



**TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN**

**CALIBRACIÓN DE CALIBRADORES PLANOS**

**PARA TERMÓMETROS DE RADIACIÓN**

**NOTA TÉCNICA**

**Daniel Cárdenas García**

El Marqués, Qro., México, octubre de 2011

**ESTE DOCUMENTO SE HA ELABORADO CON RECURSOS DEL GOBIERNO MEXICANO.**

**SÓLO SE PERMITE SU REPRODUCCIÓN SIN FINES DE LUCRO Y HACIENDO REFERENCIA A LA FUENTE:**

**Cárdenas-García, D., Calibración de calibradores planos, Nota técnica, Centro Nacional de Metrología, México, octubre 2011. Disponible en <<http://www.cenam.mx>>**

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>MÉTODO DE CALIBRACIÓN</b>	<b>5</b>
<b>ÁNÁLISIS DE INCERTIDUMBRE</b>	<b>7</b>
<b>ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL ERROR</b>	<b>8</b>
<b>EJEMPLO DE CALIBRACIÓN</b>	<b>12</b>
<b>QUÉ CONSIDERAR AL UTILIZAR UN CALIBRADOR PLANO</b>	<b>16</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>18</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>19</b>

## TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN

### CALIBRACIÓN DE CALIBRADORES PLANOS

Daniel Cárdenas García

Octubre de 2011

#### INTRODUCCIÓN

Los calibradores planos (CP) son instrumentos que tienen una superficie radiante plana con alta emisividad y que se utilizan para calibrar algunos termómetros de radiación cuyas características hacen muy difícil, o imposible, su calibración con equipos convencionales como las cavidades de cuerpo negro.

Los CP no son cuerpos negros, la emisividad de su superficie es menor que uno, y tampoco son cuerpos grises porque su emisividad es función de la longitud de onda.

Aunque los CP no son cuerpos grises, es posible calibrarlos si se considera que el valor de temperatura que muestran en su pantalla corresponde al valor de temperatura de un cuerpo gris con una emisividad nominal, en un intervalo de longitudes de onda dados.

Lo anterior permite utilizarlos como cuerpos grises en la calibración de termómetros de radiación.

Para la calibración de los CP se utiliza un termómetro de radiación de referencia (TP), que trabaja en un intervalo de longitudes de onda  $[\lambda_1, \lambda_2]$ , calibrado contra un cuerpo negro. Con dicho TP se calibra un CP para que pueda utilizarse como un cuerpo gris con una emisividad nominal  $\varepsilon_N$  en un intervalo  $[\lambda_3, \lambda_4]$ . Para lograr esto, es necesario conocer la emisividad espectral del CP en los intervalos de longitudes de onda  $[\lambda_1, \lambda_2]$  y  $[\lambda_3, \lambda_4]$ .

El mensurando de la calibración es la diferencia entre el valor de temperatura  $T_{IBC}$  que despliega el CP y la temperatura de referencia  $T_{REF}$ . Este último se obtiene a partir del valor de temperatura  $T_{TP}$  que despliega el TP y de un modelo que considera las radiancias del CP y de un cuerpo gris con emisividad nominal  $\varepsilon_N$  en el intervalo  $[\lambda_3, \lambda_4]$ .

El error  $e$  está dado por:

$$e = T_{IBC} - T_{REF}$$

## MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Para la calibración de un CP, se coloca el TP enfocando a la superficie radiante del CP. Para evitar de manera práctica la corrección debida al efecto de tamaño de fuente, es aconsejable que la superficie del CP tenga una zona libre de defectos en la que se pueda inscribir una circunferencia con un diámetro de al menos cuatro veces el diámetro del campo de visión (FOV) del TP, y que el punto de enfoque sea el centro de dicha circunferencia.

Una vez enfocado, se fija un valor de temperatura de control en el CP y se espera que éste alcance dicho valor de temperatura. Cuando se mantiene estable el valor de temperatura  $T_{IBC}$ , que aparece en la pantalla del CP, se registra su valor y el valor de temperatura  $T_{TP}$  que despliega el TP. Además se registra la temperatura  $T_{AM}$  del laboratorio.

