

## MEDICIÓN DE TEMPERATURA DE NO CONTACTO DE SUPERFICIES SÓLIDAS IRRADIADAS POR ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA MEDIANTE OBTURACIÓN CON PELÍCULAS PDLC: UNA NUEVA METODOLOGÍA

(NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT OF SOLID SURFACES IRRADIATED BY CONCENTRATED SOLAR ENERGY USING SHUTTING WITH PDLC FILMS: A NEW METHODOLOGY)

Licurgo Javier \*, Pérez-Rábago Carlos \*, Moreno-Alvarez L.\*\* , Marzo Aitor\*\*\* , Estrada Claudio\*

\*Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, AP 34, Temixco, 62580, Morelos, México., [capr@ier.unam.mx](mailto:capr@ier.unam.mx).

\*\*TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna, Av. Instituto Tecnológico de la Laguna y Blvd. Revolución s/n, Torreón, Coah, 27000, Mexico

\*\*\*Universidad de Antofagasta, Centro de Desarrollo Energético Antofagasta, Chile, Avda. Angamos, 601, 1270300 Antofagasta, Chile

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2070>

### RESUMEN

En este trabajo se presenta una nueva metodología para la medición de la temperatura de superficies sólidas expuestas a radiación solar concentrada, mediante la técnica de obturación utilizando una película PDLC. Esta nueva metodología permitirá separar el espectro de radiación emitido por la muestra del espectro de radiación reflejado, y permitirá medir solamente la temperatura referente a la potencia emisiva de la muestra, utilizando un pirómetro monocromático en un horno solar. Se describe el arreglo experimental que se propone para implementar esta metodología. El arreglo consistente de un horno solar (MHS IER-UNAM), de una ventana de película PDLC y de una cámara de medición de temperatura. Se muestran las transmitancias de la película PDLC destacando la pertinencia de su uso para esta aplicación solar. La calibración del pirómetro monocromático arrojó un aff-set del -4% del valor nominal. La respuesta térmica de la muestra de grafito que se usará como referencia arrojó valores entre 502.6 y 1747.8 segundos dependiendo del proceso de calentamiento o enfriamiento.

PALABRAS CLAVE: Energía Solar concentrada, Medición de temperatura de no contacto, Películas PDLC.

### ABSTRACT

In this work, a new methodology for measuring the temperature of solid surfaces exposed to concentrated solar radiation, using the shutter technique and a PDLC film is presented. This new methodology will allow the separation of the radiation spectrum emitted by the sample from the reflected radiation spectrum, and it will allow only the temperature referring to the emissive power of the sample to be measured, using a monochromatic pyrometer in a solar furnace. The experimental arrangement that is proposed to implement this methodology is described. The arrangement consisting of a solar furnace (MHS IER-UNAM), a PDLC film window and a temperature measurement chamber. The transmittances of the PDLC film are shown, highlighting the relevance of its use for this solar application. The monochrome pyrometer calibration yielded an aff-set of -4% of the nominal value. The thermal response of the graphite sample to be used as a reference yielded values between 502.6 and 1747.8 seconds depending on the heating or cooling process.

KEYWORDS: Concentrated Solar Energy, Non-contact Temperature Measurement, PDLC Films.

## INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de concentración solar son sistemas ópticos que reflejan la radiación solar a un receptor/reactor que absorbe dicha radiación convirtiéndola en energía útil para producir electricidad, combustibles solares o calor de proceso. Medir temperaturas en presencia de radiación externa intensa es un problema común al usar estas tecnologías.

Por ejemplo, en aplicaciones como los procesos termoquímicos solares, los cuales tienen lugar en intervalos de temperatura desde los 500 K, como gasificación o pirólisis, hasta cercanos a los 2500 K, como la disociación directa de la molécula de agua (Kodama 2003), es esencial conocer la temperatura en dichos procesos. Medir la temperatura permite, por un lado, conocer una variable termodinámica del proceso y por otro lado, dar seguimiento y control al proceso durante la experimentación/operación. Los sensores disponibles para medir temperatura pueden ser de contacto como termopares y de no contacto como los pirómetros y cámaras demográficas. En un entorno solarmente irradiado, los sensores de contacto pueden ser invasivos al tratar de medir la temperatura en el proceso termoquímico, además que pueden dañarse al ser colocados en zona de alta concentración solar. Por su parte, los sensores de no contacto no son invasivos, pero al ser de tipo ópticos, su funcionamiento se ve afectado por la energía que refleja la muestra, entregando lecturas de temperatura sobrestimadas.

