstrated the most promising performance, generating results comparable to those of a conventional pyrheliometer. Although both behave similarly, the silicon photodiode gave more accurate results, whereas the InGaAs photodiode behaved worse at the start and end of the day.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was developed within the scope of the projects CATION, TED2021- 132190BC22 funded by MCIN/AEI/10.130339/501100011033 and, as appropriate, by "European Union Next Generation/PRTR", and funded by CHLOE, Grant PID2021-125786OB-C22 funded by MCIN/AEI/10.130339/501100011033. Lastly, the ASTERIX-CAESar project has received funding from the European Union's Horizon Europe research and innovation program under grant agreement N° 101122231. The authors would like to thank the Group of Thermodynamics and Renewable Energy from the University of Seville. The information about the group can be found at <https://gter.es/>.

REFERENCES

- [1] P. Blanc et al., "Direct normal irradiance related definitions and applications: The Circumsolar Issue", Solar Energy vol. 110, pp. 561-577 (December 2014). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.001>
- [2] "Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation", ISO 9060:2018, International Organization for Standardization, 2018 (rev. 2024).
- [3] M. A. Martínez, "A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range", Sensors vol. 9, pp. 4615-4634 (June 2009). <https://doi.org/10.3390/s90604615>
- [4] R. Rodríguez-Garrido et al. "Pirheliómetro basado en fibra óptica y fotodiodo semiconductor", 13ª Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL'23, Sevilla, España. (2023)
- [5] A. Carballar et al., "Measuring DNI With a New Radiometer Based on an Optical Fiber and Photodiode", Sensors vol. 24, pp. 3674 (June 2024); <https://doi.org/10.3390/s24113674>.
- [6] C.A. Gueymard et al., "Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance", Solar Energy vol. 153, pp. 755-765 (September 2017); <https://doi.org/10.1063/5.0007550>
- [7] J. L. Lean et al., "How Does the Sun's Spectrum Vary?", Journal of Climate, vol. 25, no. 7, pp. 2555-2560 (April 2012); <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00571.1>
- [8] ASTM G173-03(2020); Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2020. Available online: <https://www.astm.org/g0173-03r20.html> (accessed on 28th November 2024)

Medida de flujo solar concentrado en simulador solar basado en fibra óptica y fotodiodo

**Manuel JEREZ¹, Alejandro CARBALLAR¹, Ricardo CONCEIÇÃO², José GONZÁLEZ-AGUILAR²,
Xabier RÁNDEZ³, Olaia ITOIZ³**

1. Dep. Ingeniería Electrónica – E.T.S. de Ingeniería – Universidad de Sevilla; C/ Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla, España
2. Unidad de Procesos de Alta Temperatura, IMDEA Energía, Av. Ramón de La Sagra, 3, 28935, Móstoles, Madrid, España
3. Departamento de Energía Solar Térmica y Almacenamiento Térmico, CENER, C/ Ciudad de la Innovación nº7, 31651 Sarriena, Navarra, España
***Contact: Manuel JEREZ (mjerez@us.es)**



INTRODUCCIÓN

Objetivo: Medida de flujo solar concentrado usando una configuración basada en fibra óptica y fotodiodo como captador y detector de radiación

