

DETERMINACIÓN DE EMISIVIDAD EFECTIVA DE CALIBRADORES DE TEMPERATURA DE RADIANCIA POR MÉTODO INDIRECTO

Víctor Aranda y Silvia Medrano

Centro de Metrología: MetAs S.A. de C.V.

Antonio Caso # 246, Centro, 49000, Cd. Guzmán, Zapotlán el Grande, Jalisco, México

+52 (341) 41 36 123, victor.aranda@metas.mx

Resumen: La emisividad de la cavidad o de la superficie de radiadores-calibradores de cuerpo negro, es una magnitud de entrada fundamental para la determinación de la temperatura de radiancia, tanto en procesos de medición como en servicios de calibración. Se presenta un método indirecto para la determinación del valor de la emisividad efectiva en radiadores-calibradores de temperatura de radiancia, midiendo la temperatura de contacto y la temperatura de radiancia no-contacto de forma simultánea.

1. EMISIVIDAD

La intensidad de radiación emitida por un cuerpo, objeto o sustancia, depende no sólo de su temperatura, sino que también de una propiedad llamada emisividad $\epsilon \in \mathcal{E}$. La emisividad –llamada antiguamente emitancia–, es un número que se encuentra en el intervalo de 0...1, y que caracteriza que tan bien emite radiación un objeto. Un objeto con emisividad de 1 es referido como un cuerpo negro (un emisor perfecto ideal). Un radiador con una emisividad –constante– de 0,95 emite el 95 % de la radiación de un cuerpo negro, a estos radiadores se les suele llamar cuerpo gris.

La emisividad ϵ de una sustancia es igual a la absorbancia α de la sustancia ($\epsilon = \alpha$). Esta relación es llamada ley de Kirchoff [1].

Un cuerpo-negro es llamado así, dada su propiedad de perfecta absorbancia, lo cual hace que al ojo humano éste parezca negro [2].

El coeficiente de emisividad, es un número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con respecto a la habilidad de irradiar si éste fuera un cuerpo negro.

$$\epsilon = \frac{\text{radiación emitida por una superficie}}{\text{radiación emitida si fuera un cuerpo negro}} \quad (1)$$

Se definen de acuerdo con ISO 9288 [3] [4], diferentes tipos de emisividad: hemisférica, direccional, espectral, por lo cual es necesario tener claro cuál requerimos.

Emisividad hemisférica

La emisividad hemisférica de una superficie ϵ , definida como:

$$\epsilon = \frac{M_e}{M_e^o} \quad (2)$$

Donde:

M_e = exitancia radiante de dicha superficie;

M_e^o = exitancia radiante de un cuerpo negro a la misma temperatura que la superficie.

Emisividad hemisférica espectral

Emisividad hemisférica espectral en frecuencia ϵ_v y emisividad hemisférica espectral en longitud de onda ϵ_λ , definidas como:

$$\epsilon_v = \frac{M_{e,v}}{M_{e,v}^o} \quad (3)$$

$$\epsilon_\lambda = \frac{M_{e,\lambda}}{M_{e,\lambda}^o} \quad (4)$$

Donde:

$M_{e,v}$ = exitancia radiante espectral en frecuencia de dicha superficie;

$M_{e,v}^o$ = exitancia radiante espectral en frecuencia de un cuerpo negro a la misma temperatura que la superficie,

$M_{e,\lambda}$ = exitancia radiante espectral en longitud de onda de dicha superficie;

$M_{e,\lambda}^o$ = exitancia radiante espectral en longitud de onda de un cuerpo negro a la misma temperatura que la superficie.

Emisividad direccional

Emisividad direccional –perpendicular– de una superficie ϵ_Ω , definida como:

$$\epsilon_\Omega = \frac{L_{e,\Omega}}{L_{e,\Omega}^o} \quad (5)$$

Donde:

$L_{e,\Omega}$ = radiancia de dicha superficie;

$L_{e,\Omega}^o$ = radiancia de un cuerpo negro a la misma temperatura que la superficie.