El fenómeno físico más sencillo que se puede tener al irradiar al receptor de un concentrador solar, corresponde a la incidencia de la radiación solar concentrada sobre una pared sólida del reactor, o bien sobre una placa de algún material sólido al interior de alguna cámara de reacción. Esta placa se puede denominar “la muestra”. Al irradiar una muestra opaca con un concentrador solar, parte de la radiación que incide sobre la muestra es reflejada y otra parte es absorbida. La energía que absorbe la muestra le permite ganar calor y con ello se presenta un incremento en su temperatura, en consecuencia, la muestra emite energía con una potencia emisiva a dicha temperatura. En un concentrador solar la fuente de radiación externa es el sol, el cual si consideramos el espectro estándar de radiación solar, tiene una distribución de potencia emisiva espectral con un pico  $\lambda_{\max}$  en 0.6 micrones (Gueymard et al. 2002), mientras que una muestra, que por ejemplo al ser irradiada alcance los 2500 K, emitirá energía a una  $\lambda_{\max}$  en 1.16 micrones. El problema es que en un entorno solarmente irradiado ambos espectros se superponen y no es posible distinguir de manera inmediata la componente de emisión térmica de la muestra de la componente reflejada.

Las metodologías desarrolladas para la medición de temperatura en entornos solarmente irradiados se pueden dividir en tres grupos. La primera corresponde a la separación de la radiación reflejada de la emitida por una muestra por métodos de obturación de la radiación concentrada incidente. La obturación momentánea de la radiación permite medir la temperatura de la muestra sin que esta refleje radiación incidente. Ejemplo de ello es la pirometría por sectores rotantes como lo describe en su trabajo CONN & BRAUGHT en 1954; y la doble modulación, metodología que es aplicable en simuladores solares, que permite modular la frecuencia del arco eléctrico en las lámparas de un simulador (Alxneit 2011; Potamias et al. 2017). El segundo grupo incluye métodos de medición in situ, los cuales se denominan así porque permiten determinar durante la experimentación valores de emisividad y de temperatura de un material, por ejemplo la pirometría bicolor de Brenden y de Herne (Brenden et al. 1958), (Herne 1953), o la piroreflectometría de Hernández y Schubnell y Tschudi, (Hernandez et al. 1995) FAMP (Schubnell & Tschudi 1995, Tschudi & Schubnell 1999). El tercer grupo de metodologías corresponde a aplicación de filtros selectivos que les permiten acotar la visión de un pirómetro en la banda de absorción atmosférica de los 1.398 micrones, el llamado “solar blind”, (Tschudi & Morian 2001; Hernandez et al. 2004). Existen estudios que buscan probar el solar blind en otras bandas de absorción (Hernandez et al. 2004) para finalmente aprovechar la absorción espectral en el espectro de radiación solar al pasar por las etapas ópticas de helióstato y concentrador (Marzo et al. 2014; Ballestrín et al. 2009).

El uso de filtros selectivos depende en gran medida de una caracterización espectral del sistema que se piensa utilizar para irradiar a las muestras. Los métodos de medición in situ, por el modo en que trabajan, requieren de referencias externas que estén siendo monitoreadas junto con la muestra que se desea medir, lo cual implica montajes experimentales más elaborados. Los métodos de obturación, como los sectores rotantes, dependen de que el bloqueo de la radiación no sea tan prolongado como para que la estabilidad térmica de la muestra decaiga, además de que en sus inicios fueron dispositivos mecánicos que inducían vibraciones en la muestra, provocando un desenfoque del pirómetro sobre la muestra. El objetivo del presente trabajo es presentar una nueva metodología de obturación de la radiación solar y el avance que se tiene en su implementación. La obturación de la radiación permitirá separar el espectro de radiación emitido por la muestra, del espectro de radiación reflejado y permitirá leer solo la temperatura referente a la potencia emisiva de la muestra.

## METODOLOGÍA

La temperatura medida por un sensor de no contacto -como un pirómetro- en una superficie calentada mediante la irradiación solar, no corresponde en realidad a la temperatura real de la superficie, sino a la interpretación de su radiosidad que hace el instrumento, considerando en la lectura tanto la componente de emisión térmica de la muestra, como la componente de la irradiación solar reflejada por la misma. Para poder medir de forma precisa la temperatura de la muestra, se requiere entonces de alguna técnica para desacoplar la información radiativa detectada en conjunto por el termómetro de no contacto, o bien para bloquear la componente reflejada de la irradiación sin alterar de forma significativa el estado térmico de la muestra.

Dentro de este último enfoque, las propiedades optoelectrónicas de las películas de polímeros dispersos en cristal líquido (o PDLC, por el acrónimo de su expresión en inglés), de uso recurrente en la actualidad para el control de la iluminación natural en las edificaciones, resultan muy útiles para su uso en una técnica de obturación de alta velocidad para el bloqueo momentáneo de la irradiación solar en una medición de temperatura de no contacto de una muestra solarmente irradiada. Así, la metodología propuesta consiste en utilizar una pantalla de PDLC como un obturador colocado entre el sol y el sistema de concentración que, mediante la estimulación eléctrica adecuada, permita modular la irradiación solar sobre la muestra en pulsos de escalón los suficientemente breves respecto de su respuesta térmica como para permitir efectuar las mediciones de la potencia emisiva de la superficie con el sensor óptico de no contacto sin influenciar de manera perceptible su temperatura. Las particularidades experimentales de esta metodología se detallan a continuación.

