

Diseño y caracterización de un termómetro de radiación

Design and calibration of an Radiation Thermometer

María Luisa HERNANZ ⁽¹⁾, Joaquín CAMPOS ⁽¹⁾, Alicia PONS ⁽¹⁾, María José MARTÍN ⁽²⁾,

Alejandro FERRERO ⁽¹⁾, Ana RABAL ⁽¹⁾, Dolores del CAMPO ⁽²⁾, Ayalid VILLAMARÍN ⁽¹⁾

1. Instituto de Óptica, CSIC, Serrano, 144. Madrid
2. Centro Español de Metrología, C/ del Alfar, 2. 28760 Tres Cantos. Madrid

Persona de contacto: María Luisa HERNANZ (luisa.hernanz@csic.es).

RESUMEN:

Siguiendo la estrategia de Laboratorios Nacionales de metrología de alto nivel metrológico como son el NIST, PTB o NPL, nuestro laboratorio está desarrollando en colaboración con el CEM un radiómetro de filtro para medidas de alta temperatura con baja incertidumbre. El instrumento se basa en la medida de la radiancia con un detector, un filtro interferencial y un sistema de lentes.

En el artículo se presentan los trabajos realizados en esta dirección, con medidas prometedoras para su desarrollo.

Palabras clave: Radiómetro de filtro. Responsividad espectral. Medida de alta temperatura termodinámica.

ABSTRACT:

Following other national metrological laboratories, as NIST, PTB or NPL, our laboratory is developing, in collaboration with the CEM, a low uncertainty filter radiometer. The device is based on radiance measurement with a filter detector and a lens system.

In this paper we present the realized works in this way, with some measures promising for our objective.

Key words: Filter radiometer. Spectral responsivity. High thermodynamic temperature measurement. Radiance responsivity

1.- Introducción

Desde que se adoptó la escala de temperatura termodinámica ITS-90 en 1990 ha habido avances importantes que dan lugar a la posibilidad y por tanto a la necesidad de mejorar la escala. En el ámbito de la alta temperatura (> 962 °C) Estos avances vienen dados por un lado, por el desarrollo de termómetros basados en radiómetros trazables a radiómetros criogénicos de sustitución eléctrica, y, por otra parte, por el desarrollo de cuerpos negros basados en mezclas eutécticas (metal-carbono) que determinan nuevos puntos fijos

a alta temperatura, por encima de la temperatura de solidificación de la Ag (1235 K).

Ambas vías se están desarrollando en la actualidad en los Laboratorios Nacionales de Metrología, siendo las medidas radiométricas trazadas a radiómetros criogénicos, la forma de obtener una medida de la temperatura termodinámica con la más baja incertidumbre. Más aún, el disponer de un radiómetro capaz de medir la temperatura con la mejor incertidumbre es la forma de determinar las temperaturas de los nuevos puntos fijos de alta temperatura, que pasarán a formar parte

de una futura puesta en práctica de la ITS-XX.

El objetivo del laboratorio, en colaboración con el Centro Español de Metrología (CEM), es diseñar y realizar un radiómetro capaz de medir la temperatura termodinámica de cuerpos negros de alta temperatura.

2.- Desarrollo

Según la ITS-90, por encima de la temperatura de solidificación de la plata la temperatura está definida por:

$$\frac{L_{\lambda}(T_{90})}{L_{\lambda}(T_{90}(X))} = \frac{\exp(c_2(\lambda T_{90}(X))^{-1}) - 1}{\exp(c_2(\lambda T_{90})^{-1}) - 1}$$

donde $T_{90}(X)$ se refiere a alguno de los puntos fijos ITS-90: temperatura de solidificación de Au, Ag o Cu.

$L_{\lambda}(T_{90})$ y $L_{\lambda}(T_{90}(X))$ son la radiancia espectral del cuerpo negro a la longitud de onda en el vacío (λ) a T_{90} y a $T_{90}(X)$ respectivamente. Como se puede ver en esta definición, hasta ahora la temperatura se ha obtenido a través de relaciones de radiancia, no siendo necesario el conocimiento de la respuesta espectral absoluta en radiancia de los detectores utilizados en los termómetros [1].

La radiancia espectral de un cuerpo negro sigue la ley de Planck.

$$L_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \varepsilon(\lambda, T) \left(\frac{2hc^2}{n^2 \lambda^5} \right) \frac{d\lambda}{\exp(hc/n\lambda kT) - 1}$$

Dentro de un ángulo sólido pequeño la mayor parte de los cuerpos negros emiten como una fuente lambertiana, siendo entonces la distribución angular de la radiancia constante dentro de estos ángulos sólidos.