Emisividad direccional espectral

Emisividad direccional espectral en frecuencia $\epsilon_{v,\Omega}$ y emisividad direccional espectral en longitud de onda $\epsilon_{\lambda,\Omega}$, de una superficie, definidas como:

$$\epsilon_{v,\Omega} = \frac{L_{e,\Omega,v}}{L_{e,\Omega,v}^o} \quad (6)$$

$$\epsilon_{\lambda,\Omega} = \frac{L_{e,\Omega,\lambda}}{L_{e,\Omega,\lambda}^o} \quad (7)$$

Donde:

$L_{e,\Omega,\nu}$ = radiancia espectral en frecuencia de dicha superficie;

$L^{\circ}_{e,\Omega,\nu}$ = radiancia espectral en frecuencia de un cuerpo negro a la misma temperatura que la superficie,

$L_{e,\Omega,\lambda}$ = radiancia espectral en longitud de onda de dicha superficie;

$L^{\circ}_{e,\Omega,\lambda}$ = radiancia espectral en longitud de onda de un cuerpo negro a la misma temperatura que la superficie.

En este artículo, y en general al hablar de radiadores-calibradores de temperatura de radiancia de temperatura variable; y de pirómetros, termómetros de radiación o termómetros de no-contacto, utilizamos la emisividad direccional espectral en longitud de onda, $\epsilon_{\lambda,\Omega}$, ec. (7), la cual expresaremos simplemente como emisividad ϵ .

La emisividad efectiva –o aparente– de la cavidad o superficie del radiador-calibrador es la relación entre la radiación emitida de la cavidad-superficie y la radiación emitida si este fuera un cuerpo negro perfecto a la misma temperatura, la cual puede expresarse en términos de la relación de radiancia L , ec. (7), o de la señal S , generada por la misma ec. (8).

$$\epsilon \approx \frac{S(T_S)}{S(T)} \approx \epsilon_{\lambda,\Omega} = \frac{L_{e,\Omega,\lambda}}{L^{\circ}_{e,\Omega,\lambda}} \quad (8 \text{ y } 7)$$

Donde:

ϵ = emisividad del objeto (cavidad, plato o superficie);

$S(T_S)$ = señal generada por el objeto de interés a la temperatura;

T_S = temperatura absoluta radiada del objeto de interés en kelvin (K);

$S(T)$ = señal generada por un cuerpo negro a la misma temperatura;

T = temperatura absoluta termodinámica del objeto de interés en kelvin (K).

2. DETERMINACIÓN DE EMISIVIDAD EFECTIVA

Métodos para determinación de la emisividad

Algunos métodos normalizados, como: ASTM E 2847 [5], E 2758 [6], ASTM E 1933 [7], proponen la determinación de la emisividad mediante: valores de referencia, medición o cálculo; utilizando diferentes técnicas o métodos: desde tablas de emisividad de materiales –las cuales son útiles para espectros y temperaturas específicas–, hasta pruebas-mediciones de reflectividad con FTIR (transformada de Fourier de espectroscopía infrarroja), donde la suma de la reflectividad, ρ , y la

emisividad, ϵ , son iguales a la unidad ($\rho + \epsilon = 1$) –ley de conservación de la energía radiante [1]–.

El BIPM CCT-WG5 [8]; nos indica que hay dos enfoques distintos para determinar la emisividad efectiva de una cavidad de cuerpo negro: medición y cálculo. Considerando, al igual que R. E. Bedford del NRC [2], que: el cálculo es la mejor forma para investigar la emisividad efectiva de un cuerpo negro.

De forma enunciativa se encuentran al menos los siguientes métodos para la determinación de emisividad:

Referencia documental:

- tablas de emisividad [6];
- especificación de fabricante [5];

Medición y ajuste:

- compensación de emisividad [6];
- comparación (con material de referencia, modificador de la superficie) [6]; termómetro de no-contacto [7];
- contacto *versus* no-contacto [6]; termómetro de contacto [7];
- comparación radiométrica [5];
- cuerpo negro [6];

Cálculo:

- cálculo dimensional [2] [5] [8] [9];
- modelación, sumatoria [2] [8],
- modelación, series [2] [8],
- modelación, simulación numérica Monte-Carlo [2] [8], (STEEP 32#, INCA 333, Pyramida) [10];

Medición y cálculo:

- FTIR, transformada de Fourier de espectroscopía infrarroja [5] [6], CENAM [11], NIST, etc.;
- reflectividad de la cavidad [1] [6];
- láser enfocado y esfera integradora [8];
- flujo de radiación térmica infrarroja modulada [8];
- derivado, emisividad efectiva local, SMU, Slovak Institute of Metrology, Centre for Thermometry, Photometry and Radiometry [12];
- indirecto contacto & no-contacto (este trabajo).