El TP está calibrado con un cuerpo negro y su control de corrección de emisividad está en emisividad igual a uno, así que el valor de temperatura  $T_{TP}$  que muestra corresponde al valor de la temperatura de radiancia de la superficie del CP. Esta temperatura de radiancia no es igual a la temperatura de la superficie del CP  $T_{SC}$  debido a que dicha superficie no es un cuerpo negro. Para obtener  $T_{SC}$  debemos conocer, además de  $T_{TP}$ , la emisividad espectral  $\varepsilon(\lambda)$  de la superficie del CP en el intervalo de longitudes de onda  $[\lambda_1, \lambda_2]$  donde trabaja el TP y la temperatura ambiente  $T_{AM}$ .

El cálculo para obtener  $T_{SC}$  lo hacemos con la siguiente ecuación:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{TP}) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) L_{\lambda,B}(\lambda, T_{SC}) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [1 - \varepsilon(\lambda)] L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda \quad (1)$$

El miembro a la izquierda de la igualdad es la radiancia total que recibe el TP y que asocia a la temperatura  $T_{TP}$  al considerar que proviene de un cuerpo negro. El miembro a la derecha de la igualdad está formado por dos términos: la contribución a la radiancia que proviene del CP, que tiene una emisividad espectral  $\varepsilon(\lambda)$  y que se encuentra a temperatura  $T_{SC}$ , y la contribución debida a la radiancia del medio ambiente que se refleja en el CP.

Se puede hacer una simplificación de la ecuación (1), que facilita los cálculos e introduce un error en el valor de emisividad que es aproximadamente dos órdenes de magnitud menor que la incertidumbre en el valor de la emisividad [1], si se toma el valor promedio de la emisividad en el intervalo de longitudes de onda  $[\lambda_1, \lambda_2]$ :

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

y se sustituye  $\varepsilon_{1,2}$  en lugar de  $\varepsilon(\lambda)$  en (1). Con esto se tiene la siguiente ecuación,

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{TP}) d\lambda = \varepsilon_{1,2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{SC}) d\lambda + (1 - \varepsilon_{1,2}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda \quad (3)$$

De la ecuación (3) se obtiene el valor de la temperatura  $T_{SC}$  de la superficie del CP. A partir de este valor, se puede calcular la radiancia que emite en el intervalo de longitudes de onda  $[\lambda_3, \lambda_4]$  si se conoce su emisividad promedio  $\varepsilon_{3,4}$ , donde dicha emisividad está dada por:

$$\varepsilon_{3,4} = \frac{1}{(\lambda_4 - \lambda_3)} \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Con el valor de radiancia obtenido, se calcula la temperatura de referencia  $T_{REF}$  que tiene el CP con una emisividad nominal  $\varepsilon_N$  en el intervalo de longitudes de onda  $[\lambda_3, \lambda_4]$ , por medio de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{3,4} \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{SC}) d\lambda + (1 - \varepsilon_{3,4}) \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda = \varepsilon_N \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{REF}) d\lambda + (1 - \varepsilon_N) \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda \quad (5)$$

En la ecuación (5), el miembro a la izquierda de la igualdad tiene dos términos. El primero corresponde a las contribuciones debidas a la radiancia del CP, con emisividad  $\varepsilon_{3,4}$  en el intervalo  $[\lambda_3, \lambda_4]$ , y el segundo a la radiancia del medio ambiente que se refleja en la superficie del CP. El miembro a la derecha de la igualdad contiene las contribuciones debidas a la radiancia de un cuerpo gris con una emisividad nominal  $\varepsilon_N$  en el intervalo  $[\lambda_3, \lambda_4]$  y a la radiancia del medio ambiente que se refleja en la superficie de dicho cuerpo gris.

Se reacomodan los términos de las ecuaciones (3) y (5), y se obtienen las dos ecuaciones para calcular  $T_{REF}$  a partir de los datos experimentales:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{SC}) d\lambda = \frac{1}{\varepsilon_{1,2}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{TP}) d\lambda + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{1,2}}\right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda \quad (6)$$

$$\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{REF}) d\lambda = \frac{\varepsilon_{3,4}}{\varepsilon_N} \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{SC}) d\lambda + \left(1 - \frac{\varepsilon_{3,4}}{\varepsilon_N}\right) \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda \quad (7)$$

En resumen, se utilizan los datos de  $T_{TP}$ ,  $\varepsilon_{1,2}$  y  $T_{AM}$  en la ecuación (6) para obtener  $T_{SC}$ , y después se utiliza el valor obtenido de  $T_{SC}$  junto con los valores de  $\varepsilon_{3,4}$ ,  $\varepsilon_N$  y  $T_{AM}$  en la ecuación (7) para obtener  $T_{REF}$ , que es el valor de temperatura del TP para un cuerpo gris con emisividad efectiva  $\varepsilon_N$  en el intervalo de longitudes de onda  $[\lambda_3, \lambda_4]$ .