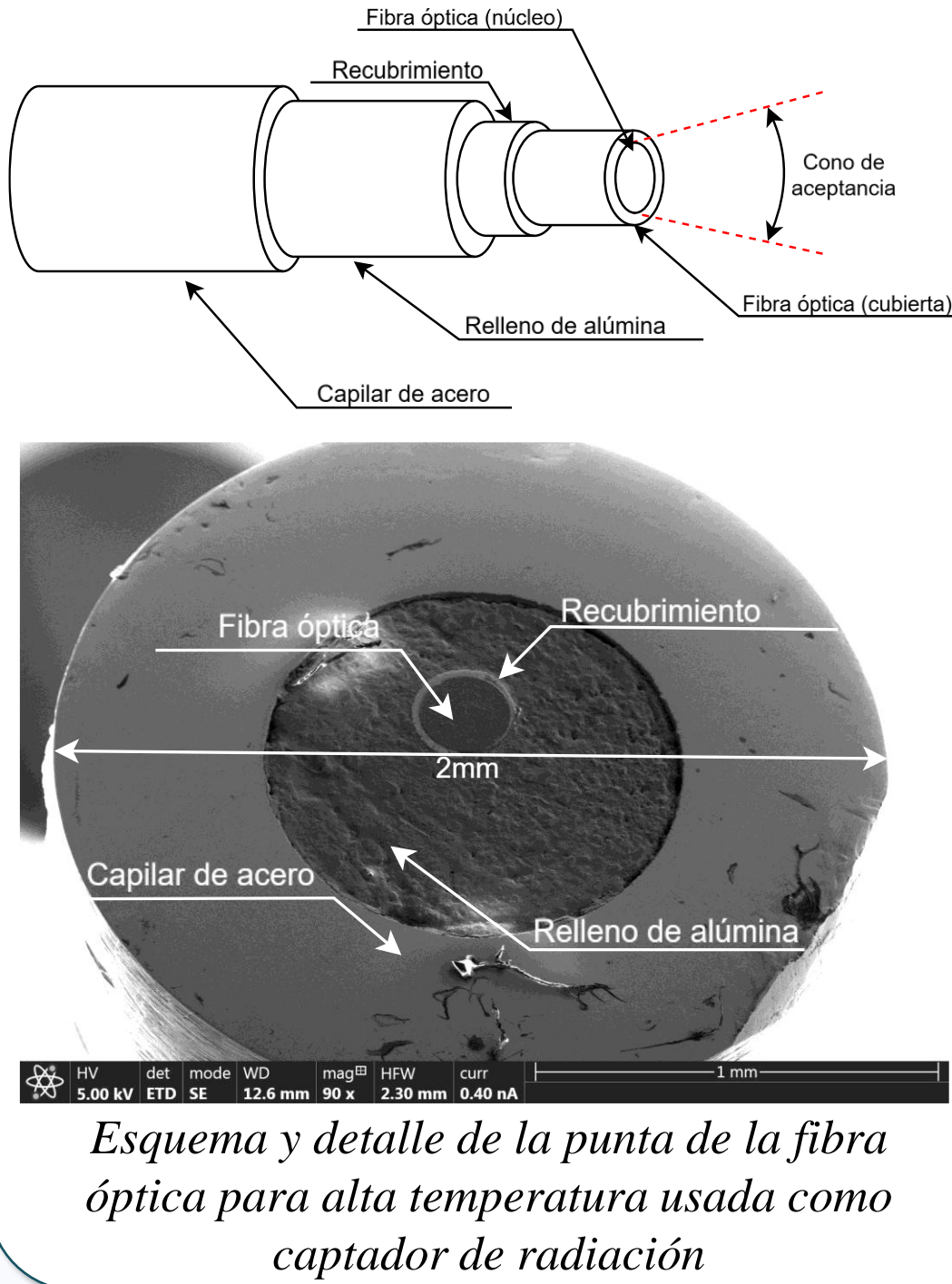
El problema de la Energía Solar Térmica de Concentración (CSP/CST)

La CSP/CST presenta grandes retos relacionados con la monitorización de los procesos que intervienen desde la focalización de los rayos de luz hasta la transformación en calor [2]. Los sistemas CSP requieren tecnologías que proporcionen mediciones de la radiación recibida en condiciones extremas, como radiación intensa, temperaturas de hasta 1000 °C y gradientes térmicos superiores a 500 °C [3]. En [4] se demostró la capacidad de las fibras ópticas para proporcionar mediciones precisas de la irradiancia normal directa (DNI).

¿Por qué fibras ópticas?

La adopción de sensores de fibra óptica mejoraría el mantenimiento predictivo y la eficiencia al proporcionar mediciones en tiempo real y la distribución del flujo concentrado en la superficie, difíciles de conocer con precisión usando sensores tradicionales. Además, los sensores propuestos son menos invasivos en el receptor, tienen una dinámica más rápida y un montaje más sencillo, lo que simplifica su mantenimiento.