Método indirecto de contacto & no-contacto para la calibración-caracterización de radiadores

La emisividad del radiador se determina por método indirecto, con medición y cálculo, en: a) radiadores que cuenten con orificio testigo para la inserción de un termómetro de contacto facilitado por el laboratorio; o b) radiadores con sensor de contacto desmontable [13], el cual se calibra previamente con trazabilidad a temperatura de contacto. La radiación emitida por la cavidad-superficie se mide con el termómetro patrón de referencia de radiación infrarroja (TRT). La radiancia emitida total se determina con el termómetro de contacto, el cual deberá colocarse de tal forma que mida la temperatura real del radiador. La calibración se realiza cubriendo el intervalo de generación de temperatura del calibrador-radiador de cuerpo negro (BBR).

Respecto a la emisividad como requisito, el documento OIML/TC11/SC3/N5 [13], establece la siguiente convención; se define a un radiador de cuerpo negro, como un radiador con una emisividad efectiva ϵ cercana a uno, considerando: $\epsilon \geq 0,95$ para radiadores tipo cavidad y $\epsilon \geq 0,9$ para radiadores con superficie plana extendida.

Este documento diferencia entre emisividad y emisividad efectiva:

Emisividad: La relación de la radiancia de una sustancia, a la radiancia de un cuerpo negro al misma temperatura de dicha sustancia.

Emisividad efectiva: Una emisividad aparente de una cavidad de cuerpo negro o de una superficie de un radiador de cuerpo negro de plato plano. Que debería tomar en cuenta: la emisividad intrínseca de la superficie, un factor geométrico, una distribución de la temperatura, y una radiación térmica ambiental.

Además advierte que: La emisividad efectiva es la característica más difícil de ser evaluada (calibrada, verificada) por separado, ya que depende en gran medida el diseño del BBR, de la forma del área de radiación y de los materiales utilizados.

También nos indica la forma de evaluación: La emisividad efectiva debe ser tomada en cuenta en el valor de corrección que se aplica a las lecturas del termómetro del BBR y se determina por la comparación con un BBR patrón ($\epsilon \geq 0,99$) trazable a la Escala Internacional de Temperatura.

Descripción del procedimiento de calibración de radiadores-calibradores IR

La temperatura de radiancia de referencia se determina mediante el modelo de Sakuma-Hattori, en

su versión de Planck [8], con termómetros patrón de referencia de radiación infrarrojo y de contacto trazables a Institutos Nacionales de Metrología, en función de la clase de exactitud del instrumento bajo calibración.

La temperatura esperada se calcula con las mediciones corregidas de los termómetros patrón y las condiciones ambientales del laboratorio.

El termómetro de referencia y el radiador bajo calibración son alineados ópticamente con el centro de la apertura o superficie del radiador para realizar las mediciones secuencialmente de la temperatura en al menos cinco valores-puntos de calibración a lo largo del intervalo, con al menos diez observaciones experimentales durante quince minutos, en cada valor-punto, adicionalmente se mide la temperatura efectiva en cinco zonas de la cavidad-superficie.

Procedimiento de calibración de termómetros IR

Mientras que un procedimiento de calibración de termómetros de radiación IR, se basa en los siguientes métodos normalizados: BIPM CCT-WG508-03 [8]; IEC/TS 62492; Guía Técnica CENAM-EMA; MSL TG 22 [9]; ASTM E 2847 [5]; JIS C 1612 [1].

