

**Estudios calorimétricos para la medición de propiedades opto-térmicas en sólidos
sujetos a altas temperaturas y altos flujos radiativos**

Moreno-Alvarez L., Pérez-Rábago C., Pérez-Enciso R., Estrada C.

Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México,
Privada Xochicalco s/n, Temixco, Morelos 62580, México
lumo@ier.unam.mx, luar.moreno@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo mostramos el estudio analítico del intercambio de calor radiativo en un calorímetro propuesto para medir las propiedades de absorptividad y emisividad de materiales sometidos a altas temperaturas producidas por la radiación solar altamente concentrada del Horno Solar del Instituto de Energías Renovables de la UNAM (HoSIER), que nos permitió detectar la necesidad de una modificación al diseño del prototipo para conseguir mediciones adecuadas.

PALABRAS CLAVE: Emisividad, Absorptividad, Calorimetría

ABSTRACT

In this work we show the analytical study of radiative heat exchange in a proposed calorimeter to measure the properties of absorptivity and emissivity of materials under high temperatures produced by the highly concentrated solar radiation of the Solar Oven at Renewable Energy Institute of UNAM (HoSIER), that allowed us to detect the need for a modification to the design of the prototype in order to get proper measurements.

KEYWORDS: Emissivity, Absorptivity, Calorimetry

INTRODUCCIÓN

El cambio climático generado por las emisiones de CO₂ producidas por la economía industrial basada en combustibles fósiles puede dar lugar a un colapso ambiental, económico y social de proporciones globales en unas cuantas décadas. Para evitarlo, muchos países han decretado ya que parte de su producción de electricidad tenga origen en una fuente renovable. Según la Agencia Internacional de Energía, esto producirá que para 2050 el 50% de las nuevas plantas de generación estén basadas en energías limpias y sustentables, alcanzando el segundo lugar a nivel mundial, y se espera que para el año 2035, el 30% del consumo de energía sea de fuentes renovables (International Energy Agency 2013). Dentro de esta tendencia, las plantas solares de receptor central para producción de electricidad prometen ser unas de las más viables para reemplazar a las plantas de generación mediante combustibles fósiles, por lo que la investigación y el desarrollo de sus componentes y subsistemas básicos se encuentran en pleno auge (Behar *et al.* 2013). La operación de muchas de estas plantas termoeléctricas solares se basa en el uso de receptores que absorben energía de la radiación solar altamente concentrada para transferirla a un fluido térmico que utiliza su calor para generar electricidad por medio de máquinas que funcionan en ciclos termodinámicos convencionales. La eficiencia del proceso está determinada por la capacidad del material para absorber la energía del receptor y minimizar sus pérdidas por radiación, que a las temperaturas de funcionamiento del sistema (miles de grados Celsius) son las más importantes. Por lo tanto, el conocimiento preciso de la absorptividad y emisividad de materiales a altas temperaturas es esencial en el diseño de receptores solares. Sin embargo, estas propiedades generalmente se conocen solamente por mediciones realizadas a baja temperatura o por dispositivos que no reproducen las condiciones de operación típicas de los receptores, por lo que es necesario diseñar sistemas de medición que superen estas deficiencias. Para atender esta necesidad, el equipo del Laboratorio Nacional de Concentración y Química Solar (LACYQS) propuso con anterioridad el diseño de un calorímetro de agua fría (Estrada *et al.* 1999) que permitiera efectuar la medición de dichas propiedades optotérmicas. En este trabajo efectuamos el estudio analítico del intercambio de calor radiativo de este calorímetro considerando las condiciones de radiación solar altamente concentrada del Horno Solar del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (HoSIER por sus siglas en español), y mostramos la necesidad de realizar un nuevo diseño del prototipo para conseguir mediciones más adecuadas de acuerdo con los intercambios radiativos presentes en el arreglo experimental.

