

Sistema de Medición de Emisividad de Cuerpos Negros y Materiales Vía Reflectancia Modulada

Saúl Luyo Alvarado, Edgar Méndez Lango

Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76241, Querétaro, México.
sluyo@cenam.mx

RESUMEN

Se construyó un sistema para medir emisividad vía reflectividad difusa. Este sistema es la primera etapa de desarrollo de un sistema más robusto para medir emisividad de materiales y cavidades que pueden considerarse como cuerpos negros. Se presentan resultados de la caracterización de emisividad de algunos materiales: aluminio oxidado, acero inoxidable oxidado, lámina galvanizada y de una cavidad de cuerpo negro comercial.

1. INTRODUCCIÓN

La radiación electromagnética emitida por un cuerpo depende de la temperatura y la emisividad de la superficie del cuerpo. Por ello, al medir la temperatura de ese cuerpo con un termómetro de radiación, es necesario conocer el valor de su emisividad.

En la literatura generalmente se encuentra información de valores de la emisividad para algunos materiales a temperatura ambiente con la hipótesis que son constantes para todas las longitudes de onda. Sin embargo, en muchos casos se desconocen otros valores y, en consecuencia, se requiere medirlos. De hecho, se tienen solicitudes de servicio en termometría de radiación, tanto de laboratorios de metrología como de la industria, en los cuales se requiere medir este parámetro. Actualmente el CENAM sólo ofrece una respuesta muy limitada a estas solicitudes.

Existen equipos comerciales que miden emisividad, los cuales son de reciente desarrollo y comercialización, cuyo valor comercial es cercano al millón de dólares [1]. La adquisición de uno de estos equipos no resuelve del todo el problema porque estos equipos son "cajas negras" cuyo uso está restringido conforme a su diseño. Este hecho, limita su uso en áreas de interés de investigación y desarrollo del CENAM, que estuvieren fuera de los alcances del equipo comercial.

Para atender la necesidad de medir la emisividad se ha iniciado el desarrollo de un sistema de medición de emisividad de cuerpos negros, calibradores de termómetros de radiación, de radiadores comerciales y materiales industriales en un intervalo

de temperaturas de 20 °C a 1 000 °C y de longitudes de onda de 0,8 µm a 20 µm.

El sistema propuesto usa la radiancia espectral emitida por los objetos y de mediciones de reflectancia difusa, en función de la temperatura y de la longitud de onda, para determinar el valor de la emisividad.

El se propone comparar las radiancias espectrales emitidas por las fuentes con la radiancia espectral de un cuerpo negro patrón a un cierto valor de una cierta temperatura.

En el intervalo de temperaturas de 20 °C a 1 000 °C, la mayor parte de la radiación emitida por las fuentes es en el infrarrojo, por esta razón se usará un módulo infrarrojo de Transformada de Fourier (FTIR) [2-5] porque es el más adecuado y efectivo para medir radiancias espectrales en el intervalo infrarrojo de longitudes de onda, comparado con un espectrómetro tipo dispersivo.

En la actualidad el proyecto está en la fase de adquisición de equipos y accesorios y montaje experimental.

En la primera etapa del proyecto se desarrolló un sistema de medición de reflectancia modulada. Su alcance es en los intervalos de temperatura y longitud de onda es de: 23 °C a 400 °C, y de 0,64 µm a 1,075 µm. Estos intervalos serán ampliados en la segunda y tercera etapas del proyecto.

Para determinar la emisividad, se realizaron mediciones de reflectancia modulada en la configuración aproximadamente perpendicular, es decir que el ángulo de reflexión debe ser menor a 15°.

La emisividad fue calculada sobre el fundamento de la ley de Kirchhoff, y el principio de conservación de la energía.

Con este sistema se midió la emisividad de algunos materiales: aluminio, lámina galvanizada, acero oxidado, y grafito; se presentan los resultados.

2. CONCEPTOS BASICOS

La emisividad ε de la superficie de un cuerpo es una medida de su capacidad de emitir radiación en comparación a la emitida por un cuerpo negro.