Utilizando el modelo de señal de Sakuma-Hattori [8], y de acuerdo con P. Saunders en MSL TG 22 [9], se tienen cuatro métodos de calibración de termómetros IR, *versus*:

- termómetro de temperatura de radiancia TRT, como referencia, T_{ref} es la lectura del termómetro de referencia (la cual generalmente no es igual a la temperatura del cuerpo negro, especialmente cuando se utiliza un plato plano);
- punto fijo de fusión del hielo PFH, de acuerdo con MSL TG 2 [14], $T_{ref} = 0,00$ °C;
- termómetro de contacto como referencia, T_{ref} es la temperatura real del cuerpo negro, medida por el termómetro de referencia de contacto, considerando la corrección por emisividad efectiva;
- radiador-calibrador de cuerpo negro, tipo cavidad o plato plano (BBR), de temperatura variable, radiométricamente calibrado.

En los tres últimos métodos, es indispensable contar con el valor de emisividad efectiva del radiador-calibrador, mientras que en el primer método, el efecto de la emisividad es secundario, despreciable si el TRT patrón y el termómetro bajo calibración tienen la misma configuración de longitud de onda, emisividad y son operadas bajo las mismas condiciones.

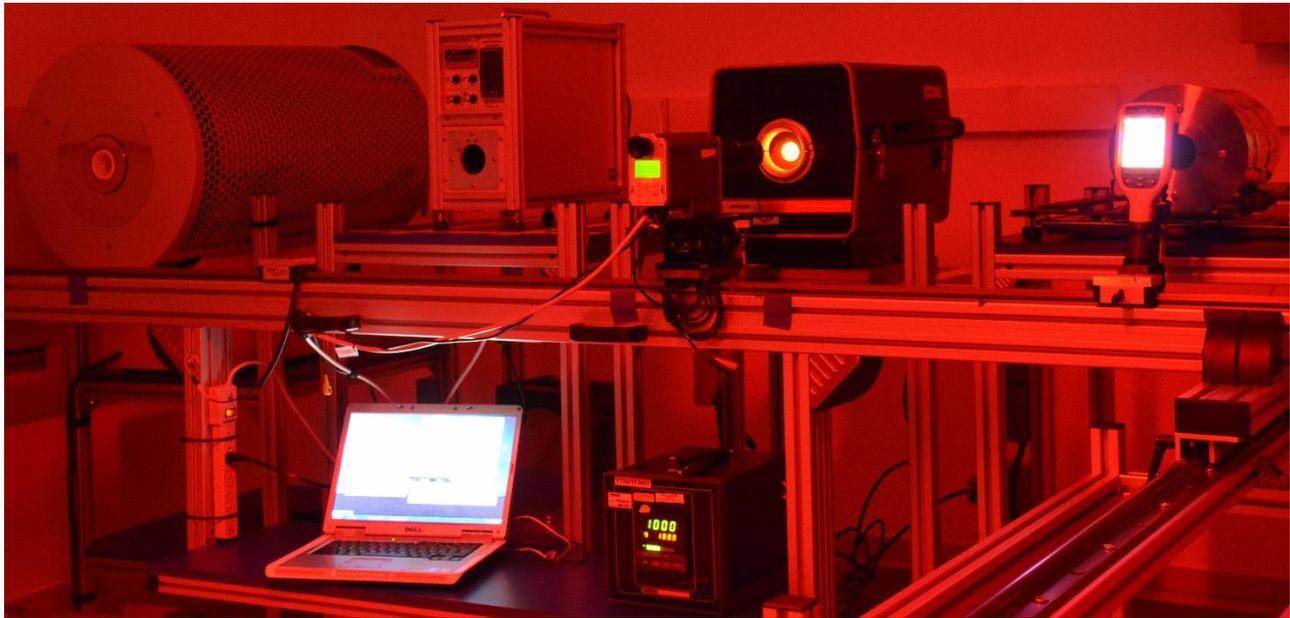


Fig. 1. Sistema de calibración de radiadores-calibradores de cuerpo negro, tipo cavidad o plato plano.

