

Bogotá - 2022



www.inm.gov.co



INMdeColombia

Guía para la calibración de termómetros de radiación /
Ciro Alberto Sánchez [y otros tres] -- Bogotá, (Colombia) : Instituto Nacional de Metrología, 2022.

30 páginas.

Incluye referencias bibliográficas, tablas y fotos

ISBN e-Book: 978-958-53642-6-4

1. Fuentes de radiación 2. Modelo matemático 3. Efecto de tamaño del blanco 4. Método de calibración 5. Equipamiento 6. Condiciones ambientales 7. Resolución óptica del termómetro bajo calibración 8. Respuesta espectral 9. Emisividad del termómetro bajo calibración 10. Proceso de calibración 11. Toma de datos 12. Tratamiento de datos y resultados 13. Presentación de resultados 14. Evaluación de la incertidumbre de medición (Colombia).

U.A.E. Instituto Nacional De Metrología (978-958-53642)

Instituto Nacional de Metrología - INM.

Av. Carrera 50 No 26 - 55 Int. 2, Bogotá.

Código Postal: 111321 - Colombia.

Esta guía es el resultado del trabajo conjunto entre el Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM, miembros de la Red Colombiana de Metrología - RCM (Grupos Técnicos Temáticos o Grupos Técnicos por Magnitud) y el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC con el fin armonizar métodos de calibración y propender por la uniformidad y coherencia en criterios técnicos mínimos a emplear por los laboratorios de calibración y usuarios de estos métodos. Esta guía presenta metodologías reconocidas internacionalmente y se ha elaborado recogiendo el conocimiento y la experiencia de los miembros del equipo de trabajo, de tal forma que pueda ser usada como base para la elaboración de procedimientos e instructivos prácticos por parte de los laboratorios de calibración y ensayo.

En este sentido lo consignado en esta guía se constituye en un referente para:

a. El Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC. b. Los laboratorios de calibración y ensayo que involucren los métodos o criterios técnicos consignados en esta guía. c. Los laboratorios internos de las organizaciones o fabricantes que requieran el uso de estos métodos de calibración o criterios técnicos.

Fecha de recepción: 5 de diciembre de 2019.

Fecha de evaluación: 18 de noviembre de 2021.

Fecha de aceptación: 10 de diciembre de 2021.

Preparación editorial

U.A.E. Instituto Nacional De Metrología
(978-958-53642)

Edición:

Instituto Nacional de Metrología - INM. Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC. Laboratorios de calibración.

Corrección de estilo:

Instituto Nacional de Metrología - INM. Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC. Laboratorios de calibración.

Diagramación:

Instituto Nacional de Metrología - INM. Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC.

Línea de atención al cliente: +57 (601) 254 2222.

Línea Nacional: 01 8000112542.

contacto@inm.gov.co

www.inm.gov.co

Citación sugerida:

Sánchez, C. A., Carvajal Perdomo, S. A., Quijano Torres, R. P. & Bohórquez Garzón, A. J. (2022). Guía para la calibración de termómetros de radiación. Instituto Nacional de Metrología.

Publicado en Bogotá, Colombia, julio de 2022.

1. CONTENIDO

1. OBJETIVO	5
2. ALCANCE.....	5
3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS.....	5
4. DEFINICIONES	6
5. GENERALIDADES	10
5.1. Fuentes de radiación	12
5.2. Modelo matemático	13
5.3. Efecto de tamaño del blanco	14
6. DESCRIPCION DE ACTIVIDADES	15
6.1. Método de calibración	15
6.2. Equipamiento	15
6.3. Condiciones ambientales.....	15
7. OPERACIONES PREVIAS	15
7.1. Resolución óptica del termómetro bajo calibración	16
7.2. Respuesta espectral.....	16
7.3. Emisividad del termómetro bajo calibración.....	16
8. PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	16
9. TOMA DE DATOS.....	17
10. TRATAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS.....	17
11. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	17
11.1. Descripción del termómetro.....	17
11.2. Descripción del método de calibración	18
12. EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN.....	18
12.1. Incertidumbre de medición del sistema patrón.....	18
12.2. Incertidumbre de medición de la corrección	20
13. REFERENCIAS	23
14. ANEXOS.....	24

EQUIPO DE TRABAJO

Este documento fue elaborado en el espacio del Grupo Técnico por Magnitud de Temperatura de la Red Colombiana de Metrología. Para el desarrollo del documento se contó con la participación del Instituto Nacional de Metrología de Colombia – INM: Andrés Jhovanny Bohórquez Garzón, Sergio Andrés Carvajal Perdomo y Ciro Alberto Sánchez Morales, el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC y los laboratorios de calibración que han desarrollado la magnitud relacionada y que han participado en las reuniones del grupo técnico.

REVISIÓN

Mesa de Trabajo Técnico Científico de la Subdirección de Metrología Física

1. OBJETIVO

Proporcionar lineamientos para la calibración de termómetros de radiación con el fin de mejorar la compatibilidad de los resultados de calibración obtenidos por los laboratorios que calibran este tipo de instrumentos.

2. ALCANCE

Esta guía aplica a los termómetros de radiación. El intervalo de medición de temperatura de 0 °C a 500 °C.

La calibración de los termómetros se realiza con termómetros patrones calibrados, con referencia a la Escala Internacional de Temperatura de 1990, ITS-90 (1)

3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

Tabla 1. Abreviaturas, siglas y símbolos

Abreviatura, sigla y símbolo	Significado
IR	Infrarrojo
IBC/DUT	Instrumento bajo calibración
D:S	Proporción entre el diámetro y longitud de operación de un termómetro IR
SSE	Efecto de tamaño de blanco
λ	Longitud de onda
L	Radiancia
c_1	Constante igual a 1,1911.108 $W \cdot \mu m^4 \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
c_2	Constante igual a 0,014388 m.K
c_3	Constante igual 28976 $\mu m \cdot K$
T	Temperatura
i	Intensidad de radiación
ϵ	Emisividad
h	Constante de Planck
c_0	Velocidad de la luz en el vacío
k	Constante de Boltzmann
σ	Constante de Stefan- Boltzmann
σ_{SSE}	Efecto de tamaño de blanco
S	Señal emitida por el termómetro

Abreviatura, sigla y símbolo	Significado
<i>R</i>	Respuesta espectral absoluta
<i>A</i>	Constante ecuación de Sakuma-Hattori
<i>B</i>	Constante ecuación de Sakuma-Hattori
<i>C'</i>	Constante ecuación de Sakuma-Hattori
<i>r</i>	Radio
<i>s</i>	Desviación estándar
<i>a</i>	Amplitud en ecuación de SSE
<i>n</i>	Parámetro de forma en ecuación SSE
<i>U</i>	Incertidumbre expandida
<i>u</i>	Incertidumbre típica
<i>C</i>	Corrección
<i>k</i>	Factor de cobertura

Subíndice	Significado
<i>der</i>	Deriva
<i>cert</i>	Certificado
<i>Res</i>	Resolución
<i>b</i>	Cuerpo negro
<i>mean</i>	Promedio
<i>X</i>	Instrumento bajo calibración
<i>P</i>	Patrón
<i>Unf</i>	Uniformidad
<i>Est</i>	Estabilidad
<i>int</i>	Interpolación
<i>rep</i>	Repetibilidad
<i>d</i>	Detector
<i>va</i>	Variación por alineación
<i>vd</i>	Variación por distancia
<i>W</i>	Pared
<i>equiv</i>	Equivalente
<i>aa</i>	Absorción atmosférica

4. DEFINICIONES

Para los propósitos de este documento se aplican las siguientes definiciones tomadas de la referencia (2), además de otras específicas.