## PROPUESTA EXPERIMENTAL

En la Fig. 1 se presenta el esquema experimental propuesto para la implementación de la metodología descrita en la sección anterior. La muestra será irradiada por radiación solar concentrada proveniente de un helióstato en haces paralelos al eje óptico del sistema de concentración, que pasarán previamente a través de una ventana PDLC, colocada en el camino óptico entre el helióstato y el concentrador, mientras ésta se encuentra en su estado de máxima transmisividad óptica, o estado "ON", conseguido mediante la presencia de estimulación eléctrica a través de una diferencia de potencial (Fig.1). El flujo radiativo concentrado  $G$  incidirá en la zona focal del sistema, donde se encontrará colocada la cámara de reacción, que en su interior alojará la muestra, que ganará una cantidad de energía  $\alpha G$  y aumentará su temperatura, emitiendo en consecuencia la radiación térmica correspondiente  $E_m$ , que será detectada por el pirómetro junto con la irradiación solar reflejada  $\rho G$ , siendo  $\alpha$  y  $\rho$  la absorptividad y la reflectividad respectivas de la muestra. Cuando el estímulo eléctrico sobre la ventana PDLC es detenido, su estado óptico cambiará al valor de mínima transmisividad, o estado "OFF", bloqueando momentáneamente el paso de la radiación proveniente del helióstato, permitiéndole al pirómetro la detección de la potencia emisiva  $E_m$  de la muestra sin el efecto de la irradiación reflejada, registrando así la temperatura correcta.

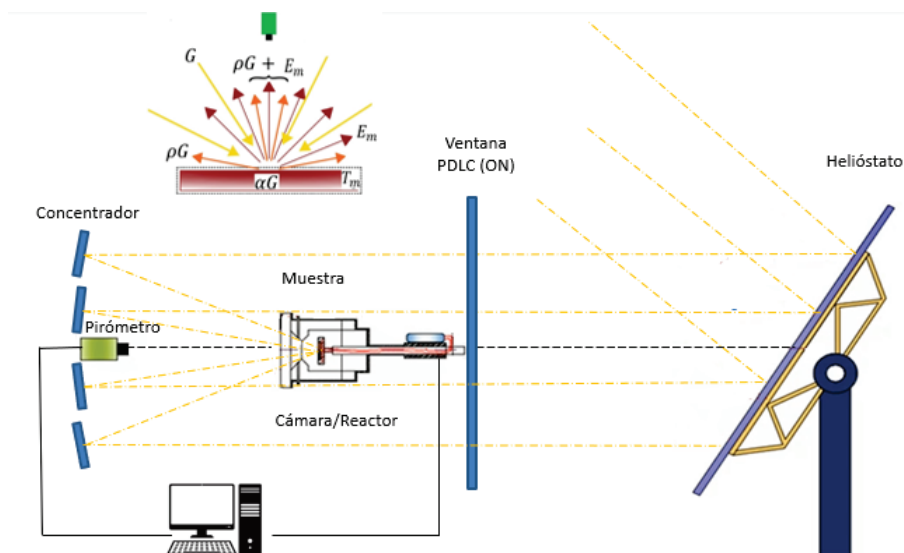


Fig. 1. Propuesta del diseño experimental: con ventana PDLC que puede estar estados ON y OFF.

Para conseguir una implementación exitosa de esta propuesta experimental, se requiere efectuar una serie de calibraciones de los instrumentos de medición y de caracterizaciones previas de los distintos elementos del arreglo experimental, como la determinación de la transmisividad de la película PDLC, y su efecto en el perfil del flujo radiativo del sistema de concentración, así como de los tiempos de respuesta térmicos característicos de la muestra. La descripción de estas caracterizaciones y calibraciones se hará en las secciones siguientes.

## PELÍCULA PDLC

Existen materiales a base de polímeros o vidrio, que pueden cambiar su nivel de transparencia cuando son estimulados con una señal eléctrica. El cristal líquido (LC) es uno de estos materiales que permiten conmutar su transmitancia cuando se le suministra corriente alterna (AC). Una película PDLC es un material que contiene al cristal líquido disperso en una matriz de polímero, la cual se encuentra en medio de dos capas que también pueden ser de otro polímero o un cristal. Cuando se estimula la película PDLC, los cristales líquidos que contiene, se orientan internamente de modo que permiten el paso de la luz y en este estado se comporta como un material transparente. Cuando se suspende el suministro de CA, la orientación del cristal se vuelve aleatoria y la luz que intenta cruzar por dicha película se dispersa de manera difusa, lo que ofrece un estado translúcido o de baja transmitancia, (Ghosh & Mallick 2018).

