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

Manuel JEREZ [(1)], Alejandro CARBALLAR [(1)], Ricardo CONCEIÇÃO [(2)], José GONZÁLEZ-AGUILAR [(2)], Xabier RÁNDEZ [(3)], Olaia ITOIZ [(3)]

1. Departamento de 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 Sarriguren, Navarra, España.

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

ABSTRACT:

Extreme operating conditions encountered in solar receivers of Concentrated Solar Thermal (CST) power plants, such as elevated temperatures, high solar fluxes, and thermal cycling, present substantial challenges for conventional sensors. Optical fibers present a viable alternative for solar flux measurement in these harsh environments; however, their long-term performance and degradation mechanisms necessitate comprehensive investigation and characterization. This study presents two tests performed using high-flux solar simulators to explore the capabilities of optical fibers for measuring concentrated solar flux in an environment at temperatures exceeding 500 °C and fluxes above 1.1 MW/m². Various fibers were tested and then analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM) to evaluate their structural integrity and material degradation. The results highlight significant coating deterioration, fiber retraction, and thermal-induced stress effects, all of which adversely affect measurement accuracy and reliability.

Keywords: Concentrated Solar Power, Thermal Solar Energy, Radiometer, Solar Simulator, Fiber-optic Sensors.

1.- Introducción

Los sensores de fibra óptica han revolucionado la monitorización en entornos extremos debido a su resistencia a la interferencia electromagnética, su diseño ligero y su durabilidad. Dentro de los sensores ópticos, las redes de difracción de Bragg en fibra (FBG) son la tecnología de sensado óptico más utilizada, permitiendo la detección precisa de cambios en temperatura o presión en industrias que van desde la ingeniería civil hasta la extracción de petróleo [1].

A medida que el mercado energético global completa su transición hacia las energías renovables, las plantas de energía solar térmica de concentración (CSP/CST) presentan grandes desafíos, sobre todo en 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 de detección avanzadas que proporcionen mediciones en tiempo real con alta precisión en condiciones extremas, como radiación intensa, temperaturas de hasta 1000 °C y gradientes térmicos superiores a 500 °C [3]. En este contexto, las fibras ópticas emergen como una alternativa a los dispositivos de medición tradicionales, los cuales no logran

proporcionar datos precisos. El uso de fibras ópticas como captadores de radiación solar ha sido ampliamente investigado en los últimos años y en [4] se demostró su capacidad para proporcionar mediciones precisas de la irradiancia normal directa (DNI) en un sistema basado en fotodiodo de silicio y un algoritmo de calibración.

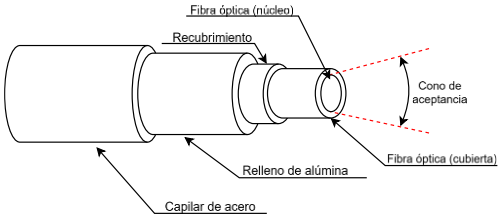
La adopción de sensores de fibra óptica como captadores de radiación solar en los receptores CSP mejoraría el mantenimiento predictivo y la eficiencia al proporcionar mediciones en tiempo real y la distribución del flujo concentrado en la superficie. Sin embargo, su implementación a gran escala en plantas CSP requiere una validación rigurosa para evaluar su rendimiento bajo temperaturas extremas, esfuerzos mecánicos y exposición prolongada a radiación concentrada. En este trabajo se presenta la prueba de concepto de un dispositivo para la medición de flujo solar concentrado en receptores solares basado en el uso de una fibra óptica de alta temperatura y fotodiodo semiconductor. Los ensayos de laboratorio han sido realizados en simuladores solares de alto flujo con lámpara de xenón (HFSS) y la evaluación del daño en las fibras ópticas expuestas a la alta radiación mediante su inspección en un microscopio electrónico de barrido (SEM).

2.- Montaje experimental

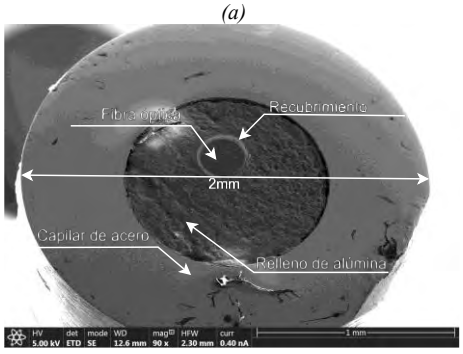
2.1.- Fibras ópticas para alta temperatura

A pesar de que las fibras ópticas, que tradicionalmente se encuentran fabricadas en óxido de silicio, tienen estabilidad térmica hasta aproximadamente 1200 ºC, las fibras ópticas comerciales vienen encapsuladas en materiales plásticos que limitan su funcionamiento hasta no más allá de los 100 ºC. Para aplicaciones como la de este trabajo, donde se persigue alcanzar temperaturas extremas, es necesario el uso de un encapsulado especial para garantizar la protección de la fibra hasta 1000 ºC. Además, para aplicaciones con aún mayores exigencias térmicas, las fibras ópticas de zafiro permiten alcanzar temperaturas superiores a los 2000 ºC.