EXACTITUD DE MEDIDA. Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando (VIM 2.13) (2).

El concepto “exactitud de medida” no es una magnitud y no se expresa numéricamente. Se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medida.

ERROR DE MEDIDA. Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia (VIM 2.16) (2).

INCERTIDUMBRE DE MEDIDA. Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza (VIM 2.26) (2).

INTERVALO DE COBERTURA. Intervalo que contiene el conjunto de valores verdaderos de un mensurando con una probabilidad determinada, basada en la información disponible (VIM 2.36) (2).

PROBABILIDAD DE COBERTURA. Probabilidad de que el conjunto de los valores verdaderos de un mensurando esté contenido en un intervalo de cobertura especificado (VIM 2.37) (2).

CALIBRACIÓN. Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación (VIM 2.39) (2).

TRAZABILIDAD METROLÓGICA. Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida (VIM 2.41) (2).

NOTA: La trazabilidad debe indicarse al sistema internacional de unidades y no a una institución particular como un instituto nacional de metrología.

SENSOR. Elemento de un sistema de medición directamente afectado por la acción del fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud a medir (VIM 3.8) (2).

RESOLUCIÓN DE UN DISPOSITIVO VISUALIZADOR. Mínima diferencia entre indicaciones visualizadas, que puede percibirse de forma significativa (VIM 4.15) (2).

NOTA: Para un dispositivo visualizador digital, corresponde al mínimo cambio de la cifra menos significativa.

INCERTIDUMBRE INSTRUMENTAL. Componente de la incertidumbre de medida que procede del instrumento o sistema de medida utilizado (VIM 4.24) (2).

PATRÓN DE MEDICIÓN. Realización de la definición de una magnitud dada con un valor determinado y una incertidumbre de medición asociada, tomada como referencia (VIM 5.1) (2).

HISTÉRESIS: Propiedad de un instrumento de medida cuya respuesta a una señal de entrada determinada, depende de la secuencia de las señales (1) de entrada precedentes (3).

TERMÓMETRO: Conjunto indicador más sensor o termómetro digital. Instrumento de medición dedicado a mediciones de temperatura con una indicación digital en unidades de temperatura: °C, °F, K. Constituido por un indicador y un sensor.

SPRT. Termómetro patrón de resistencia de platino utilizado para interpolar valores entre puntos fijos de la ITS-90 desde - 200 °C hasta 961 °C.

PRT. Termómetro de resistencia de platino.

LONGITUD DE ONDA. Es el período espacial de una onda – la distancia a la cual se repite la forma de la onda. Se nota con el símbolo λ , su unidad es $[\lambda] = m$.

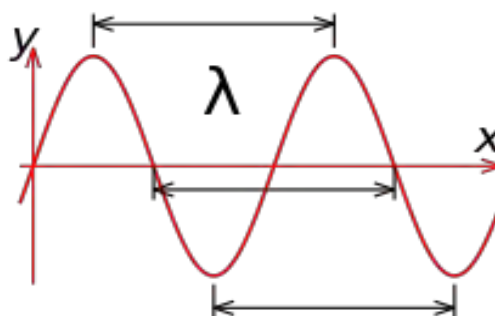


Figura 1. Amplitud de onda

RADIANCIA. Es la cantidad de energía por unidad de tiempo en una dada dirección, por unidad de ángulo sólido, por unidad de área de la fuente, correspondiente a la dirección de observación. Se la denota mediante el símbolo L , $[L] = W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$. La radiancia espectral es la radiancia por unidad de longitud de onda, se la nota como $L(\lambda)$, sus unidades son $[L(\lambda)] = W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$.

CUERPO NEGRO. Un cuerpo que no refleja radiación. En equilibrio térmico un cuerpo negro absorbe e irradia con la misma intensidad. Un cuerpo negro emite radiación de acuerdo a la ley de radiación de Planck.

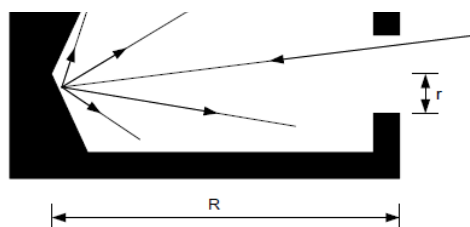


Figura 2. Cavidad que actúa como cuerpo negro

CUERPO GRIS. Un cuerpo en el cual la emisividad espectral no depende de la longitud de onda (4).

CUERPO DIFUSO. Un cuerpo en el cual la emisividad direccional no depende de la dirección (4).

SUPERFICIE GRIS-DIFUSA. Superficie que absorbe una fracción fija de radiación incidente desde alguna dirección a alguna longitud de onda y emite radiación que es una fracción fija de la radiación de un cuerpo negro para todas las direcciones y todas las longitudes de onda (4).

EMISIVIDAD. Relación entre la radiancia emitida por una superficie y la emitida por un cuerpo negro a igual temperatura. Se utiliza el término emitancia para indicar la emisividad de una muestra o un objeto.

TERMÓMETRO DE RADIACIÓN. Instrumento que mide la temperatura de la superficie de un cuerpo mediante la detección de la radiación térmica emitida por aquel y el procesamiento de la señal generada.

LONGITUD DE ONDA DE OPERACIÓN. Se refiere a la longitud de onda característica para la cual un termómetro de radiación monocromática es sensible.

TEMPERATURA DE RADIANCIA. Es el valor equivalente de temperatura de un cuerpo negro que provee la misma radiancia, para un intervalo espectral especificado, que el cuerpo bajo consideración.

ÁNGULO DE MEDICIÓN. Es el ángulo de un triángulo rectángulo cuyo cateto opuesto tiene como longitud al diámetro de la fuente y como altura la distancia entre el termómetro y la fuente.

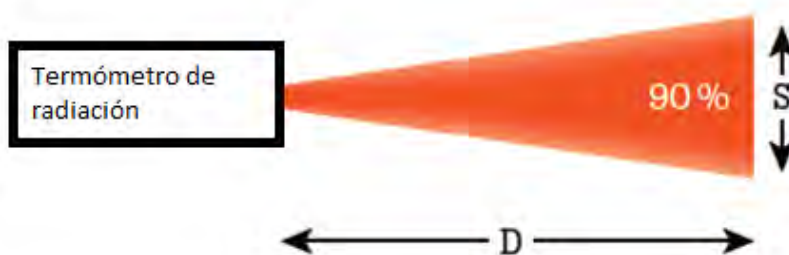


Figura 3. Ángulo de medición en un termómetro IR

5. GENERALIDADES

Una de las consecuencias de la tercera ley de la termodinámica es que a 0 K un sistema físico permanece inmóvil. Entonces para cualquier temperatura alcanzable los átomos y moléculas de un sistema se están moviendo, en virtud de este movimiento todas las sustancias continuamente emiten radiación electromagnética.