Una vez que se conoce  $T_{REF}$ , se calcula el error de medición:

$$e = T_{IBC} - T_{REF} \quad (8)$$

Para  $[\lambda_3, \lambda_4] = [\lambda_1, \lambda_2]$ , el método se simplifica. En este caso, la ecuación (3) queda,

$$\varepsilon_{1,2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{SC}) d\lambda + (1 - \varepsilon_{1,2}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda = \varepsilon_N \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{REF}) d\lambda + (1 - \varepsilon_N) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda \quad (9)$$

Se observa que el miembro de la derecha de la ecuación (3) es igual al miembro de la izquierda de la ecuación (9), por lo que se obtiene:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{TP}) d\lambda = \varepsilon_N \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{REF}) d\lambda + (1 - \varepsilon_N) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda \quad (10)$$

Se reordenan los términos de la ecuación (10), y se obtiene

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{REF}) d\lambda = \frac{1}{\varepsilon_N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{TP}) d\lambda + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_N}\right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda \quad (11)$$

Esto significa que, para el caso  $[\lambda_3, \lambda_4] = [\lambda_1, \lambda_2]$ , se puede calcular  $T_{REF}$  sin conocer la emisividad promedio del CP en el intervalo  $[\lambda_1, \lambda_2]$ .

## ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

El error depende de los valores de  $T_{IBC}$  y  $T_{REF}$ . El valor de  $T_{IBC}$  está dado por las lecturas del CP, y su incertidumbre depende de la dispersión de sus lecturas y su resolución.

Por otra parte, la incertidumbre de  $T_{REF}$ , que se estima de las ecuaciones (3) y (4), depende de la incertidumbre de los valores de  $T_{TP}$ ,  $\varepsilon_{1,2}$ ,  $\varepsilon_{3,4}$  y  $T_{AM}$  (no hay incertidumbre de  $\varepsilon_N$ , porque es un valor nominal especificado).

La incertidumbre de  $T_{TP}$  se estima a partir de su calibración, la dispersión de sus lecturas, su resolución, la uniformidad de temperatura de la superficie que enfoca, la posición del blanco al que apunta, la deriva que presenta y la absorción atmosférica.

En resumen, consideramos las siguientes variables de influencia:

1. Incertidumbre en el valor promedio de temperatura del IBC
2. Emisividad promedio del calibrador en los intervalos  $[\lambda_1, \lambda_2]$  y  $[\lambda_3, \lambda_4]$
3. Uniformidad de temperatura del IBC en la zona de enfoque
4. Posición del blanco
5. Calibración de TP
6. Incertidumbre en el valor promedio de temperatura del TP
7. Deriva del TP
8. Temperatura de fondo (Laboratorio)
9. Absorción atmosférica

## ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL ERROR

1. Incertidumbre en el valor promedio de temperatura del IBC

La incertidumbre  $u_1$  está asociada con los valores  $T_{IBC}$  que despliega la pantalla del CP.

Consideramos que los valores  $T_{IBC}$  pertenecen a una distribución rectangular cuyos extremos son los valores mínimo y máximo,  $T_{IBC \min}$  y  $T_{IBC \max}$ .

Si la resolución del IBC es  $R_{IBC}$  la incertidumbre está dada por

$$u_1 = \frac{\text{Max}[R_{IBC}, T_{IBC \max} - T_{IBC \min}]}{\sqrt{12}}$$

El coeficiente de sensibilidad es:

$$c_1 = \frac{e[T_{IBC} + u_1] - e(T_{IBC})}{u_1} = 1$$



## 2. Emisividades promedio del IBC en $[\lambda_1, \lambda_2]$ y $[\lambda_3, \lambda_4]$ .

Denotamos las emisividades promedio del calibrador en los intervalos  $[\lambda_1, \lambda_2]$  y  $[\lambda_3, \lambda_4]$  como  $\varepsilon_{1,2}$  y como  $\varepsilon_{3,4}$  respectivamente. Como se mencionó anteriormente, estas emisividades promedio se calculan a partir de los datos experimentales de emisividad espectral  $\varepsilon(\lambda)$  y las ecuaciones (2) y (4).