Actualmente lo que se plantea es la sustitución de la obtención de la temperatura por un sistema de relaciones de radiancia por un método de medida directa utilizando la ley de Planck: medida absoluta de la temperatura. Esto es debido a la disminución de las incertidumbres en la diseminación de las medidas de radiancia desde los radiómetros criogénicos patrón.

2.1.- Sistema de medida

En los laboratorios nacionales, con trazabilidad a radiómetros criogénicos de sustitución

eléctrica, utilizar la radiometría espectral como un método termométrico primario resulta de factible implementación.

Existen diferentes formas de obtener la radiancia de un cuerpo negro y que mencionamos a continuación [2]:

Método de potencia

Medida de la radiancia del cuerpo negro con un radiómetro con filtro, calibrado para responsividad espectral en potencia, $R(\lambda)$, utilizando también una apertura.

La medida de la fotocorriente por el radiómetro es:

$$i = \int R(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda$$

donde $\Phi(\lambda)$ es la potencia incidente en el detector.

Método de irradiancia

Medida de la radiancia del cuerpo negro con un radiómetro con filtro calibrado para responsividad en irradiancia, R_E , y usando para medir una apertura.

$$i = \int R_E(\lambda) E(\lambda) d\lambda$$

donde $E(\lambda)$ es la irradiancia.

Método híbrido

Medida de la radiancia del cuerpo negro con: un radiómetro con filtro calibrado para responsividad en irradiancia; una apertura; y una lente única.

Método de radiancia

Radiómetro con filtro calibrado para responsividad en radiancia, R_L , utilizando para medir un sistema óptico incorporado en el radiómetro consistente en varias lentes con apantallamiento.

La fotocorriente medida por el radiómetro es:

$$i = \int R_L(\lambda) L(\lambda) d\lambda$$

Estos dos últimos métodos utilizan óptica para facilitar la medida de pequeñas fuentes.

El correcto funcionamiento de los puntos fijos requiere una distribución homogénea de la temperatura sobre el área de la celda del punto fijo, esta distribución homogénea de

temperatura asegurará la fusión y la solidificación homogénea del material del punto fijo. Para tener la distribución uniforme se utilizan células de pequeñas dimensiones que sean menos sensibles a los gradientes de temperatura. En estas células para obtener una emisividad suficientemente alta se deben utilizar aperturas pequeñas. Normalmente se usan aperturas de 3 mm a 6 mm de diámetro.

Debido a la necesidad de medir cuerpos negros de aperturas pequeñas, nuestro laboratorio ha optado por utilizar el último método. Diseñaremos pues, un radiómetro con una lente que pueda focalizar tamaños de fuente típicamente de 3 mm de diámetro. Para la medida absoluta de la temperatura es necesaria la calibración de la responsividad en radiancia del radiómetro.

2.2.- Diseño del radiómetro

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado y pensando en la posibilidad de trabajar con fuentes que tengan la apertura de diferente tamaño, hemos elegido para nuestro radiómetro un diseño con una lente de enfoque como muestra la figura 1.

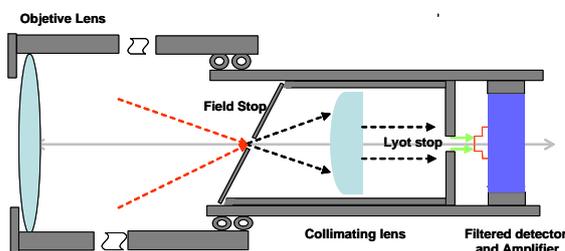


Fig. 1: Diseño de radiómetro.

Nuestro radiómetro de filtro consistirá en un sistema óptico con filtrado en longitud de onda (650 nm), capaz de focalizar la imagen de la fuente de radiación en el detector.

En este tipo de diseño la contribución del tamaño de la fuente a la medida de la radiancia es crítica [3], por lo que debemos tenerlo en cuenta. Para minimizar este efecto en nuestro diseño de radiómetro utilizamos además de la lente objetivo, elementos tales como: diafragma de campo, una lente colimadora, y finalmente una apertura en configuración conocida como “Lyot stop”.

El diafragma de campo se coloca en el foco de la primera lente para eliminar la luz di-

fractada por la apertura, se coloca con una inclinación de 10° respecto al eje óptico para eliminar reflexiones traseras.

Detrás del diafragma de campo usamos otra lente, colimadora en este caso, eliminando así los efectos de borde.

A continuación de la lente se debe colocar un segundo diafragma en la configuración “Lyot stop”. El objetivo de colocar el Lyot stop es doble, por una parte se usa para bloquear la difracción producida por los bordes de la lente objetivo y por otra, para bloquear el scatter interno proveniente del objetivo. El Lyot stop, su diámetro debe ser menor que la imagen del objetivo, de forma que toda la luz que llegue al detector esté colimada formando una buena imagen.