La radiación que es detectada como calor es llamada radiación térmica y está en la mitad del espectro electromagnético que se extiende entre 0.1 μm a 1 000 μm . Incluye algo del ultravioleta, el visible y la región infrarroja del espectro (5). La radiación térmica es muy importante en transferencia de calor a altas temperaturas, como hornos, cámaras de combustión, emisiones de energía de explosiones nucleares, distribución de temperaturas y radiaciones emitidas por el sol, etc. (4).

Un concepto central en radiación térmica es el cuerpo negro, el cual es un cuerpo ideal que permite que toda la radiación incidente pase, lo que implica que no hay reflexión y que internamente absorbe toda la radiación incidente (no se transmite energía) (4). Las principales propiedades de un cuerpo negro son:

- Emisor perfecto.
- Radiación isotrópica en un recinto negro.
- Emisor perfecto en todas las direcciones.
- Emisor perfecto a cada longitud de onda.
- La radiación total en el vacío es función exclusivamente de la temperatura.

Usando argumentos cuánticos Planck mostró que la relación entre la radiancia espectral de un cuerpo negro, la intensidad radiante, la temperatura y la longitud de onda está dada por la ecuación (1).

$$L_b(\lambda, T) = \pi i'_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{2\pi c_1}{\lambda^5 \left(e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1 \right)} \quad (1)$$

donde, $c_1 = hc_0^2 = 0.59552197 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / (\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, $c_2 = hc_0/k = 0,01438769 \text{ mK}$

En la Figura 4 se presenta una gráfica de la ecuación (1). Para bajas temperaturas, solo una pequeña cantidad de energía es localizada en la región visible (0.4 μm a 0.7 μm (rojo)) por lo que no es detectada por el ojo humano. Cuando la temperatura aumenta, más energía es localizada en la región visible, debido a que la pendiente desde el rojo al violeta es decreciente a bajas temperaturas la luz roja se vuelve visible primero cuando la temperatura aumenta. Para temperaturas mayores longitudes de onda adicionales se vuelven visibles y a temperaturas suficientemente altas todas las longitudes de onda en el rango visible se mezclan, produciendo el blanco (4).

Una de las características de la radiancia es que los picos se mueven hacia longitudes de onda menores cuando la temperatura aumenta. Estos picos están representados matemáticamente por la ley de desplazamiento de Wien (ecuación (2)).

$$\lambda_{\max} T = c_3 \quad (2)$$

donde $c_3 = 2897.756 \mu\text{m}\cdot\text{K}$

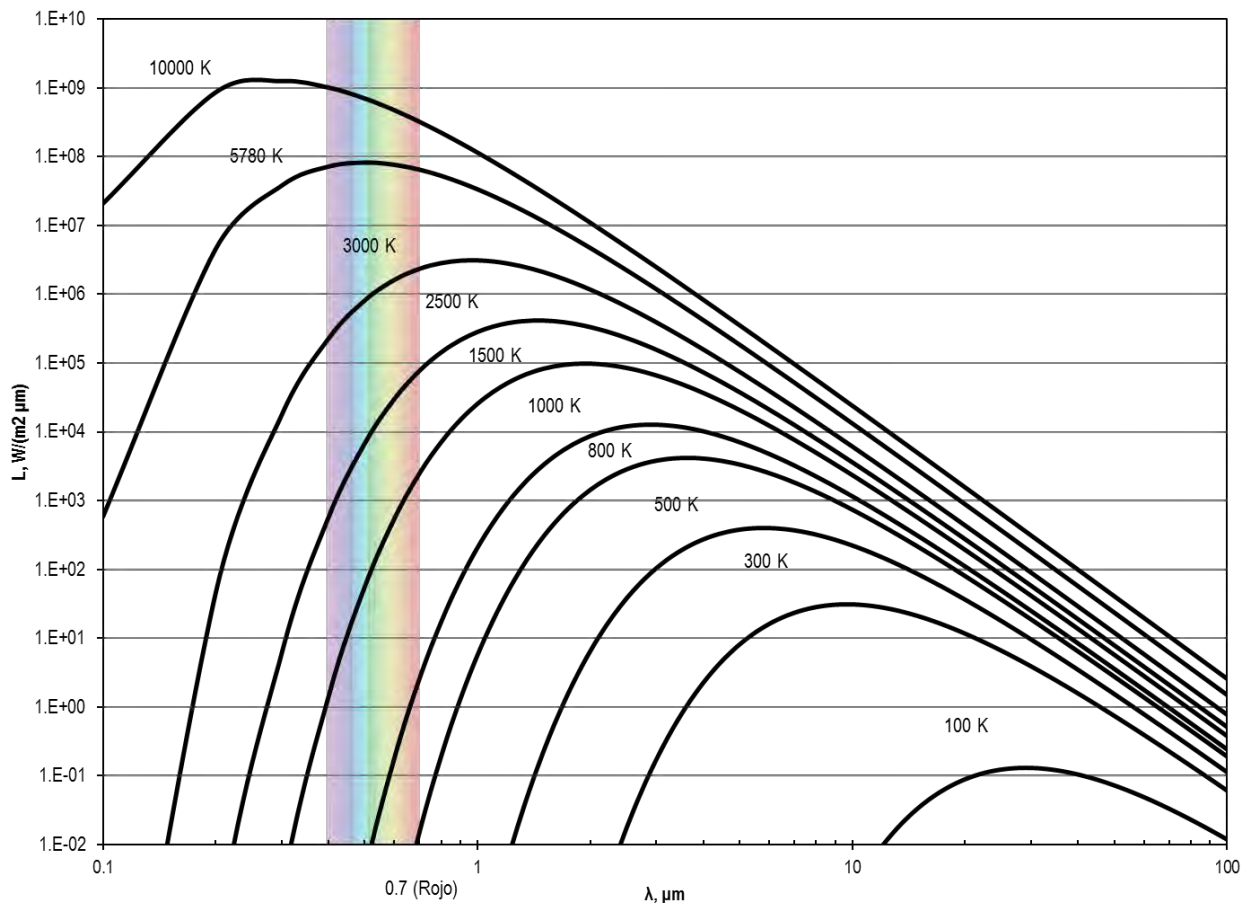


Figura 4. Radiancia espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas

Para hallar la energía total emitida a todas las longitudes de onda la ecuación (1) es integrada para todo el espectro electromagnético, tal como evidencia la ecuación (3).

$$\pi \int_0^{\infty} L(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (3)$$

Donde: $\sigma = 2c_1\pi^5/15c_2^4 = 5.67051 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$

La ecuación (3) es conocida como la ley de Stefan-Boltzmann y σ como la constante de Stefan-Boltzmann.