MODELO TEÓRICO Y DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO DEL CALORÍMETRO

Calorímetro de agua fría para la medición de absorptividades y emisividades a altas temperaturas

La figura 1 (A) muestra un esquema del calorímetro propuesto por (Estrada *et al.* 1999) y los parámetros de transferencia de calor (B) que participan en la placa de absorción del material a ser caracterizado mediante ese dispositivo experimental. Actualmente, el cuerpo principal del calorímetro está hecho de acero inoxidable. El balance de energía para un estado estacionario conduce a la ecuación:

$$\alpha\tau G_s = h_o(T_p - T_a) + \varepsilon\sigma F(T_p^4 - T_a^4) + h_i(T_{pi} - T_i) \quad (1)$$

misma que, en presencia de vacío en el lado irradiado de la placa absorbidora y tomando en consideración la variación del flujo másico del agua refrigerante (cuya C_p es conocida) en el lado opuesto, queda como:

$$\alpha\tau G_s = \varepsilon\sigma F(T_p^4 - T_a^4) + \dot{m}C_p(T_{pi} - T_e) \quad (2)$$

Esta ecuación tiene forma lineal para la absorptividad (α) y emisividad (ε) para cada temperatura estacionaria alcanzada por el sistema. Considerando consecutivamente pares de temperaturas que difieren por una cantidad definida ΔT , podemos resolver los sistemas de ecuaciones resultantes para α y ε en cada paso, obteniendo su razón en función de la temperatura.

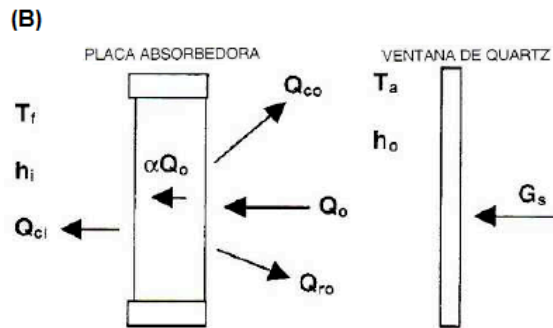
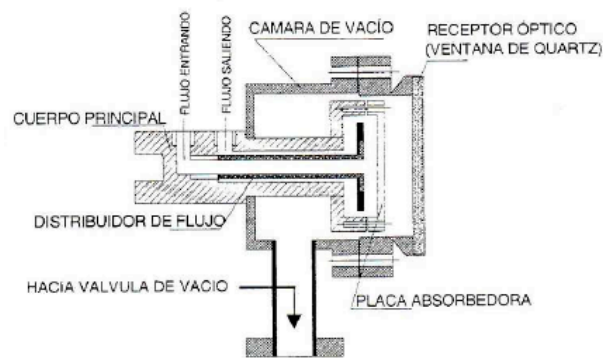


Figura 1: (A) Dispositivo experimental del calorímetro y (B) diagrama de los principales parámetros de transferencia de calor en la placa absorbidora del material caracterizado.

Análisis del calorímetro bajo la teoría del intercambio térmico en encierros radiativos

Aunque el análisis presentado en (Estrada et al. 1999) proporciona una técnica simple para encontrar la emisividad y absorptividad de materiales mediante la calorimetría de agua fría, la implementación experimental de la misma genera condiciones adicionales que no están consideradas en dicho análisis, particularmente en el intercambio radiativo entre las paredes de los distintos componentes que conforman la cámara de vacío y que cumplen con la definición de un encierro (enclosure) radiativo en el que el intercambio de calor se manifiesta (incluso mejor) en ausencia de un medio convectivo (Incropera et al. 2007, Brewster 1992), y que dada la potencia de concentración solar del HoSIER (con un pico de 18,000 soles) tiene un papel preponderante en las mediciones.

Debido a que el intercambio radiativo en la celda de vacío de la Fig. 1 (A) tiene 7 superficies térmicas efectivas, una de ellas la placa absorbidora cuyas propiedades se han de medir, la determinación de cada una de las tasas de transferencia de calor netas involucradas requiere de $7^2 = 49$ factores de visión F_{ij} para el cálculo, de los cuales 21 deben determinarse de manera directa en función de la disposición y la geometría de dichas superficies (Incropera et al. 2007), de manera que la medición final de las propiedades deseadas, que involucra entre otras cosas la solución de un sistema de 7 ecuaciones lineales con 7 incógnitas, incluirá un buen número de parámetros que por efecto de la propagación de errores disminuirá la precisión de los valores medidos. Por ello, es necesario proponer un nuevo diseño del prototipo experimental para conseguir una solución sencilla que involucre un número mínimo de ecuaciones para poder efectuar las mediciones requeridas.