Para determinar el nivel de transmitancia de la película PDLC en sus dos estados de operación, estado excitado (ON) y no excitado (OFF), se realizó una caracterización de su espectro de transmitancia. Para ello se utilizó un espectrofotómetro con rango de operación de 300-2000 nm. En la Fig. 2 se presenta el espectro de radiación solar estándar y las curvas de transmitancia de la película en estado ON y OFF. Una vez conocidos los espectros de transmitancia nos interesa conocer su comportamiento al paso del espectro de la radiación solar. En la misma Fig. 2 se muestra el espectro de radiación solar estándar en una línea negra. Se delimita entre líneas rojas verticales la zona correspondiente al espectro de radiación visible (400-700 nm) en la cual se puede apreciar que el comportamiento de la película tiene la mayor transparencia en estado ON y la más baja transmitancia en estado OFF, con lo cual se espera conseguir un bloqueo de la radiación solar. Con los espectros de transmitancia de la película PDLC, se calculó la transmitancia espectral respecto al espectro de radiación solar estándar con la ecuación 1 (Duffie and Beckman, 1991). De los resultados obtenidos se tiene un valor para  $\tau_{ON} = 76.2 \%$  y un valor de  $\tau_{OFF} = 7.9 \%$ .

$$\tau = \frac{\int_{300}^{2000} \tau_{\lambda} G_b d\lambda}{\int_{300}^{2000} G_b d\lambda} \quad (1)$$

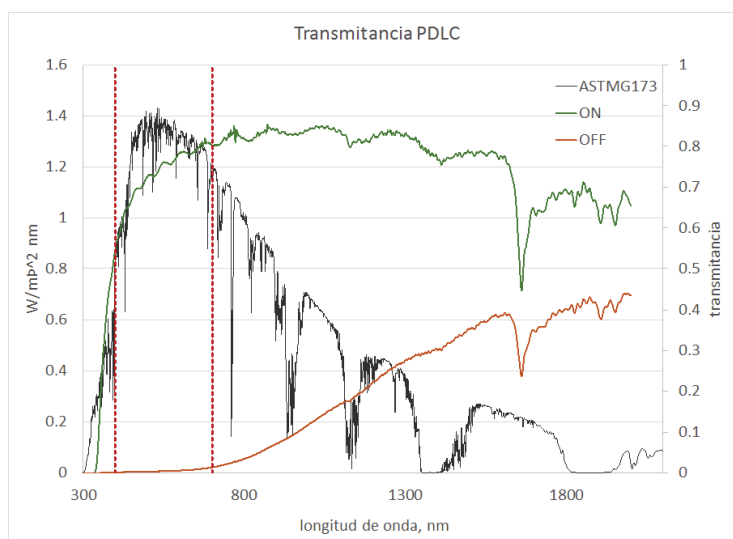


Fig. 2 Espectro de transmitancia para película PDLC

### SISTEMA DE CONCENTRACIÓN

El horno solar utilizado es el mini horno solar (MHS) del IER-UNAM que su óptica de concentración se compone de 18 espejos esféricos de primera superficie montados en una estructura plana, los cuales tienen 30 cm de diámetro y está hecho de vidrio aluminizado con una reflectividad media de 0.95 sobre el espectro solar. Se agrupan en tres conjuntos de seis espejos cada uno, denominados A, B y C. La diferencia entre los tres conjuntos de espejos es la distancia focal con valores cercanos a los 2 m. La superficie total de los reflectores es de 1.27 m<sup>2</sup>. El MHS también consta de un heliostato de 5.6 m<sup>2</sup> formado por 4 facetas (1.2m x 1.2 m) montadas sobre una estructura planar que a su vez esta montada sobre un cabezal que le permite tener un movimiento azimutal y de elevación. Con este sistema, se consigue que la radiación solar sea reflejada paralelamente al eje óptico de conjunto de espejos.

La Figura 3 muestra: a) una representación esquemática del MHS y b) los tres conjuntos de espejos. La imagen de la radiación solar concentrada por el MHS en su zona focal, es de aproximadamente 2.8 cm de diámetro con una concentración media cercana a los 3000X, y un pico de concentración solar por encima de 4600X como se describe en el trabajo de (Jaramillo et al. 2008).