5.1. Fuentes de radiación

Un termómetro de radiación es un medidor de radiancia calibrado para indicar la temperatura de un cuerpo negro (5). Para la calibración de este tipo de termómetros, se consideran en general dos tipos de fuentes de radiación: Cavidades y Placas planas. Las cavidades son próximas al concepto de un cuerpo negro mientras que las placas planas son asociadas a cuerpos grises. Las cavidades pueden alcanzar emisividades tan altas como 0.999 (4). Las placas planas tienen emisividades más bajas (0.95) y pueden ser usados como cuerpos grises si el rango de longitud de onda es escogido lo suficientemente pequeño y se usa una emisividad fija (3).

Para escoger una u otra fuente de radiación debe tenerse en cuenta que las cavidades producen valores de emisividad más predecibles. Sin embargo las placas planas pueden ser usadas para calibrar termómetros con bajas relaciones D:S (6).



Figura 5. Calibrador infrarrojo de placa plana

El desconocimiento de la emisividad efectiva en las fuentes de placa plana puede ser parcialmente superada realizando una calibración radiométrica a la fuente. Sin embargo la calibración radiométrica debe ser realizada con un instrumento que opera en una banda espectral similar al termómetro bajo calibración (6).

El objetivo de usar una calibración radiométrica es evaluar incertidumbres que no son consideradas en una calibración por contacto. Los dos principales factores son la diferencia entre la temperatura de contacto y la temperatura de la superficie causada por el flujo de calor entre el sensor de referencia y

la superficie del objetivo, y la diferencia entre el ajuste de la emisividad del IBC y la emisividad de la superficie del objetivo (7).

5.2. Modelo matemático

La relación entre la señal del termómetro, $S(T)$, y la temperatura del cuerpo negro, T , está dada por la ecuación (4)

$$S(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda \quad (4)$$

Donde $R(\lambda)$, es la respuesta espectral absoluta del termómetro y $L_b(\lambda, T)$ es la ley de Planck. Para resolver la ecuación (4) diferentes aproximaciones han sido propuestas, sin embargo la más ampliamente usada es la ecuación de Sakuma-Hattori (8) (ecuación (5)).

$$S(T) = \frac{C'}{e^{\left(\frac{c_2}{AT+B}\right)} - 1} \quad (5)$$

Las constantes A, B y C' son determinadas usando la longitud de onda de operación del termómetro (9).

$$A = \lambda_{mean} \left(1 - 6 \frac{s^2}{\lambda_{mean}^2} \right) \quad (6)$$

$$B = \frac{c_2}{2} \frac{s^2}{\lambda_{mean}^2} \quad (7)$$

Donde λ_{mean} es la longitud de onda promedio y s^2 es la varianza de la respuesta espectral relativa. Si la respuesta espectral es simétrica y rectangular, como es usual en los termómetros IR, λ_{mean} es igual a la longitud de onda central y $s = \Delta\lambda/\sqrt{12}$, donde $\Delta\lambda$ es el ancho de banda (10).

Una característica útil de la ecuación de Sakuma Hattori es que no hay necesidad de algún conocimiento de la respuesta espectral del termómetro (11).

La ecuación de medición, incluida la radiación emitida por el objetivo, la radiación desde los alrededores, la radiación reflejada y la radiación emitida por el detector está dada por la ecuación (8)

$$S(T_x) = S(T_p) + \frac{(1-\varepsilon_x)}{\varepsilon_x} [S(T_w) - S(T_d)] + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_x)}{\varepsilon_x} [S(T_p) - S(T_w)] \quad (8)$$

Es una práctica común asumir que la temperatura de la pared T_w será la misma que la temperatura del detector T_d (12))

5.3. Efecto de tamaño del blanco

El efecto del tamaño de la fuente es un fenómeno relacionado con la aberración, difracción, reflexión y dispersión en el sistema óptico de un termómetro IR. Este efecto puede ser minimizado usando un Lyot Stop adecuadamente diseñado y usando lentes acromáticos (13).

Existen dos métodos principales usados para la estimación del SSE. El método directo usa un cuerpo negro como fuente de radiación uniforme y un diafragma. Para cada apertura del diafragma, la señal del termómetro IR se registra. El método indirecto usa una esfera integrada como fuente de radiación y diferentes tamaños de apertura ajustados para bloquear el objetivo del termómetro. La señal en el objetivo bloqueado y la señal fuera del objetivo bloqueado son registradas.

Resultados experimentales muestran que existe diferencia entre los dos métodos. Es recomendable usar el método directo para obtener una curva de SSE más confiable, sin embargo el método indirecto ofrece menores incertidumbres (14).

Para el método directo el SSE está definido según la ecuación (9).

$$\sigma_{SSE}(r) = \frac{S(r,L) - S(L_a)}{S(\infty,L) - S(L_a)} \quad (9)$$

Donde el SSE al radio r está determinado como la relación entre la señal $S(r,L)$ a un radio r y la señal $S(\infty,L)$ a un radio infinito y $S(L_a)$ representa la radiación emitida por el ambiente.

Sin embargo en la práctica es más conveniente determinar el SSE como una función del radio máximo (15).

$$\sigma_{SSE}(r, r_{\max}) = \frac{\sigma_{SSE}(r)}{\sigma_{SSE}(r_{\max})} = \frac{S(r,L) - S(L_a)}{S(r_{\max},L) - S(L_a)} \quad (10)$$

Para termómetros IR con señal no linealizada la ecuación (10) puede expresarse como

$$\sigma_{SSE}(r, r_{\max}) = \frac{L(r,T) - L(T_w)}{L(r_{\max},T) - L(T_w)} \quad (11)$$

Para calcular la radiancia en la ecuación (11) puede usarse el método de la radiancia equivalente (16).

$$L_{\text{equiv}}(\lambda_{\text{equiv}}, T) = \left[e^{\frac{c_2}{\lambda_{\text{equiv}} T}} - 1 \right]^{-1} \quad (12)$$

6. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

6.1. Método de calibración

La calibración se realiza por el método de comparación, midiendo la radiación térmica emitida por el patrón a una distancia determinada. El patrón es un calibrador IR calibrado radiométricamente para una banda espectral de 8 μm a 14 μm y una emisividad de 0.95.

6.2. Equipamiento

Para llevar a cabo la calibración de un termómetro de radiación, es necesario contar con el siguiente equipamiento:

- Calibrador IR
- Regla métrica metálica.
- Termo higrómetro
- Termómetro IR patrón de verificación
- Equipo para la determinación del efecto del tamaño del blanco

Es conveniente que todos los equipos involucrados en el proceso de calibración tengan trazabilidad al SI.

6.3. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales del laboratorio deben cumplir con las especificaciones de operación dadas en los manuales de los equipos empleados, tanto los termómetros patrones y los medios de comparación.

7. OPERACIONES PREVIAS

Aclimatar los equipos bajo calibración y patrones por lo menos 8 horas (17). Esto permite suponer que la temperatura del detector T_d es igual a la temperatura ambiente.

Se deben seguir las instrucciones del fabricante para limpiar los lentes si es necesario. Calibrar primero a bajas temperaturas para evitar algún el riesgo de choque térmico en el IBC (6).

Si es posible ajustar la temperatura reflejada en el IBC a la temperatura ambiental alrededor de la fuente de radiación.