2.1. Señal de la temperatura de cuerpo negro

Para obtener la señal $S(T)$, generada por un cuerpo negro a la temperatura T , absoluta termodinámica del objeto de interés, se utiliza la indicación corregida del termómetro patrón de contacto, ya sea un termómetro de resistencia de platino (PRT) o un termopar de metal noble –platino– (PTC: TC-S, TC-B), anclado térmicamente en el orificio testigo del radiador-calibrador sujeto a la determinación de emisividad.

$$S(T) = \frac{c}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1} \quad (9)$$

Donde:

- $S(T)$ = señal radiométrica esperada del radiador en función de su temperatura T en kelvin (K) medida con un termómetro de contacto;
- A = constante, parámetro del TRT = 9,364 μm para la banda espectral de 8...14 μm ;
- B = constante, parámetro del TRT = 178,4 $\mu\text{m}\cdot\text{K}$ para la banda espectral de 8...14 μm ;
- C = constante = 1,0;
- c_2 = segunda constante de radiación = 14 387,752 $\mu\text{m}\cdot\text{K}$ (~14 388 $\mu\text{m}\cdot\text{K}$).

2.2. Señal de la temperatura de radiancia

Para obtener la señal $S(T_s)$, generada por el radiador-calibrador de interés a la temperatura T_s , absoluta radiada, se utiliza la indicación corregida del termómetro patrón de referencia de temperatura de radiancia (TRT), el cual está calibrado para la misma

longitud de onda espectral, en este artículo infrarrojo lejano (FIR) de 8...14 μm .

De acuerdo con ASTM E 2758 (X2.8) [6], esta es la señal que el termómetro de referencia IR mide cuando observa el radiador de cavidad o plato plano.

$$S(T_s) = \frac{\epsilon_{ref} \cdot S(T_{ref}) + (1 - \epsilon_{ref}) \cdot S(T_d) - (1 - \epsilon'_s) \cdot S(T_w)}{\epsilon'_s} \quad (10)$$

Donde:

- $S(T_s)$ = señal esperada del radiador en función de la temperatura radiada;
- T_s = temperatura de radiancia en el espectro infrarrojo lejano FIR, 8...14 μm ;
- ϵ_{ref} = emisividad configurada del termómetro de referencia IR, preferentemente = 1,000 con lo cual se reducen los efectos de la temperatura del detector T_d ;
- $S(T_{ref})$ = señal observada por el termómetro de referencia IR, a la temperatura de referencia corregida T_{ref} ;
- $S(T_d)$ = señal debida a la temperatura del detector T_d ;
- ϵ'_s = emisividad estimada, inicial (0,950 o 1,000) e iterada del radiador-calibrador;
- $S(T_w)$ = señal debida a la temperatura reflejada de los muros T_w , o el ambiente.

2.3. Emisividad efectiva

Para finalmente obtener la emisividad efectiva ϵ_s , calculada

$$\epsilon_s = \frac{S(T_s)}{S(T)} \quad (11)$$

Se observa que el cálculo de ϵ_s depende de $S(T_s)$, el cual a su vez depende de ϵ'_s , por lo tanto es necesario

desarrollar un proceso iterativo para obtener el valor medido de forma indirecta de ϵ_S .

$$\epsilon'_S \rightarrow S(T_S) \rightarrow \epsilon_S \rightarrow \epsilon'_S \rightarrow \dots \rightarrow S(T_S) \rightarrow \epsilon_S \quad (12)$$

3. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN

Se muestran los resultados en la determinación de la emisividad efectiva de cuatro tipos de radiador-calibrador de temperatura de radiancia, cubriendo el intervalo de $-50 \dots 1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$, con cavidades de punto fijo, baño y horno; así como platos planos.

3.1. Cavidad de punto fijo

Punto de fusión de hielo de cuerpo negro tipo cavidad
 Valor nominal: $0,00 \text{ }^\circ\text{C}$
 Material de la cavidad: Punto de Fusión del Hielo
 Emisividad: $0,9994 \pm 0,000?$
 Dimensiones: $\varnothing: 60 \text{ mm}; L: 249 \text{ mm}$

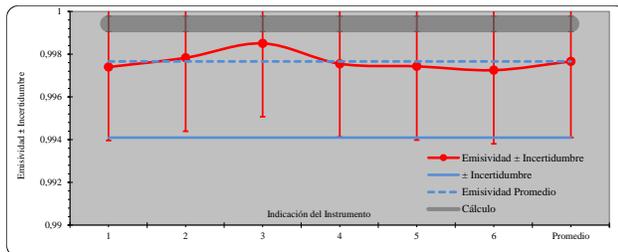


Fig. 2. Emisividad efectiva, punto de fusión de hielo.