FIBRAS ÓPTICAS DE ALTA TEMPERATURA



Los diseños de fibra óptica empleados se realizaron en colaboración con la empresa Engionic. Las figuras adyacentes muestran el esquema y el detalle (utilizando un SEM) de la punta expuesta a la radiación. Se observa que, a la fibra óptica, se le añade un recubrimiento de oro o poliamida de alta temperatura. Este conjunto se introduce dentro de un capilar de acero, y entre ambas un relleno de alúmina que busca aislar la fibra óptica del calentamiento sufrido por el acero. Esta configuración preserva la integridad estructural de todo el dispositivo, manteniendo el tamaño reducido que se busca para interferir lo menos posible con el receptor CSP.

De acuerdo con las especificaciones del fabricante, las fibras ópticas recibidas mantienen un rendimiento estable hasta los 700°C y pueden soportar picos de temperatura de hasta 1000 °C, adecuados para el experimento de prueba de concepto en el simulador solar de alto flujo (HFSS).

MONTAJE EXPERIMENTAL

Primera prueba (IMDEA Energía, Móstoles, Madrid)

La primera campaña de pruebas fue realizada en el simulador solar KIRAN-42 localizado en IMDEA Energía. Este HFSS cuenta con 7 lámparas de xenón dispuestas de forma elipsoidal, aunque sólo una fue empleada para los experimentos.

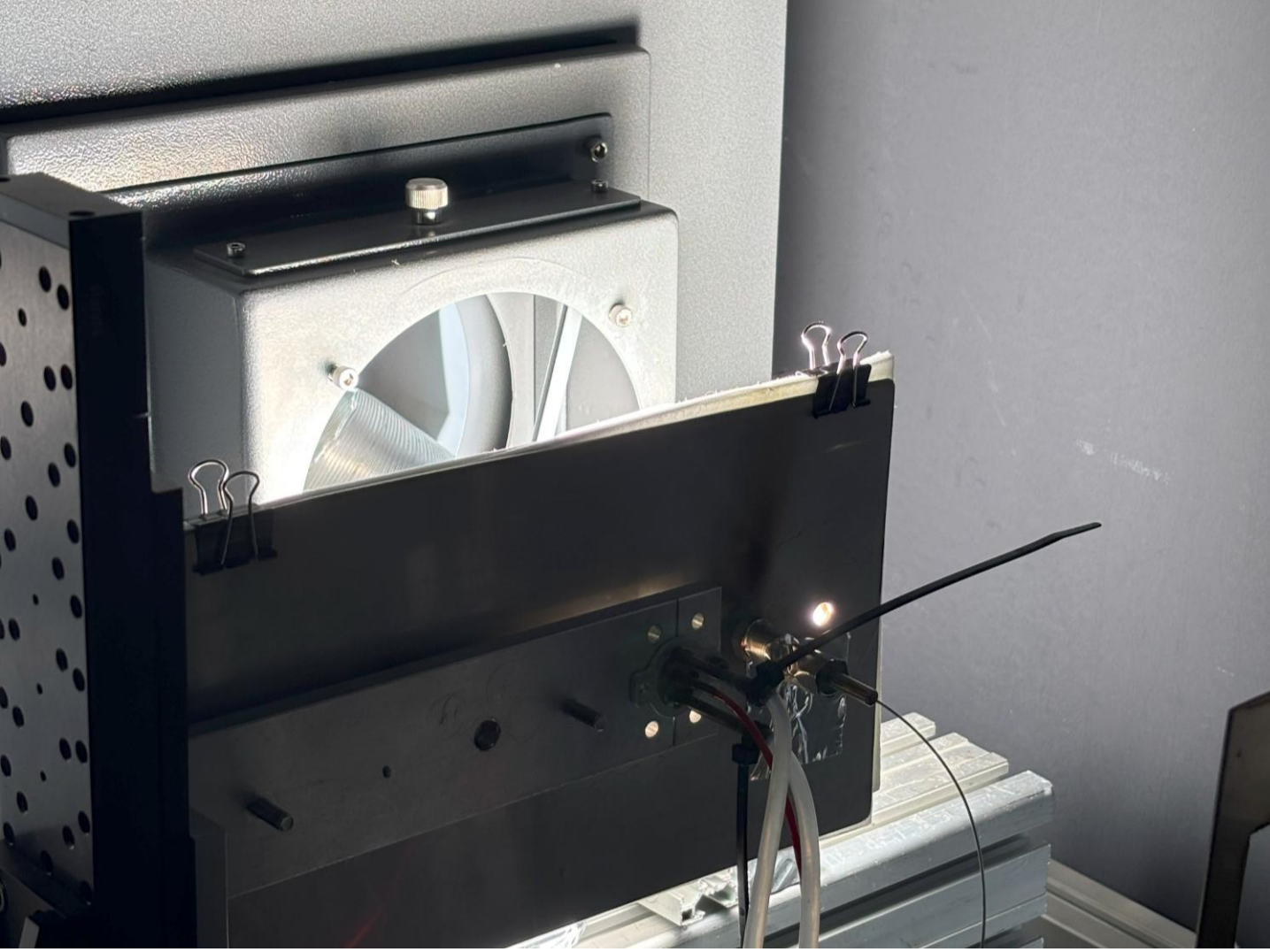
Las fibras ópticas se expusieron a la radiación utilizando una placa de Inconel con conectores estancos a través de los cuales pasaba la fibra, asegurando que el extremo de la fibra estuviera correctamente orientado hacia la fuente de luz. Esta placa estaba cubierta por una plancha de alúmina que solo dejaba expuesta una pequeña sección para que la fibra recibiera la radiación.