Si se usa una cavidad como patrón, se debe asegurar que el ángulo de incidencia está acorde con el tamaño del blanco del IBC.

Si el punto de calibración es mayor o igual a la temperatura de rocío, se debe asegurar tomar las precauciones necesarias para evitar la condensación del vapor de agua del aire en la placa del patrón.

7.1. Resolución óptica del termómetro bajo calibración

A partir de la resolución óptica del termómetro bajo calibración, se determinan dos distancias de calibración, tales que el spot observado por el termómetro bajo calibración sea menor que el diámetro del target u objetivo del patrón. Para el patrón empleado, el diámetro del target es de 150 mm, sin embargo, use como máximo target 100 mm.

7.2. Respuesta espectral

La respuesta espectral se determina a partir del manual del termómetro bajo calibración, la típica de la mayoría de los instrumentos es de: 8 μm a 14 μm .

7.3. Emisividad del termómetro bajo calibración

Si la emisividad del IBC es diferente que la emisividad del patrón es necesario realizar una corrección por emisividad. Ver numeral 12.

8. PROCESO DE CALIBRACIÓN

Es recomendable seguir el siguiente protocolo para llevar a cabo la calibración de un termómetro de radiación:

- Limpiar la superficie de los lentes de acuerdo a las especificaciones del fabricante.
- Si es posible, ajustar la emisividad del termómetro infrarrojo a la emisividad de la fuente.
- La calibración es realizada desde la temperatura baja hasta el alta.
- Si se tiene 0 °C como uno de los puntos de calibración, realizar una cavidad cilíndrica en el punto de hielo (18), (19).
- Ajustar la primera distancia desde la fuente al termómetro (Punto O Figura 7). Esta puede ser la distancia a la cual la corrección del termómetro es cero o la recomendación del cliente, pero se debe asegurar que el objetivo está dentro de la zona de medición de la fuente. Evitar distancias mayores a 1m para minimizar efectos de absorción atmosférica (20).

- Alinear, usando el láser provisto con el termómetro, en el centro de la fuente.
- Registrar los datos del patrón, IBC y patrón de verificación (de acuerdo a la Figura 6).
- Alinear el termómetro para formar un ángulo de +15° desde la fuente (Punto A Figura 7) y registrar los datos para el IBC.
- Alinear el termómetro para formar un ángulo de -15° desde la fuente (Punto B Figura 7) y registrar los datos para el IBC.
- Alinear el termómetro a una distancia 10 % más cerca de la distancia entre el punto O y la fuente (Punto C Figura 7) y registrar los datos para el IBC.
- Alinear el termómetro a una distancia 10 % más lejos de la distancia entre el punto O y la fuente (Punto D Figura 7) y registrar los datos para el IBC.
- Alinear el termómetro a la segunda distancia (Puede ser el doble o la mitad de la primera) y repetir los últimos 5 pasos.
- Instalar el equipo para la determinación del efecto del tamaño del blanco y ajustar las aperturas de acuerdo con la relación D:S.
- Registrar los datos para cada apertura.

9. TOMA DE DATOS

Se registran las indicaciones de temperatura y emisividad del patrón y el equipo bajo calibración. Deben registrarse también las distancias a las cuales se realizaron las mediciones.

10. TRATAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

Se realizan los cálculos en la hoja de cálculo respectiva. El mensurando en la calibración es la corrección del termómetro bajo calibración, representada por:

$$C = T_p - T_x - C_\epsilon \quad (13)$$

donde C: corrección

T_p : temperatura del patrón.

T_x : temperatura del termómetro.

C_ϵ : corrección por diferencia de emisividad entre la fuente y el termómetro.

11. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los certificados de calibración se elaboran según lo establecido en la norma técnica ISO/IEC 17025 (21). El certificado de calibración debe contener:

11.1. Descripción del termómetro

Ejemplo: Termómetro infrarrojo. Banda espectral: 8 μm to 14 μm . Emisividad: 0.95. Resolución óptica: 30:1. Resolución de display: 0.1 $^{\circ}\text{C}$.

11.2. Descripción del método de calibración

Ejemplo: La calibración se realizó por medición directa de las temperaturas generadas por el patrón. La calibración se realizó radiométricamente para una banda espectral de 8 μm a 14 μm para el patrón. Con una emisividad de 0.95 para el patrón. El diámetro del target asociado para el termómetro fue de 10 mm a una distancia del termómetro al patrón de 300 mm y de 20 mm a una distancia del termómetro al patrón de 600 mm.

12. EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

La incertidumbre de medición se estima de acuerdo con el documento JCGM 100:2008 (22).

12.1. Incertidumbre de medición del sistema patrón

Las fuentes de incertidumbre de medición para el sistema patrón se presentan en la Tabla 2.

La Incertidumbre de medición debida a la uniformidad es calculada como la máxima diferencia de temperatura en los puntos de la Figura 6 (23). La distancia entre los puntos es de 100 mm.

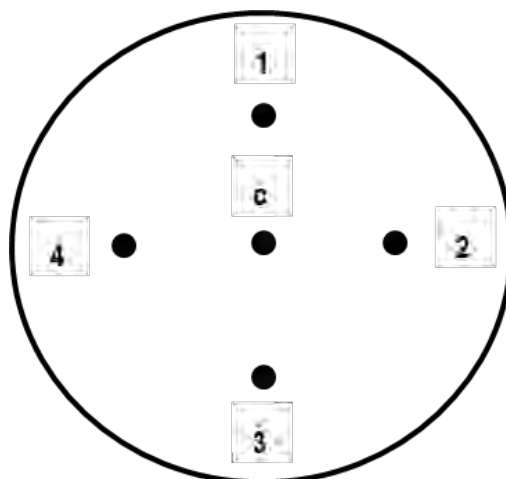


Figura 6. Determinación de uniformidad de la placa

La incertidumbre de medición por calibración de la fuente de radiación debe tomarse de los certificados de calibración. En puntos intermedios debe tomarse la mayor incertidumbre entre los puntos adyacentes.

La incertidumbre de medición debida a la radiación reflejada es calculada usando la ecuación (15) como coeficiente de sensibilidad. La incertidumbre de medición estándar corresponde a la incertidumbre en la determinación de la temperatura de la pared.

$$\frac{\partial S(T_x)}{\partial S(T_w)} = \frac{1 - \epsilon_p}{\epsilon_x} \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_x}{\partial T} = \frac{\partial S(T_x)}{\partial S(T_w)} \frac{\partial S(T_w)}{\partial T} \quad (15)$$

La incertidumbre combinada de medición para el sistema patrón está dada por la ecuación (16)

$$u^2(T_s) = u^2(\delta(T_p)_{rep}) + u^2(\delta T_{unf}) + u^2(\delta(T_p)_{cert}) + u^2(\delta(T_p)_{res}) + u^2(\delta(T_p)_{der}) + \left(\frac{\partial T_x}{\partial T}\right)^2 u^2(\delta T_w) \quad (16)$$

Tabla 2. Presupuesto de incertidumbre de medición para el sistema patrón

Fuente de incertidumbre	Símbolo	Distribución	Incertidumbre estándar	Coficiente de sensibilidad
Repetibilidad de la fuente	$\delta(T_p)_{rep}$	Normal	Desviación estándar de las indicaciones de la fuente	1
Uniformidad de la fuente	δT_{unf}	Rectangular	Máxima diferencia de temperatura en la zona útil de la placa	1
Incertidumbre del calibración de la fuente	$\delta(T_p)_{cert}$	Normal	Incertidumbre del certificado	1
Resolución de la fuente	$\delta(T_p)_{res}$	Rectangular	Resolución sobre $2\sqrt{3}$	1
Deriva fuente	$\delta(T_p)_{der}$	Rectangular	Máxima variación en el histórico de certificados	1
Radiación reflejada	δT_w	Rectangular	Incertidumbre en la determinación de la	Ecuación (15)

Fuente de incertidumbre	Símbolo	Distribución	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad
			temperatura de las paredes	

12.2. Incertidumbre de medición de la corrección

Las fuentes de incertidumbre de medición para la corrección se presentan en la Tabla 3.