Si se mide en un sólo experimento  $\varepsilon(\lambda)$  en un intervalo que contenga los intervalos  $[\lambda_1, \lambda_2]$  y  $[\lambda_3, \lambda_4]$ ,  $\varepsilon_{1,2}$  y  $\varepsilon_{3,4}$  no serán variables independientes con respecto a  $\varepsilon(\lambda)$ ; estarán correlacionadas. Si  $\varepsilon(\lambda)$  crece, entonces  $\varepsilon_{1,2}$  y  $\varepsilon_{3,4}$  crecen. Si  $\varepsilon(\lambda)$  decrece, entonces  $\varepsilon_{1,2}$  y  $\varepsilon_{3,4}$  decrecen.

Por esta razón, el coeficiente de sensibilidad se obtiene así,

$$c_2 = \frac{e^{[T_{REF}(\varepsilon_{1,2} + u_2, \varepsilon_{3,4} + u_2)]} - e^{[T_{REF}(\varepsilon_{1,2})]}}{u_2} = \frac{T_{REF}(\varepsilon_{1,2} + u_2, \varepsilon_{3,4} + u_2) - T_{REF}(\varepsilon_{1,2})}{u_2}$$

con

$$u_2 = \text{Max}[u(\varepsilon_{1,2}), u(\varepsilon_{3,4})]$$

Debido a que, experimentalmente, las incertidumbres de  $\varepsilon_{1,2}$  y  $\varepsilon_{3,4}$ ,  $u(\varepsilon_{1,2})$  y  $u(\varepsilon_{3,4})$  respectivamente, son prácticamente iguales, por lo que se toma la misma incertidumbre para ambas

## 3. Uniformidad de temperatura del IBC en la zona de enfoque

Al colocar el TP con su línea de vista perpendicular a la superficie del CP, tenemos una incertidumbre en su posición, en cualquiera de los tres ejes, que estimamos debe ser menor que 0.5 cm. Así que tomamos  $u_3 = 0.5$  cm.

El coeficiente de sensibilidad nos proporciona información sobre la uniformidad de temperatura del CP: el cambio en el valor de temperatura al variar la posición del TP.

Para evaluar la uniformidad, movemos el TP una distancia  $d$  en cada una de los dos sentidos de los tres ejes, de tal forma que el nuevo punto de enfoque esté a una distancia  $d$  del punto de enfoque original, y observamos el cambio en el valor que muestra el TP. La distancia  $d$  debe ser mayor que 0.5 cm, y tal que el FOV del TP no salga de la zona libre de defectos del CP.

Obtenemos experimentalmente  $c_3$ ,

$$c_3 = \frac{|T_{TPr} - T_{TP}|}{d}$$

Donde  $T_{TP}$  y  $T_{TPr}$  son los valores desplegados en la pantalla del TP en el punto de enfoque original y en el punto de enfoque a una distancia  $d$  del punto de enfoque original.

#### 4. Posición del blanco

Se busca colocar el TP con su línea de vista perpendicular a la superficie del CP. Se tiene una incertidumbre en dicha perpendicularidad, y un cambio fácilmente visible es cuando nos desviamos  $3^\circ$  (0.52 radianes) de la línea perpendicular, así que tomamos  $u_4$  igual a una fracción de dicho cambio: 0.17 radianes ( $1^\circ$ ).

Obtenemos experimentalmente  $c_4$  como

$$c_4 = \frac{|T_{TPa} - T_{TP}|}{a}$$

Donde  $T_{TP}$  es el valor de temperatura que muestra el TP cuando no ha cambiado de posición,  $T_{TPa}$  es el que muestra cuando ya cambió, y  $a$  es el ángulo igual a 0.52 radianes.

#### 5. Calibración de TP

La incertidumbre  $u_5$  asociada a la calibración se obtiene del certificado de calibración del TP.

El coeficiente de sensibilidad es,

$$c_5 = \frac{e[T_{REF}(T_{TP} + u_5)] - e[T_{REF}(T_{TP})]}{u_5} = \frac{T_{REF}(T_{TP} + u_5) - T_{REF}(T_{TP})}{u_5}$$

## 6. Incertidumbre en el valor promedio de temperatura del TP

La incertidumbre  $u_6$ , asociada con los valores de temperatura  $T_{TP}$  que muestra el TP, se estima de manera análoga que  $u_1$ .