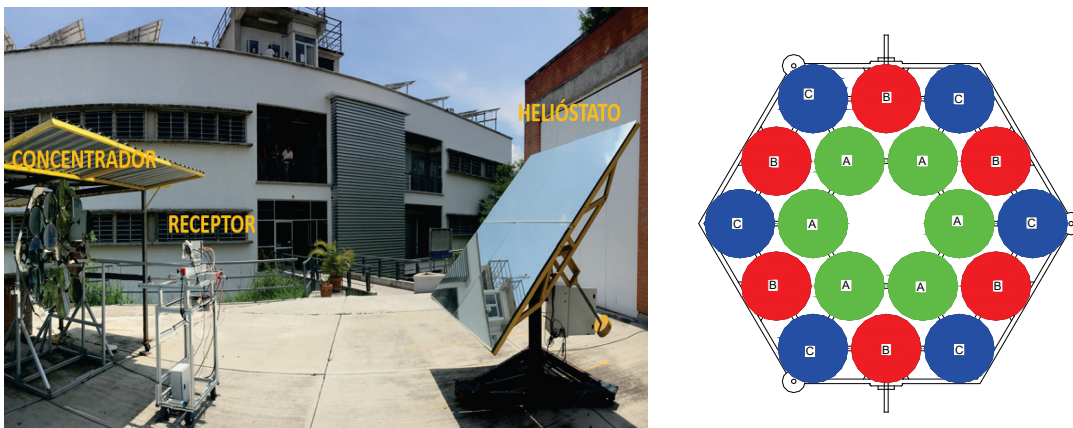


Fig 3. a) Fotografía esquemática del MHS, b) Configuración de los tres grupos de espejos,

### CÁMARA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Para implementar esta metodología de medición de temperaturas en el interior de receptores/reactores, se utiliza una cámara diseñada exprofeso para tener mediciones de temperatura fijas similar al de reactores termoquímicos, con la variante de que, en el fondo de la cavidad, se ubica la muestra (50 mm de diámetro) como se puede ver en la Fig. 4.

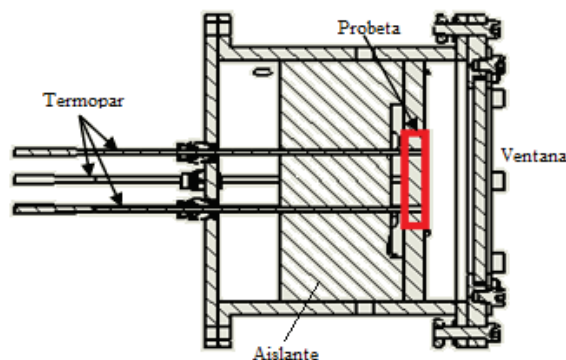


Fig. 4. Esquema de la cámara de medición de temperaturas.

Al colocar la película PDLC en la trayectoria óptica de los rayos solares que van del heliostato al concentrador del MHS, aún en su estado ON, se verá disminuida la cantidad de energía solar concentrada en la zona focal donde se ubica la muestra debido a la transmitancia de la película. Para determinar la disminución de esta energía, se realizó una simulación por trazado de rayos, utilizando el Software Tonatiuh (Ref.), donde se obtuvo la distribución de flujo incidente en la muestra ubicada dentro de la cámara. Se consideraron tres configuraciones distintas: a) el MHS sin la

ventana PDLC, b) el MHS con una ventana PDLC enfrente del heliostato en modo ON ( $\tau_{ON} = 76.2\%$ ), y c), el MHS con una ventana PDLC enfrente del heliostato en modo OFF ( $\tau_{OFF} = 7.9\%$ ). En la figura 5 se muestra la distribución de flujo radiativo en la muestra en los tres casos propuestos y en la Tabla 1 se presentan los valores críticos obtenidos de esta modelación.

Como se puede ver en la Tabla 1, hay una penalización en el uso de la ventana PDLC del 23.8% de la potencia concentrada.

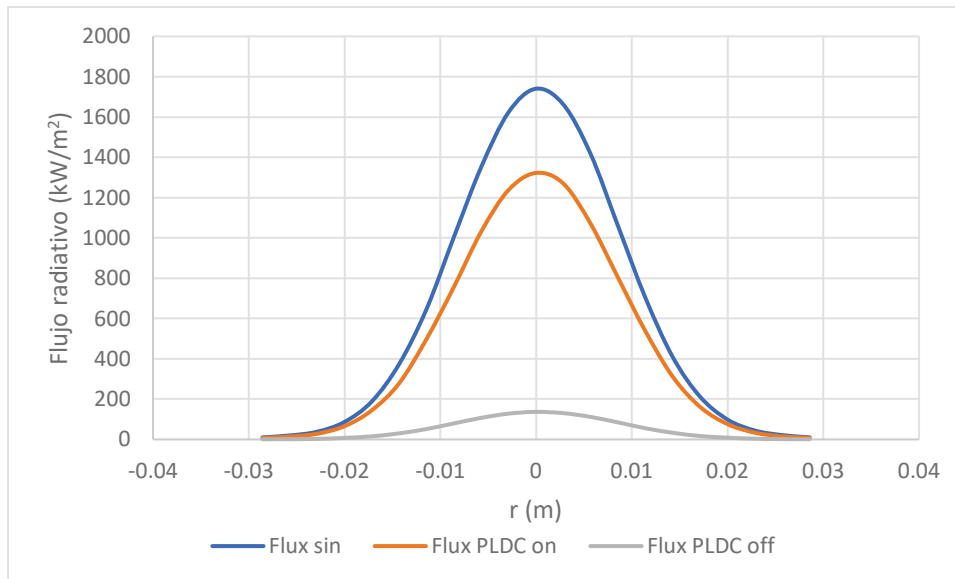


Fig. 5. Distribución de flujo radiativo en el MHS sin PLDC, con PLDC on y off.