MODELO TEÓRICO Y DISEÑO EXPERIMENTAL DE LAS MEJORAS PROPUESTAS

Debido a que uno de los problemas de encierros radiativos más simples cuya solución se conoce es el del encierro de tres superficies con una superficie re-radiante y aislada de cualquier otro intercambio térmico que no sea por radiación, en la Fig. 2 mostramos un esquema de modificación al prototipo del calorímetro propuesto por (Estrada et al. 1999) para ajustarlo a este tipo de encierro. En la parte (A) se presenta el esquema con las modificaciones propuestas al dispositivo experimental del calorímetro para adaptarlo a la situación de este tipo de encierro, mientras que en (B) se muestra el diagrama de red equivalente para cuerpos grises (en los cuales la absorptividad α es igual a la emisividad ϵ).

La solución de este problema en estado estacionario requiere de dos ecuaciones, una para determinar las tasas de transferencia de calor $dq_1/dt = -dq_2/dt$ (en las ecuaciones la derivada temporal es representada por un punto sobre la cantidad derivada) en función de las temperaturas de las superficies, de los factores de visión, y de las propiedades optotérmicas, y otra para determinar la radiosidad de la superficie re-radiante J_R en función de las radiosidades de las otras dos superficies (Incropera et al. 2007).

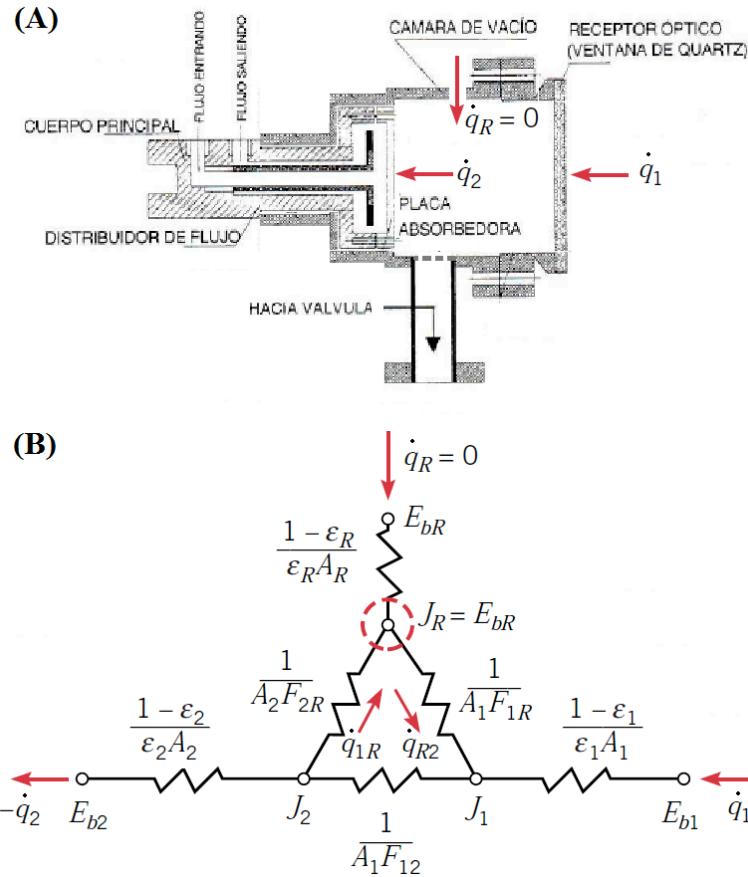


Figura 2: (A) Esquema con las modificaciones propuestas al dispositivo experimental del calorímetro para adaptarlo a la situación de un encierro de tres superficies con una de ellas re-radiante, cuyo diagrama de red equivalente –para cuerpos grises– se muestra en (B).

