

MAGNITUDES DE INFLUENCIA EN LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE RADIACIÓN DEBAJO DEL PUNTO FIJO DE LA PLATA

Daniel Cárdenas García

El Marqués, Qro., México, diciembre 2018

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

Cárdenas-García, D., Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, Centro Nacional de Metrología, México, noviembre 2017. Disponible en <<http://www.cenam.mx>>

MAGNITUDES DE INFLUENCIA EN LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE RADIACIÓN DEBAJO DEL PUNTO FIJO DE LA PLATA

La medición de la temperatura por medio de termometría de radiación es de interés en diversas industrias y sectores. Los valores de temperatura deben ser trazables para aportar información que permita tomar decisiones confiables. Uno de los requisitos para que el valor medido de temperatura tenga trazabilidad es que el termómetro de radiación debe estar calibrado. La calibración de un termómetro de radiación debe tomar en cuenta las magnitudes que influyen en el resultado de la calibración. Estas magnitudes se conocen como magnitudes de influencia y están presentes en todas las calibraciones. La incertidumbre de una calibración se subestima cuando los efectos de alguna de las magnitudes de influencia se omiten o subestiman.

En la calibración de un termómetro de radiación que despliega directamente un valor de temperatura, su lectura de temperatura se compara con una temperatura de referencia T , trazable a la Escala Internacional de Temperatura de 1990, que es función de varias magnitudes:

$$T = T(x_1, \dots, x_{19}, x_{20}, \dots, x_M; T_{TP1}, T_1, \dots, T_{TPN}, T_N) \quad (1)$$

En la ecuación (1), x_1 a x_{19} son las magnitudes de influencia que deben evaluarse en todas las calibraciones de termómetros de radiación debajo del punto de la plata, y son las que se describen en este documento. Las magnitudes de influencia x_{20} a x_M son particulares de cada laboratorio de calibración y toman en cuenta las diferencias entre el modelo de medición utilizado y su realización experimental. Aunque las magnitudes de influencia x_{20} a x_M no se describen en este documento, es responsabilidad del laboratorio de calibración evaluarlas. Finalmente, las N parejas (T_{Pi}, T_i) son los valores medidos cuando el termómetro patrón fue calibrado en N puntos de temperatura: T_{Pi} es el valor de temperatura medido por el termómetros patrón cuando fue calibrado y T_i es el valor con el que se comparó en su calibración.

De acuerdo con [1], la incertidumbre combinada de la temperatura de referencia está dada por:

$$u^2(T) = \sum_{i=1}^M u_i^2 \quad (2)$$

Donde u_i es la incertidumbre asociada con la magnitud de influencia x_i .

Las magnitudes de influencia x_1 a x_{19} aparecen en la Tabla 1. Las abreviaturas utilizadas son: TP (termómetro patrón), TBC (termómetro de radiación bajo calibración) y F (fuente).

Tabla 1. Magnitudes de influencia

Identificador	Magnitud
x_1	Promedio de las lecturas del TP
x_2	Resolución de las lecturas del TP
x_3	Propagación del error de calibración del TP
x_4	Estabilidad de largo plazo del TP
x_5	Emisividad efectiva de F
x_6	Radiación reflejada en el área efectiva de F proveniente del ambiente
x_7	Intercambio de energía entre el área efectiva de F y el medio ambiente
x_8	Uniformidad espacial en temperatura del área efectiva de F
x_9	Estabilidad de corto plazo en temperatura del área efectiva de F
x_{10}	Efecto de tamaño de fuente del TBC
x_{11}	No linealidad del TBC
x_{12}	Temperatura de referencia del detector del TBC
x_{13}	Cambio en la respuesta de los componentes electrónicos y ópticos del TBC debida a los cambios de temperatura del medio ambiente
x_{14}	Atenuación de la radiación que recibe el TBC debida a absorción atmosférica
x_{15}	Razón de ganancia de los amplificadores del TBC
x_{16}	Ruido de la señal del TBC
x_{17}	Promedio de las lecturas del TBC
x_{18}	Resolución de las lecturas del TBC
x_{19}	Repetibilidad del error del TBC

A continuación se describen las magnitudes de influencia x_1 a x_{19} .