Montaje del extremo de la fibra expuesta a la radiación en el simulador solar de IMDEA Energía.

Segunda prueba (CENER, Sarriena, Navarra)

El simulador solar de CENER cuenta con una lámpara de xenón que se encuentra dentro de una cámara, como se muestra en la figura a la derecha. Este HFSS posibilita niveles de potencia ajustables y cuenta con un espejo elipsoidal que enfoca la luz emitida, permitiendo entregar hasta 1.1 MW/m² en el foco. El montaje realizado fue similar al realizado en IMDEA, con una placa de acero colocada sobre una mesa posicionadora a través de la cual se hacía pasar la fibra. La placa estaba cubierta con lana cerámica para protegerla de las altas temperaturas. En este caso, un termopar se colocó junto al conector de la fibra para medir la temperatura en la parte trasera del acero.



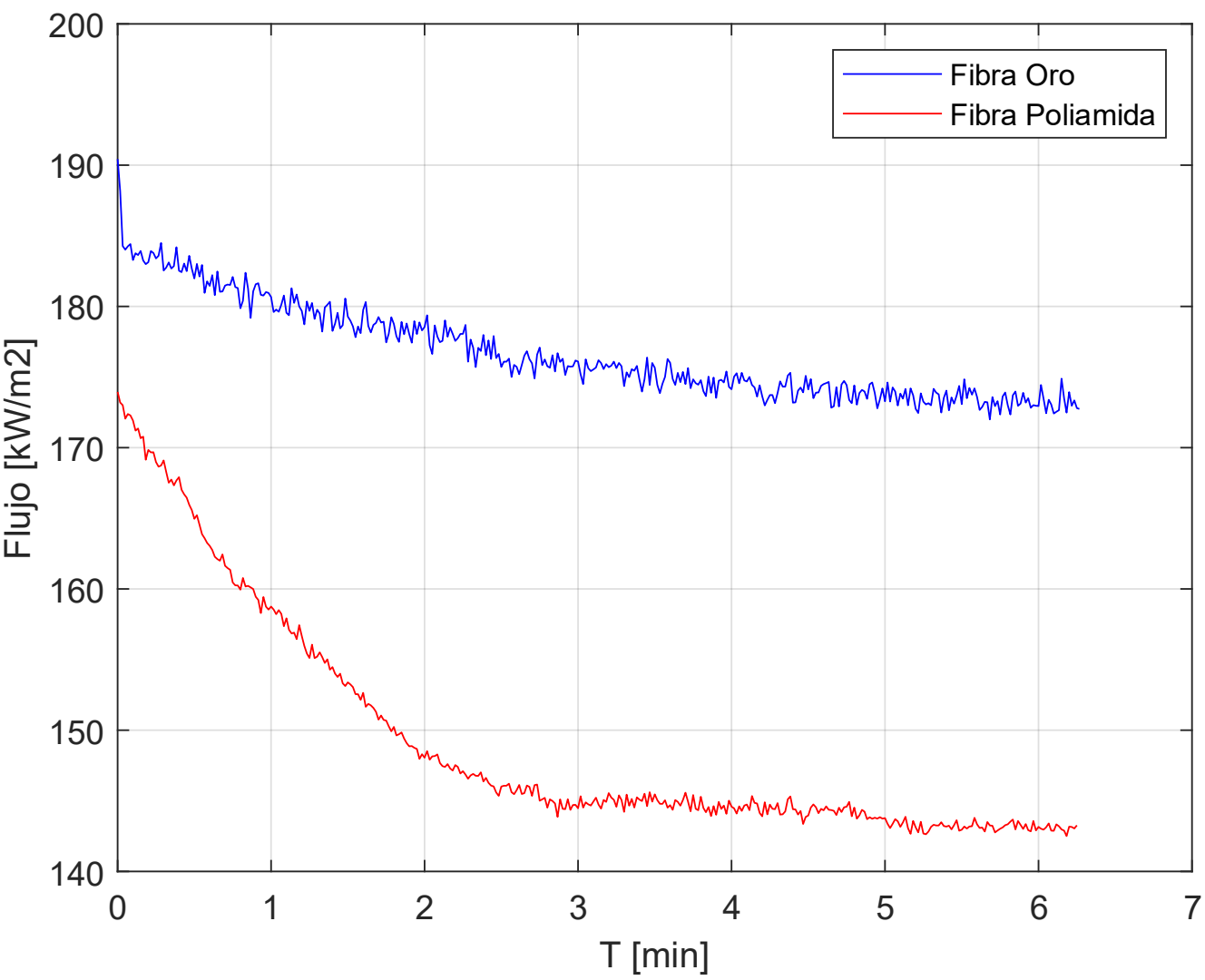
Detalle de la parte posterior del montaje en el HFSS de CENER.