Si la resolución del TP es  $R_{TP}$  la incertidumbre está dada por

$$u_6 = \frac{\text{Max}[R_{TP}, T_{TP\text{max}} - T_{TP\text{min}}]}{\sqrt{12}}$$

El coeficiente de sensibilidad es,

$$c_6 = \frac{e[T_{REF}(T_{TP} + u_6)] - e[T_{REF}(T_{TP})]}{u_6} = \frac{T_{REF}(T_{TP} + u_6) - T_{REF}(T_{TP})}{u_6}$$

## 7. Deriva del TP

Denotamos  $u_7$  a la incertidumbre asociada con la deriva del TP. Al paso del tiempo, hay cambios en el comportamiento de las componentes ópticas, el detector de radiación y la electrónica que procesa la señal del detector del TP. Esta deriva produce un error en el valor de la temperatura que muestra el TP.

En general, se examina la estabilidad de los termómetros de radiación con el cambio de las lecturas entre calibraciones subsecuentes, y se utilizan estos valores experimentales para determinar la deriva.

La contribución debida a la deriva se puede despreciar si no pasa un tiempo excesivo entre la calibración del TP y la calibración del CP [2]; Típicamente, en los termómetros de radiación comerciales, no hay una contribución por deriva en un periodo dentro de los seis meses desde su calibración.

## 8. Temperatura de fondo (Laboratorio)

La incertidumbre  $u_8$  está asociada con la variación de la temperatura del fondo  $T_{AM}$  (Laboratorio).

Se considera que  $T_{AM}$  pertenece a una distribución rectangular con valores extremos  $T_{AM\text{min}}$  y  $T_{AM\text{max}}$ .

La incertidumbre está dada por  $u_8 = \frac{T_{AM \max} - T_{AM \min}}{\sqrt{12}}$ , y se calcula el coeficiente de sensibilidad con

$$c_8 = \frac{e[T_{REF}(T_{AM} + u_8)] - e[T_{REF}(T_{AM})]}{u_8} = \frac{T_{REF}(T_{AM} + u_8) - T_{REF}(T_{AM})}{u_8}$$

## 9. Absorción atmosférica

El efecto de la absorción atmosférica es equivalente a la diferencia en la señal detectada por el termómetro de radiación al realizar mediciones en condiciones normales y en condiciones de vacío.

Los componentes atmosféricos más importantes por su efecto en las mediciones en el infrarrojo son el vapor de agua y el bióxido de carbono.

Los termómetros de radiación para mediciones a bajas temperaturas, debajo del punto fijo de la plata, generalmente trabajan en intervalos de longitudes de onda que se encuentran en las denominadas “ventanas de baja absorción atmosférica”.

Si se trabaja en el interior, en condiciones de laboratorio, y la distancia al blanco de medición es menor que un metro, los efectos de absorción son despreciables: la estimación pesimista de la incertidumbre debida a la absorción atmosférica está entre 0.019 °C y 0.006 °C para un TR con longitud de onda efectiva media de 10 μm colocado a una distancia de un metro del blanco [2].

## EJEMPLO DE CALIBRACIÓN

Como TP se utiliza un termómetro de radiación comercial. En este equipo, la distancia mínima de enfoque es de 500 mm con un diámetro del campo de medición de 9 mm. La distancia de enfoque se mide desde el cuerpo del TP [3] hasta la superficie del blanco. Su intervalo de trabajo es de 8 a 13 μm.

El IBC es un CP que tiene una superficie con relieve de pirámides cuadradas y pintada en color negro mate.

Para la calibración se considera una emisividad nominal  $\varepsilon_N$  igual a 0.95, cuatro puntos de calibración (50 °C, 100 °C, 150 °C y 200 °C), y que el CP se pueda utilizar para calibrar termómetros de radiación que trabajen en el intervalo de 8 a 14 μm, a la  $\varepsilon_N$  indicada.

En el experimento, se colocó el TP a 50 cm del IBC.

### Estimación de las incertidumbres del ejemplo

#### 1. Incertidumbre en el valor promedio de temperatura del IBC

$T / ^\circ\text{C}$	$u_1 / ^\circ\text{C}$	$c_1$	$c_1 u_1 / ^\circ\text{C}$
50	0.029	1	0.029
100	0.029	1	0.029
150	0.029	1	0.029
200	0.058	1	0.058

#### 2. Emisividades promedio del IBC en $[\lambda_1, \lambda_2]$ y $[\lambda_3, \lambda_4]$ .

$T / ^\circ\text{C}$	$u_2 / ^\circ\text{C}$	$c_2$	$c_2 u_2 / ^\circ\text{C}$
50	0.007	0.343	0.002
100	0.004	0.836	0.003
150	0.004	1.238	0.004
200	0.004	1.618	0.006

Nota. Se tiene  $[8,13] \approx [8,14]$ , y se puede obtener la diferencia en los valores de  $T_{REF}$  calculados con la ecuación (11) en lugar del conjunto de ecuaciones (6) y (7). En la siguiente tabla aparecen dichos valores de  $T_{REF}$  en la primera y segunda columnas. La tercera columna muestra la diferencia, el error. La cuarta columna muestra la corrección con la aproximación lineal del error como función de  $T_{REF}$ . La quinta columna muestra la incertidumbre de la corrección como el valor absoluto de la diferencia entre el error y la corrección.