La corrección por el tamaño de fuente es estimada por el método directo usando aperturas variables (17). Seleccionar diámetros de apertura de acuerdo a la especificación D:S del IBC. La función SSE (Size of source Effect) es ajustada usando la ecuación (17)

$$\sigma_{SSE} = a(r^n - r_{\max}^n) + 1 \quad (17)$$

Este modelo es especialmente útil para representar datos empíricos para termómetros IR. Las constantes a y n representan la amplitud y el parámetro de forma (24).

La incertidumbre de medición debida al SSE es calculada usando la incertidumbre en el radio de la apertura y considerando la ley de Wien como aproximación para la radiancia (25) (ecuación (18)).

$$u(\sigma_{SSE}) = u(r) \frac{\partial \sigma_{SSE}}{\partial r} \quad (18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \sigma_{SSE}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\lambda T^2}{c_2} \quad (19)$$

La incertidumbre de medición por variación de la distancia entre el termómetro y el patrón se obtiene alejando y acercando 10 % de la distancia de medición el termómetro al patrón (puntos C y D de la Figura 7), se toma el mayor cambio en temperatura de ambas posiciones respecto a la medición a la distancia inicial de medición.

La incertidumbre de medición por alineación se obtiene alineando el termómetro 15 ° en sentido horario y anti-horario desde la alineación central perpendicular (puntos A y B de la Figura 7) se toma el mayor cambio en temperatura de ambas alineaciones respecto a la orientación inicial.

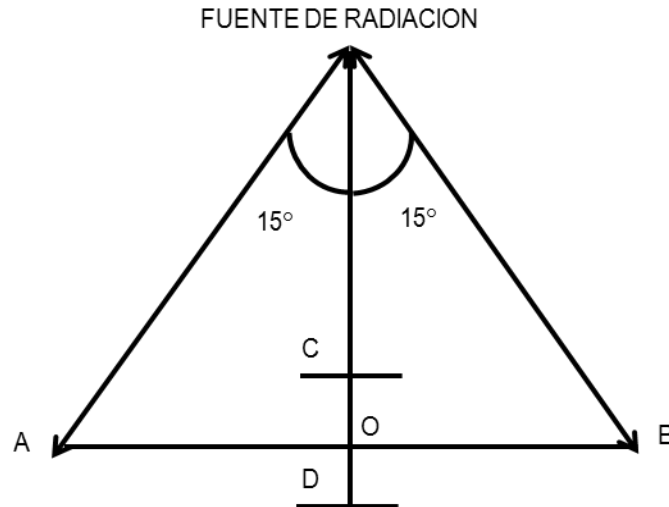


Figura 7. Determinación de incertidumbre por variación de distancia y alineación

La incertidumbre de medición relativa expandida debida a la absorción atmosférica para distancias menores a 1 m en el peor caso es 0.0006 ($\kappa=2$) (20). El coeficiente de sensibilidad se calcula según la ecuación (20)

$$\frac{\partial T_x}{\partial S_{aa}} = \frac{S}{\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)} \quad (20)$$

La corrección por emisividad está definida como:

$$C_\epsilon = T_{exp} - T_p \quad (21)$$

Donde T_{exp} es la temperatura esperada desde una señal $S(T_{exp})$. T_{exp} es obtenida usando la inversa de la ecuación (5).

La incertidumbre de medición debida a la emisividad es tomada de valores tabulados, los cuales son alrededor de ± 0.02 (20). El coeficiente de sensibilidad está dado por:

$$\frac{\partial S(T_x)}{\partial \epsilon_p} = \frac{1}{\epsilon_x} (S(T_p) - S(T_w)) \quad (22)$$

$$\frac{\partial T_x}{\partial \varepsilon_p} = \frac{\frac{\partial S(T_x)}{\partial \varepsilon_s}}{\frac{\partial S(T_x)}{\partial T}} \quad (23)$$

La incertidumbre combinada de medición para la corrección está dada por:

$$u^2(C) = \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma_{SSE}}\right)^2 u^2(\sigma_{SSE}) + u^2(\delta(T_x)_{rep}) + u^2(\delta(T_x)_{res}) + u^2(\delta(T_x)_{vd}) + u^2(\delta(T_x)_{va}) + \left(\frac{\partial T_x}{\partial S_{aa}}\right)^2 \left(\frac{u(S_{aa})}{S}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_x}{\partial \varepsilon_p}\right)^2 (u^2(\varepsilon_p)) \quad (24)$$

Tabla 3. Presupuesto de incertidumbre de medición para la corrección

Fuente de incertidumbre	Símbolo	Distribución	Incertidumbre típica	Coficiente de sensibilidad
Tamaño de la fuente, SSE	$\delta\sigma_{SSE}$	Rectangular	Ecuación	Ecuación (19)
Repetibilidad del Termómetro bajo calibración	$\delta(T_x)_{rep}$	Normal	Desviación estándar del termómetro bajo calibración	-1
Resolución del IBC	$\delta(T_x)_{res}$	Rectangular	Resolución sobre $2\sqrt{3}$	-1
Variación de distancia	$\delta(T_x)_{vd}$	Rectangular	Máxima diferencia entre los valores de la prueba de variación de distancia	-1
Alineación	$\delta(T_x)_{va}$	Rectangular	Máxima diferencia entre los valores de la prueba de alineación	-1
Absorción Atmosférica	S_{aa}	Rectangular	0.0003	Ecuación (20)
Emisividad	ε	Normal	0.01	Ecuación (23)

En el Anexo 1 se tiene un ejemplo de presupuesto de incertidumbre de medición.