RESULTADOS

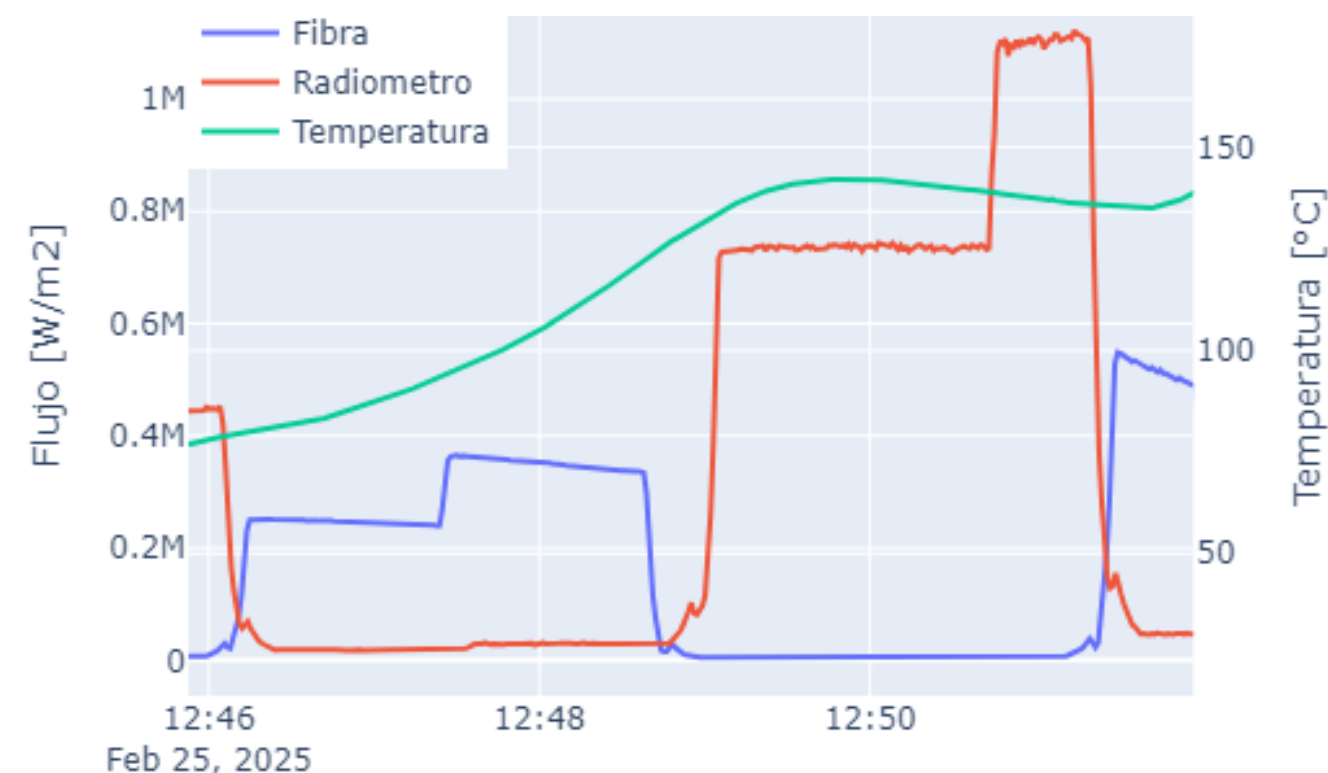
Los resultados obtenidos avalan el uso de la configuración propuesta para la medida de flujo concentrado. Estas pruebas de concepto han permitido identificar algunos problemas que deben ser atajados antes de realizar el diseño final que será instalado en los receptores CSP.

Valores absolutos de medida

La primera observación está relacionada con los valores de medida obtenidos, que quedan lejos de la medida realizada por el radiómetro comercial instalado en ambos experimentos. En la figura de la derecha, arriba, correspondiente a los experimentos realizados en IMDEA Energía, se observan valores de flujo máximos ligeramente superiores a 190 kW/m² y 170 kW/m² en las fibras con recubrimiento de oro y poliamida, respectivamente. Este valor se encuentra lejos del arrojado por el Gardon en ese momento, que era en torno a 330 kW/m². Lo mismo se observa en la figura inferior, correspondiente a los experimentos realizados en CENER, donde se comparan las medidas dadas por el radiómetro y la configuración de fibra.



Medida de flujo concentrado con fibras con recubrimiento de oro y poliamida en IMDEA Energía.