$T_{REF} / ^\circ\text{C}$ ecuación (11)	$T_{REF} / ^\circ\text{C}$ ecs. (6) y (7)	Error / $^\circ\text{C}$	Corrección / $^\circ\text{C}$ (aproximación lineal)	$u_{Corrección} / ^\circ\text{C}$
50.366	50.390	-0.024	0.028	0.004
100.856	100.908	-0.052	0.046	0.006
151.400	151.465	-0.064	0.064	0.000
202.030	202.110	-0.080	0.082	0.002

Como se observa, si utilizamos la corrección y su incertidumbre, podemos evitar la medición de la emisividad promedio del CP en los intervalos [8,13] y [8,14]. Esta estimación de la corrección y su incertidumbre es más general de lo que parece debido a que los CP tienen un comportamiento en emisividad muy similar debido al tipo de acabado que recibe su superficie.

### 3. Uniformidad de temperatura del IBC en la zona de enfoque

Para obtener el coeficiente de sensibilidad, tomamos  $d = 3 \text{ cm}$  y medimos el cambio en el valor de temperatura.

No se observó cambio en la lectura, por lo que el coeficiente de sensibilidad es cero.

$$c_3 \frac{\text{cm}}{^\circ\text{C}} = 0; \frac{c_3 u_3}{^\circ\text{C}} = 0$$

### 4. Posición del blanco

Para obtener el coeficiente de sensibilidad, giramos el TP un ángulo de  $3^\circ$  (0.52 radianes) en los planos vertical y horizontal, y desplazamos el IBC la distancia necesaria para mantener el punto de enfoque, y medimos el cambio en el valor de temperatura.

No se observó cambio en la lectura, por lo que el coeficiente de sensibilidad se tomó

igual a cero:  $\frac{c_4}{^\circ\text{C}} = 0; \frac{c_4 u_4}{^\circ\text{C}} = 0$

### 5. Calibración del TP

$T / ^\circ\text{C}$	$u_5 / ^\circ\text{C}$	$c_5$	$c_5 u_5 / ^\circ\text{C}$
50	0.157	1.043	0.164
100	0.157	1.036	0.163
150	0.158	1.034	0.163
200	0.159	1.034	0.164

#### 6. Incertidumbre en el valor promedio de temperatura del TP

$T / ^\circ\text{C}$	$u_6 / ^\circ\text{C}$	$c_6$	$c_6 u_6 / ^\circ\text{C}$
50	0.029	1.042	0.030
100	0.058	1.035	0.060
150	0.058	1.033	0.060
200	0.058	1.033	0.060

#### 7. Deriva del TP

Se realizó la calibración del TP simultáneamente con la calibración del calibrador plano, por lo que se consideró  $\frac{c_7 u_7}{^\circ\text{C}} = 0$ .

#### 8. Temperatura de fondo (Laboratorio)

$T / ^\circ\text{C}$	$u_8 / ^\circ\text{C}$	$c_8$	$c_8 u_8 / ^\circ\text{C}$
50	0.144	0.040	0.006
100	0.144	0.029	0.004
150	0.144	0.023	0.003
200	0.144	0.020	0.003

#### 9. Absorción atmosférica

Como en nuestro experimento la distancia entre CP y TP es de 50 cm, consideramos despreciable este efecto.

## Resultados

La siguiente tabla muestran las contribuciones a la incertidumbre para la medición a 200 °C. Sólo aparecen las variables que tienen una contribución diferente de cero.

Variable	$u_i / ^\circ\text{C}$	$c_i$	$c_i u_i / ^\circ\text{C}$	Contribución relativa / %
Incertidumbre en el valor promedio de temperatura del CP	0.058	1	0.058	9.83
Uso de la ec. (11)	0.002	1	0.002	0.01
Calibración del TP	0.159	1.034	0.164	79.64
Incertidumbre en el valor promedio de temperatura del TP	0.058	1.033	0.060	10.49
Temperatura del laboratorio	0.144	0.020	0.003	0.02

Con dichos valores, la incertidumbre estándar combinada es:  $u_c = \left[ \sum_i (c_i u_i)^2 \right]^{1/2} = 0.184$ .