Para la presente aplicación de medida de flujo solar concentrado, los diseños de fibra óptica para alta temperatura se realizaron en colaboración con la empresa Engionic (Berlín, Alemania). La Fig. 1a muestra la estructura de la fibra óptica diseñada, así como el detalle (utilizando un SEM) de la punta expuesta a la radiación; en la Fig. 1b. Atendiendo a ambas, se observa que a la fibra óptica, con su núcleo y cubierta, 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.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Esquema de la estructura de diseño de la fibra óptica de alta temperatura y (b) imagen de detalle de la punta de la fibra óptica de alta temperatura obtenida por microscopía SEM.

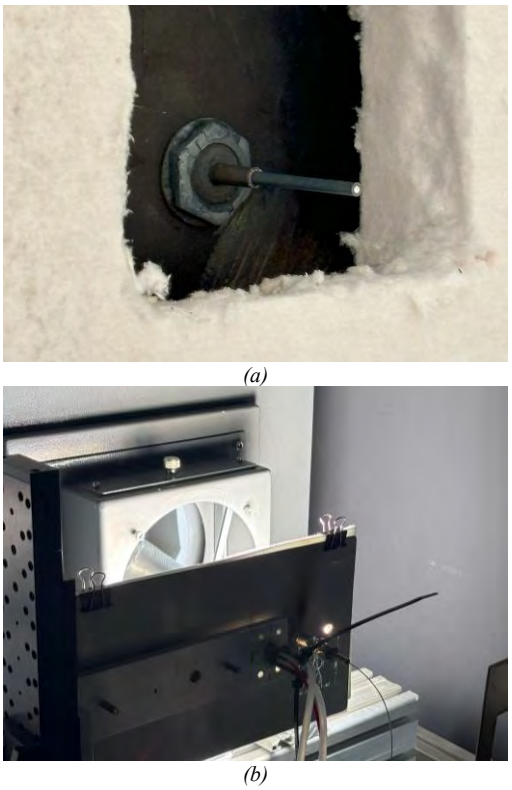
De acuerdo con las especificaciones del fabricante, las fibras ópticas recibidas mantienen un rendimiento estable hasta los 700 °C y pueden soportar picos de temperatura de hasta 1000 °C, que, a pesar de no cumplir con los requisitos de la aplicación prevista, resultan adecuados para el experimento de prueba de concepto en el simulador solar.

2.2.- Montaje en el simulador solar de alto flujo

Para el presente trabajo, la primera prueba de concepto fue realizada en el simulador solar de alto flujo KIRAN-42 localizado en IMDEA Energía (Móstoles, Madrid) y la segunda en el HFSS que se encuentra en Centro Nacional de Energías Renovables - CENER (Sarriguren, Spain).

KIRAN42 utiliza siete lámparas de xenón dispuestas de forma elipsoidal, permitiendo alcanzar una densidad de flujo pico de 3.6 MW/m^2; aunque en los experimentos sólo una de ellas fue empleada. Enfrentado al simulador, una mesa de posicionamiento en tres ejes permite realizar el montaje que se detalla más adelante. Además, el ensayo incluye un radiómetro Gardon de referencia con el que comparar las medidas realizadas por el dispositivo basado en fibra óptica. El control del sistema se realiza externamente, permitiendo manejar las lámparas, la mesa de pruebas, la cámara CCD y los sistemas de refrigeración. Durante 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, como se muestra en la Fig. 2a, 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.

Por otro lado, el simulador solar de CENER cuenta con una lámpara de xenón que se encuentra dentro de una cámara, como se muestra en la Fig. 2b. Este simulador posibilita niveles de potencia ajustables y cuenta con un espejo elipsoidal que enfoca la luz emitida, permitiendo variar el flujo solar desde aproximadamente 180 kW/m² hasta 1.1 MW/m² en el punto focal. 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.



(a)

(b)

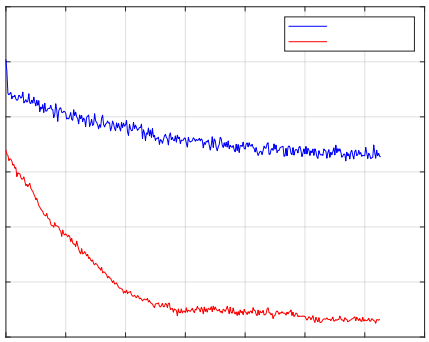
Figura 2. (a) Montaje del extremo de la fibra expuesta a la radiación en el simulador solar de IMDEA Energía y (b) detalle de la parte posterior del montaje en el simulador solar de CENER.