Promedio de las lecturas del TP

El promedio de las lecturas del TP, x_1 , se obtiene al medir el valor de temperatura de F repetidamente. Su incertidumbre u_1 es igual a la raíz cuadrada de la variancia del valor x_1 considerando una distribución gaussiana.

$$u_1^2 = \text{var}(x_1) \quad (3)$$

Resolución de las lecturas del TP

Los valores de temperatura medidos por el TP están cuantizados a un intervalo mínimo x_2 . La incertidumbre u_2 es igual a la desviación estándar considerando una distribución rectangular:

$$u_2^2 = \frac{x_2^2}{12} \quad (4)$$

Ejemplo. Si x_2 es igual a 0.01 K, entonces $u_2 = 0.003$ K.

Propagación del error de calibración del TP

El valor promedio de temperatura y su incertidumbre medidos con el TP se corrigen con la información del error e incertidumbre proveniente de su calibración.

El valor corregido de x_1 es,

$$T_{TP} = T_{TP}(x_1; T_{TP1}, T_1, \dots, T_{TPN}, T_N) \quad (5)$$

y la incertidumbre de la propagación está dada por:

$$u_3^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial T}{\partial T_{TPi}} \right)^2 u^2(T_{TPi}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial T}{\partial T_i} \right)^2 u^2(T_i) \quad (6)$$

Nota, en esta incertidumbre no aparece el término $u_1^2 = \text{var}(x_1)$ porque ya se tomó en cuenta anteriormente.

Estabilidad de largo plazo del TP

La estabilidad de largo plazo se obtiene del historial de las calibraciones y verificaciones del TP. Si un TP tiene una deriva D en porcentaje por día del valor medido T_{TP} , y han transcurrido Q días desde su calibración, entonces

$$u_4^2 = (DQT_{TP})^2 \quad (7)$$

Ejemplo. Si para un TP, D es igual a 0.0003%/día, y han pasado 30 días desde su calibración, y T_{TP} es igual a 455 K, entonces $u_4 = 0.041$ K.

Emisividad efectiva de F

F no es un cuerpo negro y tiene una emisividad espectral que depende de la longitud de onda. Esto ocasiona que la temperatura de su área efectiva no sea igual a su temperatura de radiancia en la región espectral de respuesta del termómetro bajo calibración. La incertidumbre de la temperatura de radiancia es función de la incertidumbre de la emisividad efectiva ε .

$$u_5^2 = \left(\frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right)^2 u^2(\varepsilon) \quad (8)$$

Radiación reflejada en el área efectiva de F proveniente del ambiente

Es la contribución a la radiación que llega al TBC, proveniente de F, debido a que F no es un cuerpo negro. Es particularmente importante cuando F tiene una emisividad efectiva baja y se hacen calibraciones a temperaturas menores que las del ambiente. Su incertidumbre es función de la variación de la temperatura del medio ambiente.

$$u_6^2 = \left(\frac{\partial T}{\partial T_{AM}} \right)^2 u^2(T_{AM}) \quad (9)$$

Intercambio de energía entre el área efectiva de F y el medio ambiente

Se debe a que el área efectiva de F no se encuentra a la misma temperatura que el medio ambiente. Tiene contribuciones debidas a conducción, radiación y convección. Su incertidumbre es función de la variación de la temperatura del medio ambiente.

$$u_7^2 = \left(\frac{\partial T}{\partial x_7} \right)^2 \left(\frac{dx_7}{dT_{AM}} \right)^2 u^2(T_{AM}) \quad (10)$$

Uniformidad espacial en temperatura del área efectiva de F

Se debe a que el área efectiva de F no emite (ni refleja) la misma cantidad de radiación en todos sus puntos. Esto ocasiona que se obtengan diferentes valores de temperatura con termómetros de radiación que tienen campos de visión diferentes. Si $u_U(\text{TP})$ es la incertidumbre de la uniformidad en el campo de visión del TP y $u_U(\text{TBC})$ es la incertidumbre en la uniformidad en el campo de visión del TBC, entonces

$$u_8^2 = u_U^2(\text{TP}) + u_U^2(\text{TBC}) \quad (11)$$

Por ejemplo, si a 120 °C, $u_U(\text{TP}) = 0.20 \text{ K}$ y $u_U(\text{TBC}) = 0.25 \text{ K}$, entonces $u_8 = 0.32 \text{ K}$.

Estabilidad de corto plazo en temperatura del área efectiva de F

Se debe que cada punto del área efectiva de F no emite (ni refleja) la misma cantidad de radiación a lo largo del tiempo de medición durante la calibración. Está relacionada principalmente con el lazo de control de temperatura de F. De acuerdo con [2], la resolución normal de un lazo de control es $\pm x_9$ °C, entonces

$$u_9^2 = \frac{x_9^2}{3} \quad (12)$$

Por ejemplo, si x_9 es igual a 0.1 K, entonces $u_9 = 0.058 \text{ K}$.