Tabla 1. Valores críticos de la potencia concentrada.

Heliostato	Sin PDLC	Ventana PDLC ON	Ventana PDLC ON
t	100 %	76.2 %	7.9 %
Potencia concentrada (W)	854.6	649.3	61.5
Flujo radiativo pico (kW/m <sup>2</sup> )	1740.03	1315.4	123.8
Flujo radiativo promedio (kW/m <sup>2</sup> )	237.4	180.36	17.1

## CALIBRACIÓN DEL PIRÓMETRO Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LA MUESTRA

Dentro de los experimentos previos destinados a calibrar los instrumentos de medición y a caracterizar los materiales de interés, la calibración más importante corresponde al pirómetro que se utilizará como sensor de temperatura de no contacto. El pirómetro en uso es un pirómetro Omega OS3750 monocromático, con detector de Si/InGaAs para una longitud de onda de  $0.9\ \mu\text{m}$ , en un rango de medición de 400 a 3000 °C, teniendo una precisión nominal de  $\pm 6\ \text{°C}$  para  $T < 1000\ \text{°C}$  y de  $\pm 0.6\%$  para  $1000\ \text{°C} < T < 1500\ \text{°C}$ , que es el rango de operación de interés en las aplicaciones de la metodología.

A partir de la ley de Planck se puede obtener una expresión para la emisividad efectiva del pirómetro empleando en el cálculo su longitud de onda de operación, su temperatura medida y la temperatura del cuerpo negro. Esta expresión debería coincidir con el valor de la emisividad del cuerpo negro, que es el valor de 1 ingresado manualmente en el instrumento, si y sólo si la temperatura medida por el pirómetro es igual a la temperatura del cuerpo negro, de manera que una desviación en este parámetro es equivalente a una desviación en la lectura de la temperatura registrada por el pirómetro. Se realizó la calibración y se encontró un offset en la emisividad seleccionada de  $-4\% \pm 1.9\%$ .

El tiempo de respuesta térmica  $\tau$  de la muestra de referencia a utilizar (un disco de grafito de 7.9 mm de diámetro, 3.2 mm de espesor y 0.12555 Kg de masa), se determinó mediante el análisis de las curvas de temperatura contra

tiempo del conjunto de termopares dispuestos a través de su geometría. En la Fig. 6 Izq. se muestra el arreglo experimental para la caracterización de este tiempo de respuesta térmica. El disco queda expuesto en su cara anterior, mientras la lateral y la posterior se encuentran aisladas por un dispositivo cerámico de alúmina de baja densidad, ver Fig. 6 Centro. La cara posterior del disco es calentada de manera uniforme –como puede deducirse de la conducta térmica de los termopares radialmente simétricos (25 mm de separación) al interior del disco y en las dos caras sometidas a intercambio térmico– a través de una resistencia eléctrica de  $13.6 \Omega$  sometida a una diferencia de potencial de 71 V-CA, considerando la potencia ( $V^2/R = 368W$ ) disipada por la resistencia como la medida del calor entregado al sistema por unidad de tiempo, ver Fig. 6 Der.

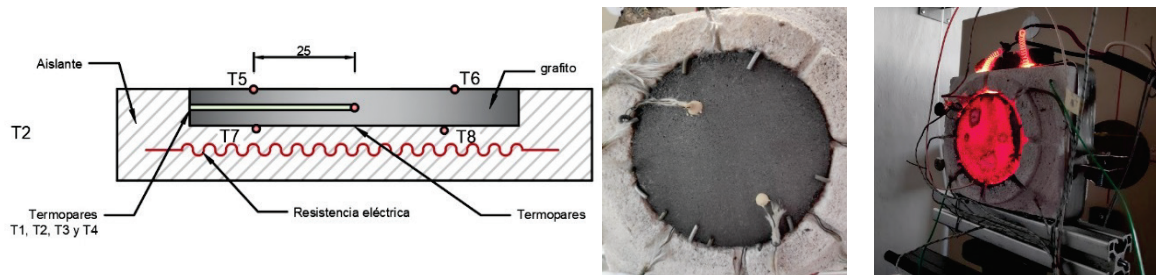


Fig. 6. (Izquierda) Arreglo experimental para la caracterización del tiempo de respuesta térmica del disco de grafito utilizado como material de referencia. (Centro) Disco montado en el dispositivo de aislante cerámico. (Derecha) Fotografía del dispositivo térmico durante el proceso de calentamiento eléctrico.