3.2. Cavidad en baño

Baño radiador de cuerpo negro tipo cavidad
 Intervalo de indicación: $-20 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$
 Material de la cavidad: Latón en negro
 Emisividad: $0,9994 \pm 0,0002$
 Dimensiones: $\varnothing: 60 \text{ mm}; L: 300 \text{ mm}$

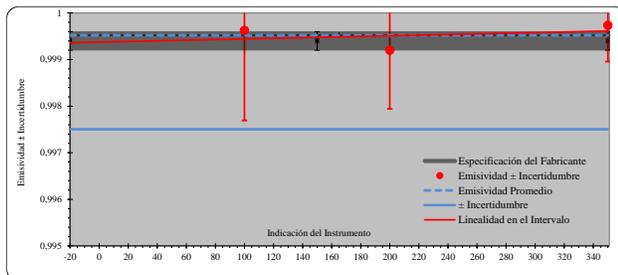


Fig. 3. Emisividad efectiva, cavidades $-20 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$

3.3. Plato plano en horno de baja temperatura

Horno radiador de plato plano
 Intervalo de indicación: $-15 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$
 Material del plato: Latón en negro
 Emisividad: $0,95 \pm 0,02$
 Dimensiones: $\varnothing: 152 \text{ mm}$

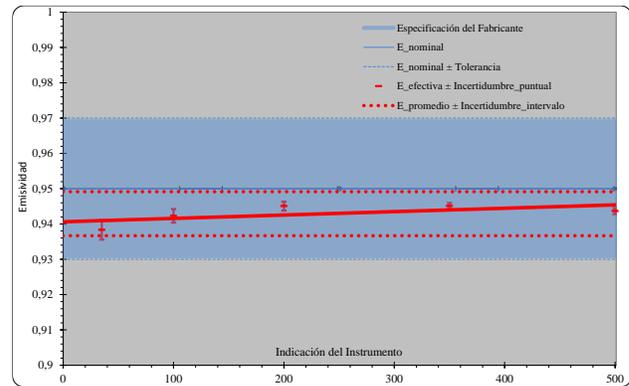


Fig. 4. Emisividad efectiva, plato plano $-15 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$

3.4. Cavidad en horno de alta temperatura

Horno radiador de cuerpo negro tipo cavidad
 Intervalo de indicación: $300 \dots 1\,600 \text{ }^\circ\text{C}$
 Material de la cavidad: Carburo de silicio
 Emisividad: $0,998 \pm 0,00?$
 Dimensiones: $\varnothing: 50 \text{ mm}; L: 300 \text{ mm}$

Diagrama de Calibración:
 Radiador-Calibrador de Horno tipo Mufla

Fig. 5. Emisividad efectiva, cavidad $300 \dots 1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$

4. DISCUSIÓN

El método indirecto para determinar la emisividad efectiva de radiadores, se ha aplicado en la calibración-caracterización de:

- Radiadores de cavidad de punto de fusión de hielo;
- Radiadores de cavidad en baño líquido;
- Radiadores de cavidad en horno;
- Radiadores de plato plano de laboratorio;
- Radiadores de plato plano industriales.

Actualmente los diferentes proveedores de servicios de trazabilidad mediante calibración, acreditados o no-acreditados, en México y otros países, no proporcionan el servicio de: medición, determinación, cálculo, caracterización o calibración, de la emisividad efectiva de radiadores-calibradores de temperatura, utilizados en la 'verificación de la calibración' o calibración de termómetros infrarrojos.