3.- Resultados

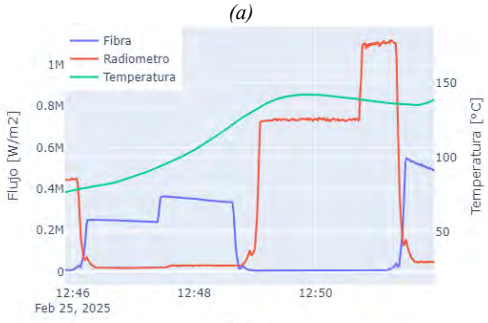
Los resultados obtenidos en las dos campañas de ensayos en simulador solar avalan el uso de la configuración propuesta como válida para la medida de flujo concentrado. Estas pruebas de concepto han permitido identificar algunos problemas deben ser atajados antes de realizar el diseño final que será instalado en los receptores CSP. Entre todas las fibras, aquellas con mayores diámetros, de 200 µm, son las que han obtenido mejores resultados de medida; siendo son los que se reportan a continuación.

La primera observación que debe hacerse 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 Fig.

3a, correspondiente a los experimentos realizados en IMDEA Energía, se observan valores de flujo máximos ligeramente superiores a 190 kW/m^2 y 170 kW/m^2 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/m^2. El mismo fenómeno fue observado en el simulador solar de CENER, como se muestra en la Fig. 3b. En este caso, se muestra la evolución en la medida comparando los valores arrojados por el Gardon y la fibra, donde se comparan la medidas arrojadas por los dos instrumentos colocándolos en el foco de forma alterna en tres posiciones distintas de potencia. En este caso, se observa que el flujo medido por la fibra es en todos los casos de aproximadamente la mitad de la medida proporcionada por el Gardon.



(a)



(b)

Figura 3. (a) Medida de flujo concentrado con fibras con recubrimiento de oro y poliamida en IMDEA Energía y (b) medida de flujo concentrado con fibra óptica y recubrimiento de poliamida en CENER.

Esta discrepancia en las medidas de flujo óptico entre el radiómetro Gardon y el radiómetro basado en fibra óptica tiene varias causas. El motivo fundamental está relacionado con los ángulos de incidencia de la luz. En el caso de las fibras ópticas, la apertura numérica de 0.22 define un campo de visión de 24º, suficiente para acoplar la luz en el simulador solar de IMDEA, pero no en el de CENER, donde más del 35% de los rayos dirigidos por la lámpara tienen mayor apertura de la marcada por el cono de aceptación de la fibra y, por tanto, no pueden ser capturados por la fibra, lo que explica la diferencia tan grande con el Gardon en este caso. 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.

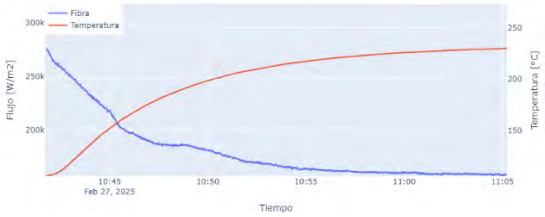


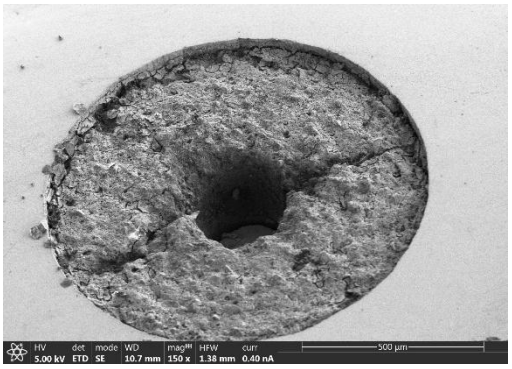
Figura 4. Medida de flujo concentrado en función de la temperatura utilizando fibra con recubrimiento de poliamida.

Además de este hecho, en la Fig. 4 se observa el otro gran problema que debe ser solucionado, que tiene que ver con la dependencia de la temperatura, que también se intuye en la Fig. 3, sobre todo en el caso de la fibra de poliamida. En este caso, se compara el flujo medido por la fibra óptica en el simulador solar de CENER con la medida de temperatura del termopar colocado detrás de la placa de acero; y resulta evidente que cuando la temperatura aumenta, la medida disminuye hasta que se alcanza el régimen permanente en ambas magnitudes.