13. REFERENCIAS

1. *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*. **Preston-Thomas, H.** 1, 1990, Metrologia, Vol. 27, págs. 3-10. 0026-1394.
2. **JCGM 200:2012**. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. 3rd 2008 version with minor corrections. s.l. : BIPM, 2012.
3. **Cardenas/García, D.** Calibración de calibradores planos para termómetros de radiación Nota técnica. Ciudad de México : Centro Nacional de Metrología, 2011.
4. **Siegel, R. y Howell, J. R.** *Thermal Radiation Heat Transfer*. 1992.
5. **DeWitt, D. P. y Nutter, G. D.** *Theory and Practice of Radiation Thermometry*. s.l. : Wiley, 1988.
6. *E2847 Standard Test Method for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Thermometers*. **ASTM**. West Conshohocken : s.n.
7. *Infrared Calibration Development at Fluke Corporation Hart Scientific Division*. **Liebmann, F.** 2008, SPIE Defense and Security Symposium, pág. 693906.
8. *Temperature: Its measurement and control in science and industry*. **F. Sakuma, S. Hattori, and J. F. Schooley,** 1982, JF Sch. AIP, págs. 421–427.
9. *MSL Technical Guide 22. Calibration of Low-Temperature Infrared Thermometers*. **Saunders, P.** 2019.
10. *Physical basis of interpolation equations for radiation thermometry*. **Saunders, P. y White, D. R.** 4, 2003, Metrologia, Vol. 40, págs. 195-203.
11. *Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver Point*. **Fisher, J. y al., et.** 2008.
12. *Calibration and use of low-temperature direct-reading radiation thermometers*. **Saunders, P.** 2, 2008, Meas. Sci. Technol., Vol. 20, pág. 25104.
13. *Methods to reduce the size-of-source effect in radiometers*. **Yoon, H. W., Allen, D. W. y Saunders, R. D.** 2, 2005, Metrologia, Vol. 42, pág. 89.
14. *A comparative study of size of source effect (SSE) determination techniques*. **Machin, G. y Sergienko, R.** 2001, Proc. Tempmeko, Vol. 1, págs. 155-160.
15. *System for the determination of the size-of-source effect of radiation thermometers with the direct reading of temperature*. **Pusnik, I., Grgic, G. y Drnovsek, J.** 6, 2006, Meas. Sci. Technol, Vol. 17, págs. 1330-1336.
16. *Size-of-source effect and temperature uncertainty: II-low temperature systems*. **Machin, G. y Ibrahim, M.** 1999, Proc. TEMPMEKO, págs. 687-692.
17. **American Association for Testing and Materials.** ASTM E1256 Standard Test Methods for Radiation Thermometers (Single Waveband Type). West Conshohocken : ASTM, 2015.
18. *Simple ice reference point for IR-radiation thermometers*. **Ivarson, J. y Falk, R.** Torino : s.n., 1996, TEMPMEKO '96, 6th International Symp. on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, págs. 317-320.
19. *MSL Technical Guide 2. Infrared Thermometry Ice Point*. **Bart, M., Saunders, P. y D.R.W.** Lower Hutt 5040 : s.n., 2017.
20. *Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point*. **Saunders, P., Fischer, J. y Sadli, M.** 3, 2008, Int. J. Thermophys., Vol. 29, págs. 1066–1083.
21. *17025 "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración"*. **ISO/IEC.** 2017.

22. **JCGM 100:2008**. *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement: GUM 1995 with minor corrections*. First. s.l. : BIPM, 1995. JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections. .
23. *Estudio comparativo de métodos para la determinación de la uniformidad en calibradores infrarrojos de placa plana*. **Carvajal, Sergio y Sánchez, Ciro**. 2016.
24. *Analytical representations of the size-of-source effect*. **Bloembergen, P.** 5, 2009, Metrologia, Vol. 46, págs. 534-543.
25. *Calculated Uncertainty of Temperature Due to the Size-of-Source Effect in Commercial Radiation Thermometers*. **Pusnik, I. y Grgic, G.** 1, International Journal of Thermophysics : s.n., 2008, Vol. 29, págs. 322-329.

14. ANEXOS

Anexo 1. Calibración de un termómetro infrarrojo a 100 °C

Anexo 2. Presupuesto de Incertidumbre de medición a 50 °C, 100 °C, 200 °C y 300 °C.

ANEXO 1. CALIBRACIÓN DE UN TERMÓMETRO INFRARROJO A 100 °C

Datos del termómetro infrarrojo:

- ✓ Emisividad: 0.95
- ✓ Banda espectral: 8 μm a 14 μm
- ✓ D:S . 30:1
- ✓ Resolución: 0.1 °C
- ✓ Distancia de calibración: 300 mm
- ✓ Spot: 10 mm

Patrón: IR CALIBRATOR., Emisividad: 0.95. Banda espectral: 8 μm a 14 μm .

FUENTES DE INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

Incetidumbre de medición del patrón se toma del certificado de calibración

$$u(\delta(T_P)_{cert}) = 1.48 \text{ }^\circ\text{C}$$

Incetidumbre de medición por resolución del patrón

$$u(\delta(T_P)_{res}) = 0.005 \text{ }^\circ\text{C}$$

Incetidumbre de medición por repetibilidad de las lecturas del patrón

$$u(\delta(T_P)_{rep}) = 0.013 \text{ }^\circ\text{C}$$

Incetidumbre de medición por uniformidad del patrón es determinada midiendo con un termómetro infrarrojo ajustado a la emisividad de la fuente y banda espectral de 8 μm a 14 μm en los puntos c, 1, 2, 3, 4 de la Figura 6 se toma el mayor cambio en temperaturas de los puntos 1 a 4 con respecto al punto c.

$$u(\delta T_{UNF}) = 0.30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Incetidumbre de medición debida a la deriva del patrón

$$u(\delta(T_P)_{der}) = 0.49 \text{ }^\circ\text{C}$$

Incetidumbre de medición debida a la radiación reflejada

$$u(\delta T_w) = 1.60 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tabla 4. Ejemplo de presupuesto de incertidumbre de medición para la calibración de un termómetro infrarrojo a 100 °C: temperatura de la fuente

Fuente de incertidumbre	Valor estimado	Tipo	Distribución	Incertidumbre	factor	Incertidumbre estándar	grados de libertad	C _i	contribución a incertidumbre	Porcentaje					
Repetibilidad de la fuente	100.00	°C	A	N	0.01	°C	3.00	0.004	°C	8	1.0	-	0.004	°C	0.4
Uniformidad de la fuente	0.00	°C	B	R	0.30	°C	1.73	0.173	°C	∞	1.0	-	0.173	°C	14.0
Incertidumbre de calibración de la fuente	-0.37	°C	B	N	1.48	°C	2.00	0.740	°C	200	1.0	-	0.740	°C	60.0
Resolución de la fuente	0.00	°C	B	R	0.01	°C	1.73	0.003	°C	∞	1.0	-	0.003	°C	0.2
Deriva de la fuente	0.00	°C	B	R	0.49	°C	1.73	0.286	°C	∞	1.0	-	0.286	°C	23.2
Radiación reflejada	0.00	°C	A	N	1.60	°C	1.73	0.924	°C	∞	0.03	-	0.028	°C	2.3
Temperatura de la fuente	99.63	°C	A	N	1.6	°C	1.97	0.812	°C	291					100.0