En general la emisividad depende de la longitud de onda λ de emisión, del ángulo θ (polar) y φ (azimutal) en un sistema de coordenadas esféricas, y de la temperatura T .

La emisividad espectral direccional se define como la razón de la radiancia espectral $L_\lambda(\theta, \lambda, \varphi, T)$ de la muestra con respecto a la de un cuerpo negro a la misma temperatura

$$\varepsilon = \frac{L_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T)}{L_{cn}(\lambda, \theta, T)} \quad (1)$$

La ley de Kirchhoff establece que en una caja isotérmica en equilibrio termodinámico la emisividad es igual a la absorción:

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi, T) = \alpha(\lambda, \theta, \varphi, T) \quad (2)$$

Si se tiene una superficie aproximadamente isotérmica esta ley puede aplicarse con errores despreciables.

La emisividad direccional espectral $\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi, T)$ puede ser calculada de la reflectancia espectral $R(\lambda, \theta, \varphi, T)$ con la siguiente relación [6, 7]:

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi, T) + R(\lambda, \theta, \varphi, T) = 1 \quad (3)$$

En la física del estado sólido, el modelo clásico de Drude [8-10] y la teoría electromagnética, predicen que la reflectancia de los metales está determinada por su conductividad, la cual a su vez depende de la frecuencia del campo electromagnético externo aplicado y de la densidad de electrones libres en estos materiales. De esta manera, la frecuencia de resonancia del plasma de electrones libres y el tiempo de relajación, contribuyen con la reflectancia de los metales.

La radiación incidente acelera los electrones libres, y si no hay choque entre ellos, estos vuelven a radiar energía, en la forma de onda transmitida o reflejada. Para frecuencias menores a la frecuencia del plasma toda la radiación será reflejada en la ausencia de colisiones, pero los choques de los electrones con los iones y las imperfecciones del sólido convierten parte de la energía en energía térmica. Esta teoría se cumple aproximadamente para metales monovalentes.

Para metales con dos o más electrones de valencia la teoría mencionada en el párrafo anterior no se cumple. En consecuencia, es necesario utilizar la teoría de estructura de bandas electrónicas de energía que predice cambios en la reflectancia debido a mecanismos de absorción de energía por transiciones electrónicas entre bandas de energías, y por transiciones de la banda d a la banda de conducción

3. EXPERIMENTAL

Se construyó un sistema de medición de reflectancia modulada, cuyo esquema se muestra en la Fig.1. El montaje experimental de los componentes ópticos y equipos se realizó sobre una mesa óptica. El sistema de medición está compuesto por:

- Una lámpara de halógeno como fuente de radiación,
- Un monocromador de 0,5 m de distancia focal con una red de difracción de 1 200 líneas/mm,
- Un cortador óptico (*chopper*) y un amplificador tipo *lock-in*,
- Un detector semiconductor de silicio,
- Lentes y espejos,
- Una PC para la toma de datos y
- Una mesa óptica

La radiación emitida por la fuente, se dirige hacia la rendija de entrada del monocromador, donde es dispersada por la red de difracción. El movimiento de la red se controla a través de un programa de automatización; tal movimiento permite la selección de longitudes de onda de la radiación. El haz que sale a través de una rendija rectangular del monocromador es dirigido y enfocado, con un sistema óptico de dos lentes, sobre el objeto que se quiere caracterizar, cuya reflexión difusa se colecta y enfoca en el detector semiconductor de silicio.

La señal obtenida del *chopper*, que gira a una frecuencia de 100 Hz y se usa como haz incidente y

se emplea como referencia, y la que sale del detector se conectan al amplificador *lock-in*.

Tanto el monocromador y como el amplificador están conectados a una computadora para realizar la toma de datos.

Para el caso del cuerpo negro comercial, el proceso de medición se realizó de una manera similar, al sustituir el material por el cuerpo negro.