Todas las componentes que conforman el radiómetro de filtro (excepto la lente de enfoque) se colocan dentro de un cilindro de aluminio anodizado en negro refrigerado por agua con un control de temperatura capaz de mantener el recinto en ± 8 mK (véase figura 2). Con esto se reduce significativamente la deriva del filtro interferencial y de la electrónica asociada.



Fig 2. Radiómetro de filtro IO-CEM

3.- Puesta a punto del sistema de medida. Medidas realizadas

La caracterización radiométrica del radiómetro con filtro se realiza en dos pasos.

Primero se determina la responsividad espectral relativa, que caracteriza la respuesta del filtro.

Una vez determinada la respuesta espectral relativa, y dado que hemos elegido el método de radiancia, debemos medir al menos a una longitud de onda el valor de responsividad en

radiancia. Para conseguir una superficie muy uniforme utilizamos una fuente acoplada a una esfera integradora.

La radiancia espectral de esta fuente se determinará a partir de la irradiancia medida con un radiómetro trazable al patrón primario del laboratorio (radiómetro criogénico).

Previo a la construcción del radiómetro y para poner a punto el sistema de medida, se ha calibrado un termómetro de radiación (radiómetro de filtro con un sistema de enfoque comercial) cedido por el CEM, denominado en adelante LP2.

Para obtener la respuesta espectral utilizamos el método de calibración de comparación directa [4].

La medida la realizamos con un ancho de banda de 1 nm.

La responsividad espectral del LP2 medida, definida por su filtro interferencial, se representa en la figura 3.

Una vez calibrada la responsividad espectral relativa, el paso siguiente es calibrar la responsividad absoluta en radiancia.

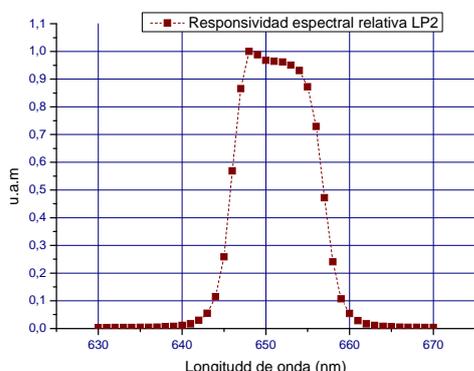


Fig. 3: Responsividad espectral relativa del radiómetro LP2.

Como fuente de radiancia utilizamos una lámpara de Xenon de 150 W, un monocromador que seleccione la longitud de onda de 650 nm y una esfera integradora de 2” de diámetro. Con una apertura de 10 mm, directamente acoplada a la salida de la esfera, definimos el área radiante para las medidas absolutas.

La calibración se hace respecto a un radiómetro de Si de 0,5 cm² de área efectiva. Este radiómetro se coloca a una distancia de la apertura bien definida y superior a 10 cm, para asegurar el comportamiento lambertiano y que el ángulo de incidencia sobre el radiómetro no sea grande.

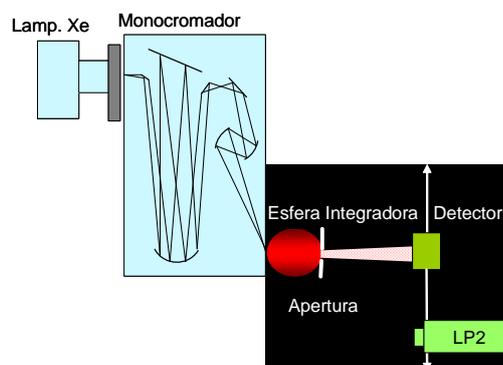


Fig. 4: Banco de medida para el calibrado absoluto de la responsividad en radiancia de un radiómetro.

Con este sistema se mide la respuesta del LP2 para un valor de radiancia del orden de 0,1 Wm⁻²sr⁻¹. Con estos valores se puede representar la curva de responsividad espectral en radiancia que se muestra en la figura 5.

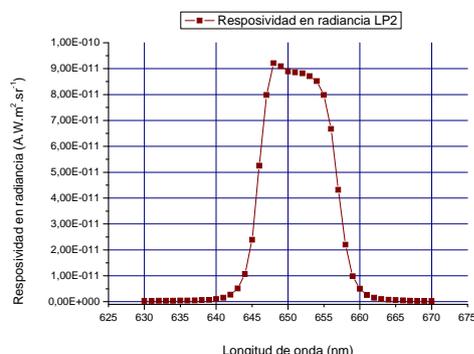


Fig. 5: Responsividad espectral absoluta en radiancia del radiómetro LP2.