Efecto de tamaño de fuente del TBC

El campo de visión de un termómetro de radiación depende del diseño de su sistema óptico. Para definirlo deben proporcionarse tres parámetros: el diámetro del campo de visión, la distancia entre el termómetro de radiación y el sitio donde se mide el campo de visión, y el porcentaje de radiación que llega al termómetro de radiación proveniente de un área con el diámetro del campo de visión especificado. Las imperfecciones del sistema óptico causan esparcimiento y difracción de la radiación dentro y fuera del cono de visión ideal. Por esa razón, radiación que está afuera del cono de visión ideal incide en el detector, y radiación que está dentro del cono de visión ideal es esparcida fuera del detector. Esto da lugar a que la radiación medida esté influida por el tamaño de la fuente de radiación que se mide; esto es el efecto de tamaño de fuente (ETF). Su contribución a la incertidumbre de la temperatura de referencia está dada por:

$$u_{10}^2 = \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma_C} \right)^2 u^2(\sigma_C) \quad (13)$$

Donde σ_C es la función del efecto de tamaño de fuente del TBC.

No linealidad del TBC

Idealmente, la señal que proporciona el TBC es lineal con respecto de la radiancia de F. La desviación de la linealidad depende principalmente de las características del detector, aunque también pueden influir las características del circuito electrónico que manipula la señal del detector. Si NL es la no-linealidad, entonces la señal corregida es

$$S = NL \cdot S_{\text{nocorregida}} \quad (14)$$

La incertidumbre de la corrección es $u(S)$, y de ésta se obtiene,

$$u_{11}^2 = \left(\frac{S}{\frac{\partial S}{\partial T} \Big|_{T=x_{17}}} \right)^2 \left[\frac{u(S)}{S} \right]^2 \quad (15)$$

En [2] se menciona que de manera normal, para termómetros de radiación en el intervalo de 8 a 14 micrómetros se tiene $\frac{u(S)}{S} = 0.002$. Así, si x_{17} es igual al 20 °C, se obtiene $u_{11} = 0.13$ K

Temperatura de referencia del detector del TBC

Para los detectores que trabajan a temperatura ambiente, la señal neta detectada es igual a la diferencia entre la señal debida a la radiancia de la fuente radiante y la señal a una temperatura de referencia. Típicamente, la temperatura de referencia es la temperatura del detector, que puede ser considerada aproximadamente igual a la temperatura ambiente en los termómetros de radiación más económicos, o la temperatura de una superficie de referencia en sistemas con chopper. Es importante observar que no se genera una señal cuando la temperatura de radiancia de la fuente es igual a la temperatura de referencia.

$$u_{12}^2 = \left(\frac{\frac{\partial S}{\partial T} \Big|_{T=T_{DET}}}{\frac{\partial S}{\partial T} \Big|_{T=x_{17}}} \right)^2 u^2(T_{DET}) \quad (16)$$

Ejemplo. Para un termómetro de radiación cuya temperatura del detector es igual a 23 °C con una incertidumbre igual a 0.1 K, y el TBC mide un valor de temperatura igual a 98.7 °C, se tiene $u_{12} = 0.058$ K.

Respuesta de los componentes electrónicos del TBC a los cambios de temperatura del medio ambiente

Los componentes electrónicos que manipulan la señal del detector y los componentes ópticos por los que viaja la radiación cambian su respuesta en función de cambios en su temperatura debidos a cambios en la temperatura del medio ambiente. El efecto neto en el valor de temperatura de radiancia debido al cambio en la temperatura ambiente proviene del cambio en:

- la radiación ambiente
- la responsividad del detector
- el factor de amplificación de la señal detectada
- la transmitancia del filtro

$$u_{13}^2 = \left(\frac{\frac{S}{\partial S}}{\frac{\partial T}{\partial T}} \bigg|_{T=x_{17}} \right)^2 \left[\frac{u(S)}{S} \right]^2 \quad (17)$$

En [2] se considera que de manera normal $\frac{u(S)}{S} = 0.0011$. Esto significa, que para x_{17} igual a -20 °C, $u_{13} = 0.051$ K