Sin embargo, ya que el dispositivo experimental involucra un medio semitransparente (la ventana de cuarzo), las expresiones para las resistencias radiativas correspondientes a las propiedades optotérmicas de esta superficie deben ser modificadas para incluir el efecto de su transmitividad τ , así como las contribuciones de las absorptividades α en cuerpos no grises para todas las superficies involucradas (Incropera et al. 2007, Brewster 1992). La solución para las tasas de transferencia de calor tomando en cuenta estas consideraciones queda:

$$\dot{q}_1 = -\dot{q}_2 = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - (\alpha_1 + (1 - \gamma^{-1})\tau_1)}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{(A_1 F_{12}) + [(A_1 F_{1R})^{-1} + (A_2 F_{2R})^{-1}]^{-1}} + \frac{1 - \alpha_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (3)$$

En donde $E_b = \sigma T^4$ es la potencia emisiva de un cuerpo negro y $\gamma = G_{int}/G_{ext}$ es el cociente de las irradiaciones en la cara interna (en el encierro radiativo, a temperatura T_i) y externa (la que recibe la radiación solar concentrada) de la ventana de cuarzo. Por otra parte, dq_i/dt es la tasa de calor neto que entra al encierro a través de la cara interna de la ventana de cuarzo, mientras dq_o/dt es la tasa de calor neta removida a través de la placa absorbedora (con temperatura T_2). Los F_{ij} son los factores de visión entre las superficies del encierro radiativo, y:

$$\dot{q}_2 = \dot{m} C_p (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (4)$$

es la expresión para la tasa neta de calor removido de la placa absorbedora en función del caudal (dm/dt), el calor específico (C_p) y la temperatura del agua al entrar ($T_{w,in}$) y salir ($T_{w,out}$) del calorímetro. Despejando la Ec. (3) para la absorptividad α_2 y la emisividad ε_2 de la placa absorbedora, obtenemos:

$$\alpha_2 + \varphi \varepsilon_2 = 1 \quad (5)$$

Siendo φ la expresión:

$$\varphi = A_2 \left\{ \frac{E_{b1} - E_{b2}}{-\dot{q}_2} - \left(\frac{1 - (\alpha_1 + (1 - \gamma^{-1})\tau)}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12} + [(A_1 F_{1R})^{-1} + (A_2 F_{2R})^{-1}]^{-1}} \right) \right\} \quad (6)$$

Con estas modificaciones podemos utilizar el mismo procedimiento propuesto en (Estrada et al. 1999) para distintas temperaturas, pero empleando la Ec. (5) en lugar de la Ec. (2) original, que no involucra en su deducción los intercambios radiativos considerados en este trabajo.

CONCLUSIONES

El uso de un calorímetro de agua fría en ausencia de convección para la determinación de las propiedades optotérmicas de materiales a altas temperaturas se ve mejorado en simplicidad y precisión cuando se adecúa el diseño experimental a un encierro radiativo de tres superficies con una de ellas re-radiando. La comprobación de estas adecuaciones implica una campaña experimental con el nuevo dispositivo para medir propiedades conocidas de materiales típicos, que permitan determinar la exactitud y precisión de la técnica propuesta, y que es el trabajo a futuro por desarrollar en el LACYQS.

REFERENCIAS

Behar O., Khellaf A., Mohammedi K. (2013). A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 12–39

Brewster M. (1992). *Thermal Radiative Transfer and Properties*. John Wiley & Sons, USA.

Estrada C.A., Flores J., Arriola A., Jimenez A., Arancibia C. (1999) Diseño y construcción de un dispositivo para la medición de absortancias y emitancias en sólidos. *Memorias la XXIII Semana Nacional de Energía Solar*, pp. 406-410. Universidad de Michoacana de San Nicolas de Hidalgo - ANES. Morelia, Mich., México.

Incropera F., Dewitt D., Bergman T., Lavine A. (2007) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th edn. John Wiley & Sons, USA.

International Energy Agency, (2013). *World Energy Outlook 2013 Executive Summary*. OECD/IEA, France.