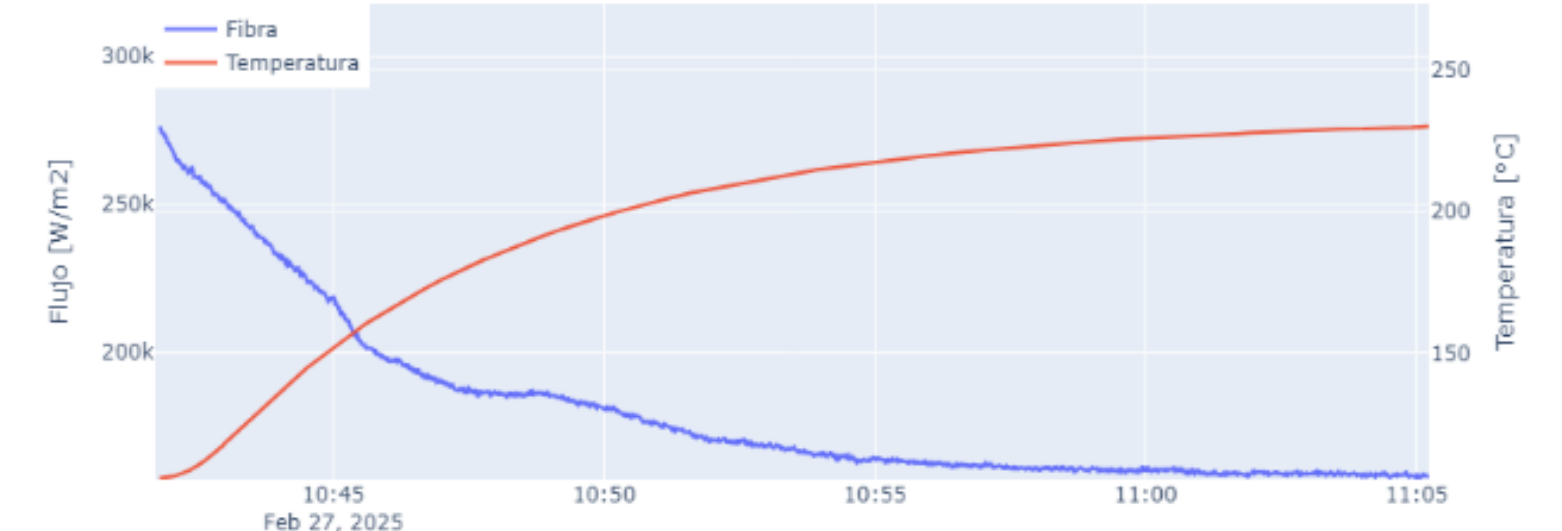
Medida de flujo concentrado con fibra óptica y recubrimiento de poliamida frente a medida del Gardon y temperatura en CENER.

Campo de visión

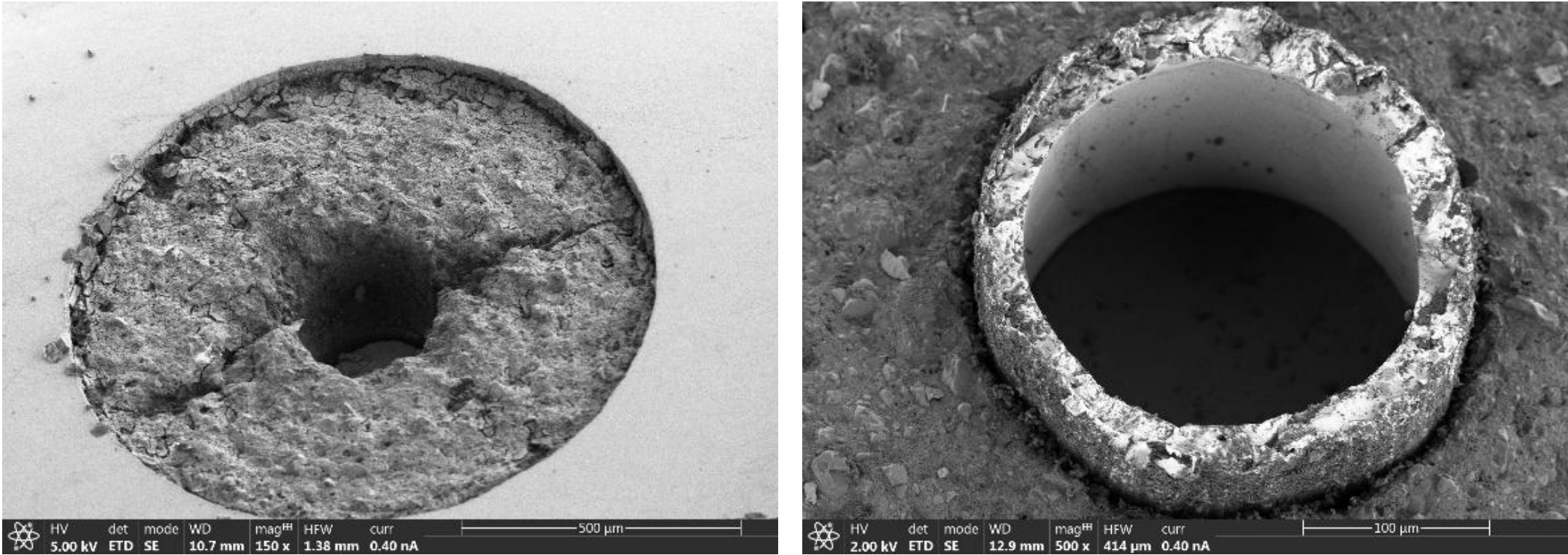
Esta discrepancia está relacionada con los ángulos de incidencia de la luz. En el caso de las fibras ópticas se define un campo de visión de 24°, suficiente para acoplar la luz en el simulador solar de IMDEA, pero no en el de CENER, donde más del 35% no podían ser capturados por la fibra. Por otro lado, la fibra atenúa todos los rayos que no inciden perpendicularmente en la fibra debido a la función penumbra que impone la característica de apertura numérica, lo cual contribuye también a esa diferencia entre las dos medidas de flujo.