Incertidumbre de medición por SSE

$$u(\delta(t_x)_{SSE}) = 0.0027/\sqrt{3} = 0.0016^\circ\text{C}$$

Incertidumbre de medición por resolución del termómetro bajo calibración

$$u(\delta(T_P)_{res}) = 0.05/\sqrt{3} = 0.029^\circ\text{C}$$

Incertidumbre de medición por repetibilidad de las lecturas del termómetro bajo calibración

$$u(\delta(T_P)_{rep}) = 0.05/\sqrt{9} = 0.017^\circ\text{C}$$

Incertidumbre de medición por variación de distancia se toma el mayor cambio en temperatura de las posiciones C y D (Figura 7) respecto a la medición a la distancia inicial de medición.

$$u(\delta(t_x)_{vd}) = 0.23/\sqrt{3} = 0.13^\circ\text{C}$$

Incertidumbre de medición por alineación se toma el mayor cambio en temperatura en las posiciones A y B (Figura 7) respecto a la orientación inicial

$$u(\delta(t_x)_{vd}) = 0.23/\sqrt{3} = 0.13^\circ\text{C}$$

Incertidumbre de medición relativa típica debida a la absorción atmosférica es 0.0006

$$u(S_{aa})/S = 0.0006/\sqrt{3}=0.00035$$

Incertidumbre de medición relativa típica debida a la emisividad es 0.02

$$u(\epsilon_P) = 0.02/2 = 0.01$$

Tabla 5. Ejemplo de presupuesto de incertidumbre de medición para la calibración de un termómetro infrarrojo a 100 °C: corrección

Fuente de incertidumbre	Valor estimado		Tipo	Distribución	Incertidumbre		factor	Incertidumbre estándar		grados de libertad	C _i		contribución a incertidumbre		Porcentaje
Tamaño de la fuente ,SSE	0.00	°C	B	R	0.0027	-	1.73	0.0016	-	∞	-1.0	°C	-0.002	°C	0.1
Repetibilidad del IBC	98.83	°C	A	N	0.05	°C	3.00	0.017	°C	8	-1.0	-	-0.017	°C	1.5
Resolución	0.00	°C	B	R	0.05	°C	1.73	0.029	°C	∞	-1.0	-	-0.029	°C	2.6
Variación de distancia	0.00	°C	A	R	0.23	°C	1.73	0.13	°C	∞	-1.0	-	-0.130	°C	11.5
Alineación	0.00	°C	A	R	0.23	°C	1.73	0.13	°C	∞	-1.0	-	-0.130	°C	11.5
Absorción atmosférica	0.00	°C	A	N	0.0006	°C	1.73	$\frac{0.0003}{5}$	°C	∞	-1.0	-	-0.00035	°C	0.0
Temperatura de la fuente	99.63	°C	B	R	1.60	°C	1.97	0.812	°C	291	1.0	°C	0.812	°C	71.9
Emisividad	0.00	°C	B	N	0.02	-	2.00	0.01	°C	200	1.0	°C	0.010	°C	0.9
Corrección	0.8	°C	A	N	1.7	°C	2.01	0.83	°C	323					100.0

Se expresa el resultado de medición de la siguiente forma:

DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO BAJO CALIBRACIÓN

Termómetro infrarrojo. Respuesta espectral de 8 μm a 14 μm Emisividad: 0.95. Resolución óptica: 30:1. Resolución de display: 0.1 °C.

MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó por medición directa de las temperaturas generadas por el patrón. La calibración se realizó radiométricamente para una banda espectral de 8 μm a 14 μm y una emisividad de 0,95 para el patrón. El diámetro del target asociado para el termómetro fue de 10 mm a una distancia del termómetro al patrón de 300 mm.

Tabla 6. Ejemplo de tabla de resultado para la calibración de un termómetro infrarrojo a 100 °C

Temperatura, °C	Corrección, °C	K	Incertidumbre de medición, °C
98.8	0.8	2.01	\pm 1.7

ANEXO 2. PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

Tabla 7. Incertidumbre de medición del sistema patrón

Fuente de incertidumbre de medición	Temperatura			
	50 °C	100 °C	200 °C	300 °C
	°C			
Repetibilidad del patrón	3.9×10^{-03}	4.4×10^{-03}	2.2×10^{-03}	1.9×10^{-02}
Uniformidad del patrón	5.8×10^{-02}	1.7×10^{-01}	4.0×10^{-01}	5.1×10^{-01}
Incertidumbre del calibración del patrón	7.4×10^{-01}	7.4×10^{-01}	7.4×10^{-01}	7.4×10^{-01}
Resolución del patrón	2.9×10^{-03}	2.9×10^{-03}	2.9×10^{-03}	2.9×10^{-03}
Deriva del patrón	2.1×10^{-01}	2.9×10^{-01}	4.4×10^{-01}	6.0×10^{-01}
Radiación reflejada	3.9×10^{-02}	2.8×10^{-02}	1.9×10^{-02}	1.5×10^{-02}
<i>u</i>	7.7×10^{-01}	8.1×10^{-01}	9.5×10^{-01}	1.1×10^0
<i>U</i> (<i>k</i> =1.96)	1.5×10^0	1.6×10^0	1.9×10^0	2.1×10^0

Tabla 8. Incertidumbre de medición del IBC

Fuente de incertidumbre de medición	Temperatura			
	50 °C	100 °C	200 °C	300 °C
	°C			
Tamaño de la fuente / SSE	1.1×10^{-01}	1.2×10^{-01}	1.1×10^{-01}	1.4×10^{-01}
Repetibilidad del IBC	2.8×10^{-02}	1.7×10^{-02}	1.1×10^{-02}	3.3×10^{-02}
Resolución del IBC	2.9×10^{-02}	2.9×10^{-02}	2.9×10^{-02}	2.9×10^{-02}
Variación de distancia del IBC	7.1×10^{-02}	1.3×10^{-01}	1.5×10^{-01}	1.5×10^{-01}
Alineación del IBC	7.1×10^{-02}	1.3×10^{-01}	5.8×10^{-02}	3.8×10^{-02}
Absorción atmosférica	2.6×10^{-02}	3.4×10^{-02}	5.2×10^{-02}	7.3×10^{-02}
Temperatura del patrón	7.7×10^{-01}	8.1×10^{-01}	9.5×10^{-01}	1.1×10^0
Emisividad	2.6×10^{-01}	6.5×10^{-01}	1.3×10^0	2.0×10^0
<i>u</i>	8.3×10^{-01}	1.1×10^0	1.6×10^0	2.3×10^0
<i>U</i> (<i>k</i> =1.96)	1.6×10^0	2.1×10^0	3.2×10^0	4.5×10^0



**MINISTERIO DE COMERCIO,
INDUSTRIA Y TURISMO**

GUÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE

TERMÓMETROS DE RADIACIÓN

ISBN e-Book: 978-958-53642-6-4

**Subdirección de
METROLOGÍA FÍSICA**

Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM

Subdirección de Metrología Física
Red Colombiana de Metrología
Av. Cra 50 No 26-55 Int. 2 CAN - Bogotá, D.C. Colombia
Conmutador: (57 601) 254 22 22
E-mail: contacto@inm.gov.co
www.inm.gov.co

Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC

Av. Calle 26 # 57 – 83, Torre 8, Oficina 1001 - Bogotá, D.C. Colombia
PBX: (57 601) 742 7592
E-mail: onac@onac.org.co
www.onac.org.co