5. CONCLUSIONES

Es posible determinar por método indirecto la emisividad efectiva de un radiador, de cuerpo negro o gris, tipo cavidad o plato plano. Su valor se deriva

de las mediciones de temperatura de contacto y temperatura de radiancia, corrigiendo ambas por efectos importantes como son el: intervalo espectral, medio ambiente, temperatura efectiva. El método indirecto requiere de un proceso de iteración matemática para obtener el mejor valor del mensurando. La incertidumbre encontrada para emisividad efectiva es del orden de décimas porcentuales ($\pm 0,0008 \dots \pm 0,0028 \dots \pm 0,0062$), la cual es al menos 3 veces mejor que las especificaciones de algunos platos planos industriales ($\pm 0,0200$), y que puede llegar a las especificaciones de incertidumbre de las mejores cavidades comerciales ($\pm 0,0001 \dots \pm 0,0003$).

Se ha observado que para temperaturas menores a 100 °C, el efecto de la temperatura radiada por los muros –alrededores– es significativo sobre todo para calibradores radiadores de baja emisividad 0,95; lo cual hace imperativo: medirla adecuadamente, reducir sus efectos en la temperatura reflejada, o incluso controlarla con escudo de radiación de temperatura controlada.

Se propone el método indirecto de contacto & no-contacto, como un método innovador, susceptible de maduración para su normalización y uso en procesos de trazabilidad y acreditación de laboratorios de calibración.

AGRADECIMIENTOS

Al personal de metrología termodinámica y de MetAs que cubre las actividades operativas y de servicios mientras nos dedicamos a las actividades de investigación, desarrollo y consultoría.

REFERENCIAS

- [1] JIS, JEMIMA, JSA, «JIS C 1612. Test methods for radiation thermometers,» JIS, Japanese Industrial Standard, Tokio, Japan, 2002 (Confirmed 2015-10-20).
- [2] R. E. Bedford, «Chapter 12. Calculation of effective emissivities of cavity sources of thermal radiation,» de *Theory and practice of radiation thermometry*, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, Wiley interscience. John Wiley & Sons, 1988, pp. 653-772.
- [3] ISO, «ISO 9288: 1989 Thermal insulation -- Heat transfer by radiation -- Physical quantities and definitions,» ISO International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 1989, reviewed 2014.
- [4] Wikipedia, «Emissivity,» Wikimedia Foundation, Inc., 24 febrero 2016. [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Emissivity>. [Último acceso: 06 abril 2016].
- [5] ASTM, «ASTM E 2847-11 (14) Standard test method for Calibration and accuracy verification of wideband infrared thermometers,» ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2011-nov-01.
- [6] ASTM, «ASTM E 2758-10 (15a). Standard guide for Selection and use of wideband, low temperature infrared thermometers,» ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2010-may-01.
- [7] ASTM, «ASTM E1933-99a (14). Standard practice for: Measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers,» ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 1999-dic-10.
- [8] BIPM, «CCT-WG508-03. Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point,» BIPM, Sèvres, Francia, 2008-abril.
- [9] P. Saunders, «MSL Technical guide 22. Calibration of low-temperature infrared thermometers,» MSL, Nueva Zelanda, 2009-junio.
- [10] Virial International, LLC, «Virial International. Scientific and engineering services and software for optical radiometry an radiation thermometry,» Virial International, LLC, 17 marzo 2014. [En línea]. Available: <http://www.virial.com/index.html>. [Último acceso: 07 abril 2016].
- [11] D. Cárdenas García, «Medición de emisividad de calibradores planos en el CENAM,» de *Simposio de Metrología 2014*, Santiago de Querétaro, 2014-octubre-6...10.
- [12] SMU, «Calibration Certificate No: 659/270/46/09,» SMU & ISOTECH, 14 octubre 2009. [En línea]. Available: <http://www.smu.sk/termometria-radiometria-fotometria/> & [http://www.isotech.co.uk/assets/uploads/Technical %20Articles/BlackBodyCertificate-gemini.pdf](http://www.isotech.co.uk/assets/uploads/Technical%20Articles/BlackBodyCertificate-gemini.pdf). [Último acceso: 06 abril 2016].
- [13] OIML, «OIML/TC11/SC3/N5. Blackbody radiators for calibration of radiation thermometers. Calibration and verification procedures,» OIML, París, Francia, 2013.
- [14] M. Bart, P. Saunders y D. R. White, «MSL Technical Guide 2. Infrared thermometry ice point,» MSL, Nueva Zelanda, 2004-mayo.