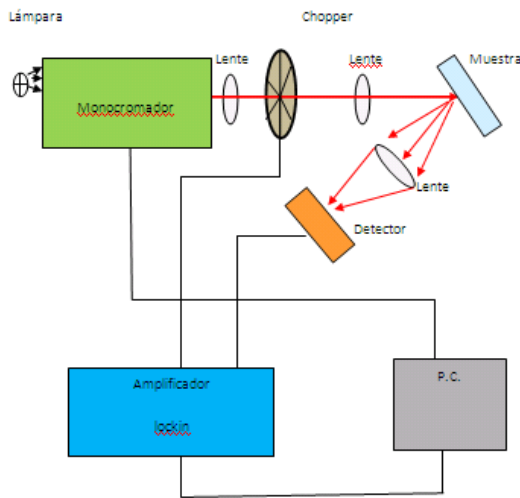


Fig.1. Esquema del sistema de medición

4. RESULTADOS

Con el sistema descrito, se midió la emisividad de una cavidad de cuerpo negro y de algunas muestras de metales.

La cavidad de cuerpo negro en su interior posee un recubrimiento probablemente compuesto por polímeros con pigmentos inorgánicos de óxidos metálicos.

En la Fig. 2 se muestran las gráficas de la emisividad en función de la longitud de onda obtenidas a partir de mediciones de reflectancia modulada realizadas a la temperatura del laboratorio (23 °C), y correspondientes a: aluminio oxidado, lámina galvanizada, grafito y acero inoxidable oxidado .

En la Fig. 3, se muestran los resultados obtenidos para una cavidad de cuerpo negro en un intervalo de temperatura de 23 °C a 400 °C.

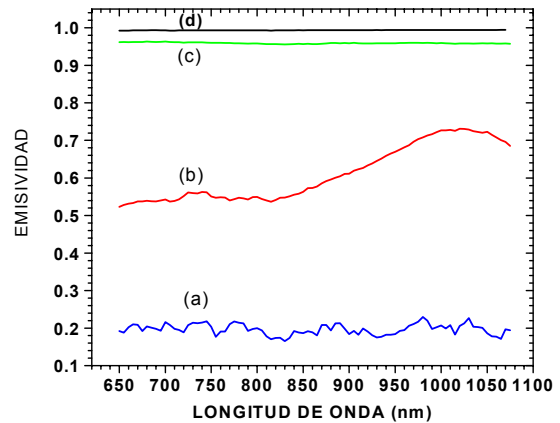


Fig. 2. Graficas de emisividad a temperatura ambiente de: (a) aluminio oxidado; (b) Lámina galvanizada; (c) grafito; (d) acero inoxidable oxidado.

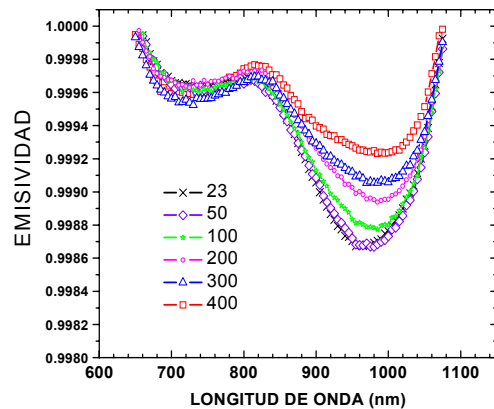


Fig. 3. Gráficas de emisividad de una cavidad de cuerpo negro comercial en función de la temperatura y longitud de onda.

5. DISCUSIÓN

El intervalo de medición de longitudes de onda de la radiación incidente es de 640 nm a 1 075 nm que corresponde a un intervalo de energías de 1.84×10^{-19} J a 3.104×10^{-19} J. Estos valores son menores que la energía de resonancia del plasma, que para estos metales es aproximadamente 6.4×10^{-19} J (ultravioleta).

Los resultados mostrados en las Figs. 2 y 3 son comparables a los reportados en la literatura [11-13].

En la Fig. 2 se observa que: los valores de la emisividad del aluminio oxidado y del grafito son

constantes en el intervalo de longitudes de onda medido.