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

$T_{IBC} / ^\circ\text{C}$	$T_{REF} / ^\circ\text{C}$	$e / ^\circ\text{C}$	$U_c / ^\circ\text{C}$
50.01	50.39	- 0.38	0.34
100.00	100.90	- 0.90	0.35
149.96	151.46	- 1.50	0.35
200.02	202.11	- 2.09	0.37

La incertidumbre de la medición  $U_c$  se obtuvo multiplicando la incertidumbre estándar combinada  $u_c$  por un factor de cobertura  $k = 2$ , el cual corresponde un nivel de confianza de aproximadamente 95 % bajo la suposición de que la función de densidad de probabilidad del mensurando es normal [4].

### ¿Qué se debe considerar al utilizar un calibrador plano para calibrar termómetros de radiación?

Un calibrador plano (CP) es un instrumento que tiene una superficie radiante plana con alta emisividad y que se utiliza para calibrar algunos termómetros de radiación (TR) cuyas características dificultan su calibración con equipos convencionales como cavidades de cuerpo negro.



Un CP no es un cuerpo negro ya que la emisividad de su superficie radiante es menor que uno. Tampoco es un cuerpo gris porque su emisividad es función de la longitud de onda.

Aunque un CP no es un cuerpo gris, ni negro, es posible calibrarlo como tal si se considera que el valor de temperatura que muestra en su pantalla corresponde al valor de temperatura  $T_{REF}$  de un cuerpo gris con una emisividad nominal  $\varepsilon_N$ , en un intervalo de longitudes de onda dado.

Al efectuar la calibración de la manera mencionada con un TR de referencia, se le denomina “calibración radiométrica” de la pantalla del CP.

Para la calibración del CP se utilizan los datos del valor de temperatura  $T_{AM}$  del laboratorio, la emisividad nominal  $\varepsilon_N$  que se asignó al CP, y que debe coincidir con el ajuste de emisividad de los TR que se calibrarán con el CP, y el intervalo de longitudes de onda de trabajo  $(\lambda_A, \lambda_B)$  de los TR que se calibrarán con el CP.

Como el CP no es un cuerpo negro, parte de la radiación que proviene de su superficie es radiación que emite el medio ambiente por estar a una cierta temperatura.



Si se intenta realizar una calibración de TR en un medio ambiente con un valor de temperatura  $T_B$  diferente al del valor de temperatura ambiente del laboratorio durante la calibración del CP, es decir,  $T_B \neq T_{AM}$ , entonces se tendrá que hacer una corrección a la temperatura de referencia  $T_{REF}$ .



Al enfocar un TR al CP, el TR recibe una cantidad de radiación que corresponde a la temperatura de referencia  $T_{REF}$  si la temperatura ambiente es  $T_{AM}$ , pero corresponde a un valor de temperatura diferente  $T_D$  si el valor de temperatura ambiente es  $T_B$ , y todos esos valores de temperatura están relacionados por la siguiente ecuación:

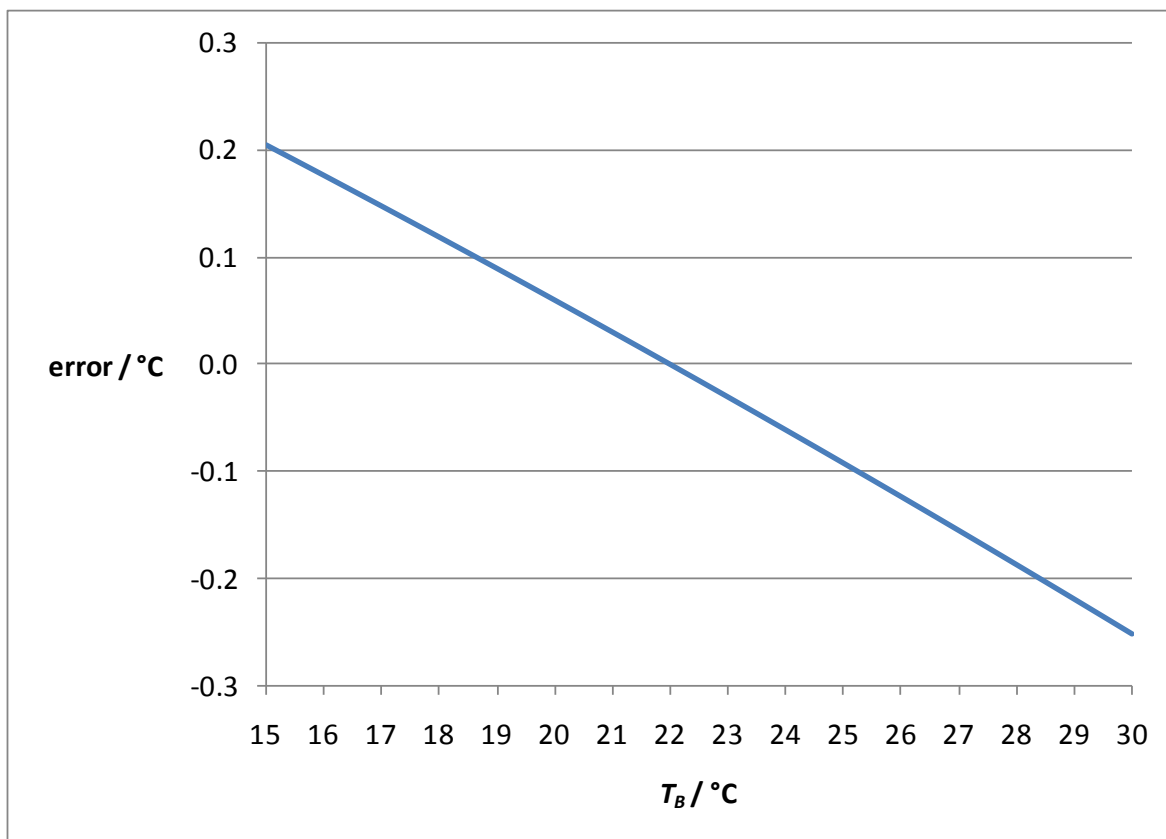
$$\varepsilon_N \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{REF}) d\lambda + (1 - \varepsilon_N) \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda = \varepsilon_N \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} L_{\lambda,B}(\lambda, T_D) d\lambda + (1 - \varepsilon_N) \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} L_{\lambda,B}(\lambda, T_B) d\lambda$$

Entonces, el valor  $T_D$  se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\int_{\lambda_A}^{\lambda_B} L_{\lambda,B}(\lambda, T_D) d\lambda = \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{REF}) d\lambda + \left( \frac{1 - \varepsilon_N}{\varepsilon_N} \right) \left[ \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} L_{\lambda,B}(\lambda, T_{AM}) d\lambda - \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} L_{\lambda,B}(\lambda, T_B) d\lambda \right]$$

Entonces, si el valor de la temperatura ambiente  $T_B$  durante el uso del CP no es igual, dentro del intervalo de incertidumbre, al de  $T_{AM}$ , se puede calcular el error de la temperatura de referencia.

En la figura se muestra la gráfica del error,  $T_D - T_{REF}$ , en función de  $T_B$  para el caso  $T_{REF} = 100^\circ C$ ,  $\varepsilon_N = 0.95$ ,  $T_{AM} = 22^\circ C$ .



Debido a lo anterior, se recomienda no usar el calibrador plano en calibraciones en campo sin condiciones controladas.

## CONCLUSIÓN

Se presentó un método para calibrar calibradores planos en el que se considera que el valor de temperatura que muestran corresponde al valor de temperatura de un cuerpo gris con una emisividad nominal en un intervalo de longitudes de onda dado.

## REFERENCIAS

- [1] Hoja de cálculo *Emisividad 01*. El error en el valor de emisividad es de 0.0002, mientras que la incertidumbre en el valor de emisividad es de 0.01.
- [2] P. Saunders, J. Fischer, M. Sadli, M. Battuello, C. W. Park, Z. Yuan, H. Yoon, W. Li, E. van der Ham and F. Sakuma, et al., "Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver Point", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 29, No. 3, pp. 1066-1083, DOI: 10.1007/s10765-008-0385-1.

[3] MINOLTA/LAND, CYCLOPS 300AF/300 INSTRUCTION MANUAL, 9222-1860-21,  
Printed in Japan.

[4] NMX-CH-140-IMNC 2002 Guía para la expresión de la Incertidumbre en las  
Mediciones, equivalente al documento JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor  
corrections) Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in  
measurement. BIPM. First edition – September 2008.