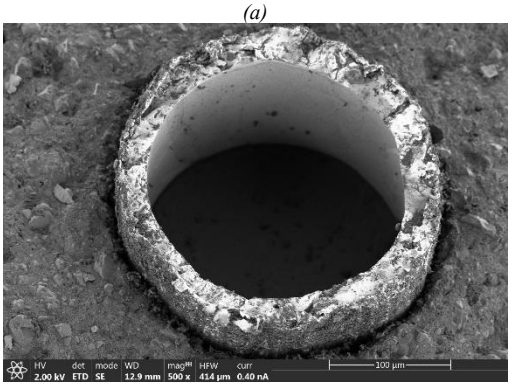
Después de realizar ambas campañas de medidas, algunas de las fibras puestas a prueba fueron llevadas a un SEM con el objetivo de evaluar el daño sufrido por las mismas, lo cual se muestra en la Fig. 5.

En primer lugar, en la Fig. 5a, se observa una fibra con 200 µm de diámetro de núcleo y recubrimiento de poliamida. En este caso, la observación más significativa es que la fibra

óptica se ha retraído de la superficie estructural circundante, en contraste con la Fig. 1b, donde la fibra se mostraba en línea con el resto del capilar. Además de este hecho, se observa un espacio vacío entre el núcleo de la fibra y el relleno de alúmina, lo que indica la pérdida o degradación del recubrimiento de poliamida. En dicha Fig. 5a también se muestran grietas en la alúmina que actúa como aislante, las cuales no deberían afectar al funcionamiento del sistema en tanto que este material sólo cumple la función de aislar térmicamente la fibra del resto del capilar.



(a)



(b)

Figura 5. Detalle de las puntas de las fibras ópticas observada con microscopía SEM tras su exposición a alta radiación: (a) fibra de 200 µm de diámetro de núcleo y recubrimiento de poliamida y (b) fibra de 200 µm de diámetro de núcleo y recubrimiento de oro.

Por otro lado, se muestra en la Fig. 5b una fibra del mismo tamaño, pero con recubrimiento de oro. La principal característica distintiva con respecto a la fibra analizada previamente es la integridad estructural del recubrimiento, que mantiene su cohesión en contraste con la degradación observada en los especímenes recubiertos de poliamida. Además, el recubrimiento de oro presenta un mayor grosor en comparación con los espacios vacíos observados en muestras anteriores, donde ocurrió la degradación del recubrimiento. 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. En ambas fibras, este fenómeno contribuye también a la pérdida de parte de la radiación incidente en la fibra óptica, afectando a la medida de flujo óptico, en tanto que se produce un efecto de túnel que ensombrece a la fibra y no permite capturar los rayos provenientes dentro su cono de aceptación completo.

4.- Conclusiones

En este trabajo, una prueba de concepto para evaluar el potencial de un montaje basado en fibra óptica y fotodiodo para medir flujo solar concentrado en receptores de CSP ha sido llevada a cabo. Distintas fibras se han puesto a prueba, alcanzando en dichos ensayos flujos superiores a 300 kW/m^2 y 550 kW/m^2, respectivamente; con temperaturas de operación superiores a 500 ºC en la punta de la fibra. 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. Entre ellos, se destaca la necesidad de ampliar el campo de visión de la fibra, actualmente limitado por la apertura numérica, para captar toda la radiación solar proveniente del campo de helióstatos, así como desarrollar estrategias para el montaje de las fibras en los receptores que reduzcan la conducción térmica y disminuyan la temperatura soportada por la punta de la fibra.

Tras la campaña de experimentos, se realizaron análisis con el SEM de los extremos de las fibras ópticas expuestas a la radiación, revelando modificaciones estructurales en su configuración. Se observaron grietas en el relleno de alúmina dentro del capilar metálico, que no deberían afectar las mediciones al ser solo un aislante térmico. En cuanto a los materiales que componen la fibra de alta temperatura, 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 de 1064 ºC. Asimismo, se detectaron desplazamientos en las fibras ópticas dentro del capilar metálico, en forma de retracción, lo que podría haber contribuido a pérdidas de potencia por efectos de sombreado en el núcleo de estas.

Actualmente, se trabajar en el desarrollo de estrategias para proteger la punta de la fibra de las condiciones extremas de operación que influyen en su degradación, al mismo tiempo que se busca reducir la sensibilidad térmica de la medida de flujo óptico.

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 Nº 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] N. Jelley et al., "Concentrated solar power: Recent developments and future challenges", Proc. Inst. Mech. Eng. Part A, 229(7), pp. 693-713 (February 2019). https://doi.org/10.1177/0957650914566895.

[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.