Dependencia con la temperatura

Además, en la figura inferior se observa la dependencia de la medida con la temperatura, que también se intuye en las figuras a la izquierda.



Medida de flujo concentrado con fibra óptica y recubrimiento de poliamida frente a temperatura en CENER.



Detalle de las puntas de las fibras ópticas observadas con SEM tras su exposición a alta radiación.

Daño físico

Tras las campañas de experimentos se hicieron inspecciones con SEM de las fibras para evaluar el daño sufrido. En la figura superior izquierda se muestra una fibra con 200 µm de diámetro de núcleo y recubrimiento de poliamida, donde la fibra se ha retraído de la superficie circundante, mostrando quiebras en la alúmina y un espacio vacío donde debería estar la alúmina, que parece haberse volatilizado. Esta imagen contrasta con la imagen superior derecha, correspondiente con una fibra de oro, donde destaca la integridad estructural del recubrimiento, que parece presentar un mayor grosor. En este caso, la fibra también se encuentra retraída respecto del resto de la estructura, con el recubrimiento de oro elevado respecto del relleno de alúmina.

CONCLUSIONES

Aunque los resultados confirman la viabilidad de medir el flujo solar concentrado, aún quedan desafíos antes de alcanzar el objetivo de poder medir flujo solar concentrado de hasta 1.5 MW/m². Se destaca la necesidad de ampliar el campo de visión de la fibra, así como desarrollar estrategias para el montaje de las fibras en los receptores que reduzcan la conducción. Tras la campaña de experimentos, una inspección con SEM mostró la alteración de la estructura de las fibras. Se observaron grietas en el relleno de alúmina, que no deberían afectar las mediciones al ser solo un aislante térmico. En cuanto a los materiales que componen la fibra, los ensayos confirmaron que la poliamida se volatiliza en las temperaturas de trabajo; mientras que el oro, aun siendo mejor opción dada la estabilidad térmica en las medidas, requiere garantizar que no se supere su temperatura de fusión. Asimismo, se detectaron desplazamientos en las fibras ópticas dentro del capilar metálico, lo que podría haber contribuido a pérdidas de potencia por efectos de sombreado en el núcleo de estas.

ACKNOWLEDGEMENTS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los proyectos de investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación, CHLOE con referencia PID2021-125786OB-C22, y CATION con referencia TED2021-132190B-C22; así como del proyecto ASTERIX-CAESAR, que ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizon Europe de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención N° 101122231.

REFERENCES

- [1] S.N. Khonina et al., "Optical fiber sensors: Working principle, applications and limitations", Adv. Photonics Res. 2022, 3, 2100371 (July 2022). <https://doi.org/10.1002/adpr.202100371>.
- [2] Romero M., González-Aguilar J. Solar thermal CSP technology (2014) Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 3 (1), pp. 42 - 59, <https://doi.org/10.1002/wene.79>
- [3] Y.-L. He et al., "He, Y.-L.; Wang, K.; Qiu, Y.; Du, B.-C.; Liang, Q.; Du, S. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions", Appl. Therm. Eng., 149, pp. 448-474 (February 2019). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.006>.
- [4] A. Carballar et al., "Measuring DNI With a New Radiometer Based on an Optical Fiber and Photodiode", Sensors vol. 24, pp. 3674 (June 2024). <https://doi.org/10.3390/s24113674>.