El factor de calibrado en AW⁻¹m⁻³sr⁻¹, se puede obtener por integración de la curva [5], [6].

Con este factor de calibrado podemos conocer el valor de la radiancia del cuerpo negro y, consecuentemente, su temperatura.

Para comprobar el sistema de medida, en las instalaciones del CEM se ha medido con el radiómetro LP2 un cuerpo negro a la tempe-

ratura de solidificación del Cu: 1357,77 K (1084,62 °C).

A partir de la lectura de la fotocorriente del LP2 para este cuerpo negro, teniendo en cuenta el factor de calibrado y la ley de Planck,

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$$

obtenemos la temperatura.

En la tabla se presenta el valor de temperatura obtenido respecto al valor nominal.

Temperatura calculada a partir de la radiancia	Temperatura nominal
1353,25 K	1357,77 K

Esta temperatura difiere de la esperada en menos del 0,5%

3.- Estimación de incertidumbre

En un análisis preliminar de la medida se ha considerado como posibles causas de incertidumbre la inestabilidad de la fuente; la uniformidad espacial; la responsividad espectral del patrón; la apertura de la fuente; distancia; estabilidad y el ruido del radiómetro [7], [8].

Entre las posibles mejoras está la posibilidad de utilizar como fuente un láser para la calibración del radiómetro de filtro.

En la 1ª columna de la tabla se muestra las fuentes de incertidumbre consideradas, en la 2ª columna la estimación de incertidumbre en las medidas realizadas hasta el momento y en la 3ª columna el objetivo a conseguir para la realización de nuestro patrón.

Contribución	Estimación de la incertidumbre actual $k = 2$ (%)	Estimación de la incertidumbre esperada $k = 2$ (%)
Estabilidad de la fuente.	0,1	0,04
Uniformidad espacial.	0,5	0,1
Responsividad espectral del patrón.	0,07	0,04
Apertura de la fuente.	0,08	0,03
Distancia	0,1	0,03
Estabilidad y ruido del radiómetro termométrico.	0,4	0,04
Suma cuadrática	0,66	0,13

4.- Conclusión

El laboratorio como Laboratorio Asociado para medidas de radiación óptica, decide colaborar con el Centro Español de Metrología para desarrollar un patrón de alta temperatura basado en medidas radiométricas.

El laboratorio ha diseñado un radiómetro apropiado para este propósito, consistente en un detector con filtro interferencial y dos lentes con sus respectivas aperturas y que actualmente está en construcción.

El laboratorio ha desarrollado el sistema de medida para poder calibrar la responsividad espectral en radiancia de un radiómetro y poder obtener medidas radiométricas a alta temperatura con baja incertidumbre.

Las primeras medidas realizadas con un radiómetro de filtro comercial son prometedoras dentro del valor de incertidumbre estimado. Se estima a partir de ellas que se puede obtener un patrón de temperatura trazable a un radiómetro criogénico de sustitución eléctrica con valores de incertidumbre similares a

las publicadas por otros laboratorios nacionales.

Agradecimientos

Convenio específico CSIC-CEM para la medida de la temperatura con métodos radiométricos.

Referencias

- [1] H.PERSTON-THOMAS. “*International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*”. Metrologia 27, 3-10, 1990.
- [2] G. Machin et al. “MeP-K for primary high temperature scale realisation “ BIPM-CCT-WG5, Mayo, 2009
- [3] Howard W YOON, David ALLEN Robert D SAUNDERS “*Methods to reduce the size of source effect in radiometers*”. Metrología, 42, 89-96, 2005.
- [4] J. Campos, A. Pons and P. Corredera. “*Spectral Responsivity Scale in the Visible Range based on single silicon photodiodes*”. Metrologia, 40, pág. S181 - S184, 2003
- [5] H W YOON. “ *The realization and the dissemination of thermodynamic temperature scales*”. Metrologia, 43, S22-S26, March 2006.
- [6] K ANHALT, A. ZELENJUK, DR. TAUBERT, T. KEAWPRASERT, J: HARTMANN. “*New PTB Setup for the Absolute Calibration of the Spectral Responsivity of Radiation*”, Int J Thermophys, 30, 192-202, 2009.
- [7] Petri KARHA, Pasi TOIVANEN, Farhid MANOOCHEHI, Erkki IKONEN. “*Development of a detector-based absolute spectral irradiance scale in the 380-900 nm spectral range*” Applied Optics. Vol 36, N°34 8909-8918. December 1997.
- [8] M.WHITE, N.P.FOX, V.E. RALPH, N.J. HARRISON. “*The characterization of a high temperature black body as the basis for the NPL spectral irradiance scale*” Metrologia, 32, 431-434. 1995/1996.