En el caso de la lámina galvanizada, observamos que para el intervalo de 650 nm a 800 nm, su emisividad es aproximadamente constante con un valor de 0,54, luego crece y tiene un máximo relativo de 0,74 alrededor de 1 030 nm.

En la Fig. 3 se observa que las curvas de emisividad para un cuerpo negro comercial a diferentes temperaturas. El manual de este equipo especifica un valor constante de emisividad mayor de 0.995. Sin embargo los resultados muestran que no es así, sino que la emisividad aumenta con la temperatura, y su dependencia con la longitud de onda es como se muestra en la misma figura.

Los dos mínimos relativos observados a 700 nm y 970 nm, corresponden a un aumento en la reflectancia debido a la absorción selectiva de los óxidos metálicos. El incremento de la emisividad con la temperatura se produce debido a que se incrementan los choques por agitación térmica y se origina una disminución de la reflectancia y, por consiguiente, un incremento en la emisividad [14].

6. CONCLUSIONES

Se ha concluido la primera etapa de desarrollo de un sistema de medición de emisividad. En esta etapa se construyó un sistema de medición de emisividad por reflectancia difusa. El sistema permite medir la emisividad de muestras que están a temperatura ambiente y de cuerpos negros cuya temperatura se puede controlar.

Los resultados obtenidos para la emisividad del aluminio oxidado, acero oxidado, lámina galvanizada son similares a los reportados en la literatura, lo cual valida el sistema de medición de reflectancia modulada desarrollado por lo que este sistema representa una alternativa viable para la caracterización de emisividad de cuerpos negros y materiales, en los intervalos medidos.

REFERENCIAS

- [1] <http://www.afrinc.com/products/emissometer/default.htm>
- [2] Using Fourier Transform Blackbody Spectra to determine the thermodynamic temperature in the 600 °C to 1 000 °C range. A.L. Reesink, N. Rowell, and A. Steele, NRC, Canada, CP684 Temperature: Vol. 7, 2003.

- [3] L. Hanssen, S. Mekhontsev, V. Khromchenko, Infrared spectral emissivity characterization facility at NIST, Thermosense XXVI, Proc. of SPIE Vol. 5405, 2004.
- [4] Messung des spektralen Emissionsgrades an der PTB. Christian Monte, Berndt Gutschwager, Jorg Hollant, PTB, Symposium Tendenzen in der materialentwicklung und die Bedeutung von wärmetransporteigenschaften, 2007 Stuttgart.
- [5] Evaluation of the fixed point cavity emissivity at NMIJ. Fumihiko sakuma, Laina Ma, National Metrology Institute of Japan/AIST, Tsukuba, Japan.
- [6] S. Galal Yousef, P. Sperfeld and J. Metzdorf, Measurement and calculation of the emissivity of a high temperature black body, Metrologia 37, 365-368, 2000.
- [7] G. Bauer and K. Bischoff, Evaluation of the Emissivity of a Cavity Source by reflection Measurements, Applied Optics, Vol.10, N°12 2639-2643, 1971.
- [8] Hecht Zajac, Optica, Fondo Educativo Interamericano, S. A.
- [9] K.D. Moller, Optics, University Science Books.
- [10] N. Aschcroft, D. Mermin, Solid State Physics, Saunders College Publishing, 1976.
- [11] Table of emissivity of various surfaces, Transmetra haltec GmbH Postfach 230, CH-8212 Neuhausen, <http://www.Transmetra.ch>
- [12] ThermophysE, http://www.ike.unistuttgart.de/dienste/tp/thermophys_e.htm
- [13] E. Fronapfel, M. Bradley, J. Stolz, Emissivity Measurements of Common Construction materials, Inframation 2006 proceedings ITC 115 A 2006-05-22.
- [14] S. Mekhontsev, M. Noorma, A. Prokhorov and Hanseen, NIST, IR spectral characterization of customer blackbody sources: first calibration results. Thermosense XXVII, Proc. of SPIE Vol. 6205, 2006.