Atenuación de la radiación que recibe el TBC debida a absorción atmosférica

Generalmente, en el laboratorio la radiación que viaja de la fuente al termómetro cruza la atmósfera. La atmósfera no es perfectamente transparente a la radiación. Esto causa una atenuación en la radiación, y por lo tanto una disminución en la señal del detector. Esto tiene un efecto en la calibración si se utiliza un termómetro de radiación patrón que se coloca a una distancia de la fuente diferente que la del termómetro de radiación bajo calibración.

$$u_{14}^2 = \left(\frac{\frac{S}{\partial S}}{\frac{\partial T}{\partial T}} \bigg|_{T=T_f} \right)^2 \left[\frac{u(S)}{S} \right]^2 \quad (18)$$

Nota: en [2] se establece un valor normal de $\frac{u(S)}{S} = 0.0003$ para una distancia entre fuente y termómetro igual a un metro. Ejemplo. Para una temperatura de la fuente T_f , igual a 20 °C, con la medición a un metro de distancia, se obtiene $u_{14} = 0.019$ K .

Razón de ganancia de los amplificadores del TBC

La radiancia cambia exponencialmente con la temperatura, por lo que puede rebasarse el intervalo de respuesta del detector y requerirse varias etapas de amplificación. Típicamente las etapas de amplificación no mantienen una razón de ganancias exacta.

$$u_{15}^2 = \left(\frac{\frac{S}{\partial S}}{\frac{\partial T}{T=x_{17}}} \right)^2 \left[\frac{u(S)}{S} \right]^2 \quad (19)$$

Nota: en [2] se menciona que, de manera normal, para termómetros de radiación en el intervalo de 8 a 14 micrómetros, se tiene $\frac{u(S)}{S} = 0.0001$. Así, si por ejemplo x_{17} es igual al 20 °C, se obtiene $u_{15} = 0.006\text{K}$.

Ruido de la señal del TBC

El ruido de la señal del TBC es la variación que no se debe a la variación de la radiancia del área de la fuente que es cubierta por el campo de visión del TBC. El ruido limita la menor diferencia de temperatura que se puede medir. Entre menor sea el ruido, menor será la diferencia de temperatura que se puede detectar. Su incertidumbre puede tomarse de las especificaciones del TBC, o determinarse experimentalmente.

$$u_{16}^2 = \frac{\text{var}(S)}{\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)^2} \quad (20)$$

Nota: cuando se evalúa el ruido deben eliminarse los efectos de algunas magnitudes como la repetibilidad del error del TBC.

Promedio de las lecturas del TBC

El promedio de las lecturas del TBC, x_{17} , se obtiene al medir el valor de temperatura de F repetidamente. Su incertidumbre u_{17} es igual a la raíz cuadrada de la variancia del valor x_{17} considerando una distribución gaussiana.

$$u_{17}^2 = \text{var}(x_{17}) \quad (21)$$

Resolución del TBC

Los valores de temperatura medidos por el TBC están cuantizados a un intervalo mínimo x_{18} . La incertidumbre u_{18} es igual a la desviación estándar considerando una distribución rectangular:

$$u_{18}^2 = \frac{x_{18}^2}{12} \quad (22)$$

Ejemplo. Si x_{18} es igual a 0.1 K, entonces $u_{18} = 0.029$ K .

Repetibilidad del error del TBC

La incertidumbre debida a la repetibilidad del error al repetir la calibración del TBC se considera igual a la diferencia entre los errores obtenidos en el mismo punto de calibración que se repite dos veces, tomando una distribución rectangular. Si los errores de cada calibración son e_1 y e_2 , entonces la incertidumbre es:

$$u_{19}^2 = \frac{(e_1 - e_2)^2}{12} \quad (23)$$

Ejemplo. Si e_1 y e_2 son iguales a 0.974 K y 1.034 K respectivamente, entonces $u_{19} = 0.017$ K .

Referencias

1. *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JCGM 100, BIPM, Sèvres, France, May 2008. Disponible en el sitio del BIPM, <http://www.bipm.org>.
2. Fischer, J., Saunders, P., Sadli, M., Battuello, M., Park, C. W., Yuan, Z., Yoon, H., Li, W., van der Ham, E., Sakuma, F., Yamada, Y., Ballico, M., Machin, G., Fox, N., Hollandt, J., Ugur, S., Matveyev, M., Bloembergen, P., “Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point”, CCT-WG5 working document CCT-WG508-03, BIPM, Sèvres, France, May 2008. Disponible en el sitio del BIPM, <http://www.bipm.org>.

-Fin del documento-