Las curvas de historia térmica de los termopares representativos de la superficie anterior (T5) y posterior (T7), ambos dispuestos a  $\sim 1mm$  de profundidad, así como del interior del disco (T1, a 3 mm de la cara anterior) durante el calentamiento y el enfriamiento de la muestra, conseguido al abrir el circuito eléctrico de la resistencia, se muestran en la Fig. 7.

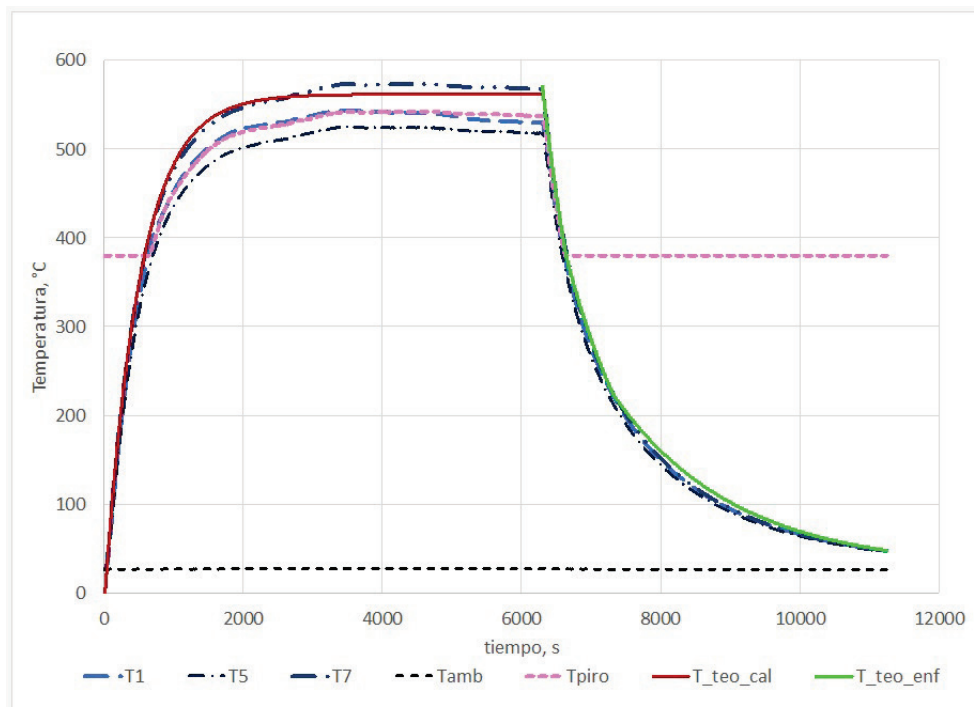


Fig. 7. Curvas de historia térmica de las caras anterior (T5) y posterior (T7), así como del interior (T1) del disco de grafito durante el proceso de enfriamiento/calentamiento.

Las ecuaciones de las curvas teóricas para la temperatura de la cara posterior del disco durante el calentamiento y el enfriamiento, obtenidas mediante un análisis de transferencia de calor propuesto recientemente por uno de los coautores (Moreno 2019), basado en un modelo de resistencias y capacitancias térmicas (Leinhard 2016) son respectivamente:

$$T_{\text{teo,cal}} = T_{\text{amb}} + (T_{\infty} - T_{\text{amb}}) (1 - \text{Exp}[-(t - t_{\text{off}})/\tau]) \quad (2)$$

$$T_{\text{teo,enf}} = T_{\text{amb}} + (T_0 - T_{\text{amb}}) \text{Exp}[-(t - t_{\text{off}})/\tau] \quad (3)$$

Los tiempos de respuesta utilizados para modelar estas curvas, graficadas también en la figura 7, aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2. Tiempos de respuesta térmicos y valores iniciales de temperatura del disco de grafito

Proceso	$\tau / s$	$\delta\tau / s$	$T_0 / ^\circ\text{C}$
Calentamiento	502.6	1.4	26.83
Enfriamiento 1 ( $t < 343$ s)	792.8	1.0	570.81
Enfriamiento 2 ( $343 \text{ s} < t < 1012$ s)	1159.7	1.9	376.66
Enfriamiento 3 ( $1012 \text{ s} < t$ )	1747.8	1.1	233.32

El comportamiento temporal de la temperatura medida con el pirómetro, con una emisividad seleccionada como 1, coincide muy bien con la medición de la temperatura interna del disco ( $T_1$ ); sin embargo, aún falta por considerarse el efecto del offset de calibración de la emisividad en dicha temperatura, que idealmente debería coincidir con el valor de la temperatura de la superficie anterior ( $T_7$ ). Investigaciones en progreso sugieren que esta discrepancia puede deberse al cambio en la emisividad del material con la temperatura, y los resultados de éstas, así como el modelo de transferencia de calor mencionado, serán reportados en otras publicaciones posteriores.

## CONCLUSIONES

Se presentó una nueva metodología de obturación de la radiación solar para superficies sólidas expuestas a radiación solar concentrada, mediante el uso de una película PDLC, que permitirá separar el espectro de radiación emitido por la muestra, del espectro de radiación reflejado, y permitirá leer solo la temperatura referente a la potencia emisiva de la muestra, utilizando un pirómetro monocromático.

Se presento el avance de la implementación de esta metodología describiendo el arreglo experimental consistente de un horno solar (MHS IER-UNAM), de la ventana de película PDLC y de una cámara de medición de temperatura. Se presentaron las transmitancias de la película PDLC mostrando la pertinencia para esta aplicación solar. Y se presentaron la calibración del pirómetro monocromático y la determinación del tiempo de respuesta térmico de la muestra a utilizar.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, con el financiamiento del proyecto PAPIIT IG100919. Javier Licurgo agradece al Fondo CONACYT-SENER por la beca de posgrado. Claudio A. Estrada agradece a DGAPA la beca PAPIIT para estancia sabática en la Universidad de Arizona.

## REFERENCIAS

Alonso, E. et al., 2015. First experimental studies of solar redox reactions of copper oxides for thermochemical energy storage. *Solar Energy*, 115, pp.297–305. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X15001206>.

Alonso, E. et al., 2017. Use of rotary kilns for solar thermal applications : Review of developed studies and analysis of their potential. *Solar Energy*, 144, pp.90–104.



- Alxneit, I., 2011. Measuring temperatures in a high concentration solar simulator - Demonstration of the principle. *Solar Energy*, 85(3), pp.516–522. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.016>.
- Ballestrín, J. et al., 2009. A solar-blind IR camera prototype. *SolarPaces Conference*, pp.1–8.
- Brenden, B.B., Newkirk, H.W. & Woodcock, S.H., 1958. A study of temperature measurement in a solar furnace. *Solar Energy*, 2(1), pp.13–17. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X58900033>.
- Carvajal-Campos, Y. et al., 2019. Synthesis and characterization of tantalum carbide nanoparticles using concentrated solar energy. *Advanced Powder Technology*, 30(11), pp.2574–2579.
- Ceballos-Mendivil, L.G. et al., 2015. Synthesis of silicon carbide using concentrated solar energy. *Solar Energy*, 116, pp.238–246.
- Conn, W.M., 1951. A Solar Furnace of 120 Inches Diameter for Studying Highly Refractory Substances. *Review of Scientific Instruments*, 22(12), pp.945–951. Available at: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1745835>.
- CONN, W.M. & BRAUGHT, G., 1954. Separation of Incident and Emitted Radiations in a Solar Furnace by Means of Rotating Sectors. *Journal of the Optical Society of America*, 44(1), p.45. Available at: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-44-1-45>.
- Gallo, A. et al., 2019. A lab-scale rotary kiln for thermal treatment of particulate materials under high concentrated solar radiation: Experimental assessment and transient numerical modeling. *Solar Energy*, 188, pp.1013–1030.
- Gueymard, C.A., Myers, D. & Emery, K., 2002. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing. *Solar Energy*, 73(6), pp.443–467.
- Hernandez, D. et al., 2004. Analysis and Experimental Results of Solar-Blind Temperature Measurements in Solar Furnaces. *Journal of Solar Energy Engineering*, 126(1), p.645.
- Hernandez, D. et al., 1995. Bicolor pyroreflectometer using an optical fiber probe. *Review of Scientific Instruments*, 66(12), pp.5548–5551.
- Herne, H., 1953. The theoretical characteristics of bichromatic pyrometers. *Applied Physics*.
- Jaramillo, O. a. et al., 2008. A flat-plate calorimeter for concentrated solar flux evaluation. *Renewable Energy*, 33(10), pp.2322–2328.
- Kodama, T., 2003. High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels,
- Marzo, A. et al., 2014. Solar blind pyrometry not relying on atmospheric absorption bands. *Solar Energy*, 107, pp.415–422.
- Potamias, D., Alxneit, I. & Wokaun, A., 2017. Double modulation pyrometry: A radiometric method to measure surface temperatures of directly irradiated samples. *Review of Scientific Instruments*, 88(9).
- Schubnell, M. & Tschudi, H.R., 1995. Simultaneous measurement of irradiation, temperature and reflectivity on hot irradiated surfaces. *Applied Physics A Materials Science & Processing*, 60(6), pp.581–587.
- Tschudi, H.R. & Morian, G., 2001. Pyrometric Temperature Measurements in Solar Furnaces. *Journal of Solar Energy Engineering*, 123(2), p.164. Available at: <http://solarenergyengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1456201>.
- Tschudi, H.R. & Schubnell, M., 1999. Measuring temperatures in the presence of external radiation by flash assisted multiwavelength pyrometry. *Review of Scientific Instruments*, 70(6), pp.2719–2727. Available at: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1149835>.