

**TERMÓMETROS DE RADIACIÓN Y SU
APLICACIÓN PARA LA MEDICIÓN
DE LA TEMPERATURA CORPORAL**

Bogotá - 2022



www.inm.gov.co



INMdeColombia



Esta guía se logró gracias al proyecto ColombiaMide “Calidad para la competitividad- Reduciendo las brechas de calidad en Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (Mipymes) en regiones de Colombia”.

Participan:



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

39 páginas.

Incluye referencias bibliográficas, tablas y fotos

ISBN e-Book: 978-958-53805-5-4

1. Termómetros de radiación y la medición de temperatura corporal 2. Fuentes de radiación 3. Modelo matemático 4. Efecto de tamaño de la fuente 5. Descripción de equipamiento 6. Condiciones ambientales 7. Método de calibración, ensayo y/o medición 8. Operaciones previas 9. Resolución óptica del termómetro bajo calibración 10. Respuesta espectral 11. Emisividad del termómetro bajo calibración 12. Proceso de calibración y/o medición 13. Interpretación de resultados 14. Estimación de la incertidumbre de medición 15. Incertidumbre de medición del sistema de calibración 16. Incertidumbre de medición de la corrección (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 fue elaborada en el marco del proyecto ColombiaMide “Calidad para la competitividad – Reduciendo las brechas de calidad en Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (Mipymes) en regiones de Colombia” (ColombiaMide). Este es un proyecto de cooperación entre la Unión Europea (UE) y el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (Mincomercio), orientado a mejorar las capacidades metrológicas y de calidad en Mipymes de las cadenas de valor del aguacate Hass y del Cacao y sus derivados. ColombiaMide es implementado por el Instituto Alemán de Metrología (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB), con el apoyo del Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM) y el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) como beneficiarios. El objetivo principal del proyecto es el de mejorar las competencias técnicas y metrológicas de entidades públicas y privadas (Mipymes), con el propósito de incrementar el nivel de cumplimiento de normas y reglamentaciones técnicas asociadas al comercio sostenible

Fecha de recepción: 26 de diciembre de 2021.

Fecha de evaluación: 13 de diciembre de 2021.

Fecha de aceptación: 30 de diciembre de 2021.

Preparación editorial

U.A.E. Instituto Nacional De Metrología

(978-958-53642)

Edición:

Instituto Nacional de Metrología - INM.

Proyecto ColombiaMide

“Calidad para la competitividad – Reduciendo las brechas de calidad en Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (Mipymes) en regiones de Colombia”

Corrección de estilo:

Instituto Nacional de Metrología - INM.

Proyecto ColombiaMide

“Calidad para la competitividad – Reduciendo las brechas de calidad en Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (Mipymes) en regiones de Colombia”

Laboratorios de calibración.

Diagramación:

Proyecto ColombiaMide

“Calidad para la competitividad – Reduciendo las brechas de calidad en Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (Mipymes) en regiones de Colombia”

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., Monroy Garzón, J. A. & Bohórquez Garzón, A. J. (2022). Guía para la calibración de termómetros de radiación y su aplicación para la medición de la temperatura corporal. Instituto Nacional de Metrología.

Publicado en Bogotá, Colombia, julio de 2022.

CONTENIDO

1. OBJETIVO.....	5
2. ALCANCE	5
3. ABREVIATURAS O SÍMBOLOS.....	5
4. DEFINICIONES	6
5. LINEAMIENTOS GENERALES	8
5.1 TERMOMETROS DE RADIACIÓN Y LA MEDICION DE TEMPERATURA CORPORAL.....	11
5.2 FUENTES DE RADIACION.....	12
5.3 MODELO MATEMÁTICO.....	13
5.4 EFECTO DE TAMAÑO DE LA FUENTE	14
6. DESCRIPCIÓN DE EQUIPAMIENTO.....	15
7. CONDICIONES AMBIENTALES	16
8. MÉTODO DE CALIBRACIÓN, ENSAYO Y/O MEDICION	16
9. OPERACIONES PREVIAS	16
10. RESOLUCIÓN ÓPTICA DEL TERMÓMETRO BAJO CALIBRACIÓN.....	16
11. RESPUESTA ESPECTRAL	17
12. EMISIVIDAD DEL TERMÓMETRO BAJO CALIBRACIÓN.....	17
13. PROCESO DE CALIBRACIÓN Y/O MEDICIÓN	17
14. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	18
15. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN.....	20
16. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN.....	20
17. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN DE LA CORRECCIÓN	29
18. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
19. ANEXOS.....	34

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 profesional 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 y su aplicación para la medición de la temperatura corporal.

2. ALCANCE

Esta guía aplica a los termómetros de radiación y presenta un ejemplo de su aplicación en la medición de la temperatura corporal. Como patrón de calibración se usan calibradores infrarrojos de placa plana o de cavidad.

3. ABREVIATURAS O SÍMBOLOS

ABREVIATURAS	SIGNIFICADO
IR	Infrarrojo
IBC	Instrumento bajo calibración
D:S	Proporción entre el diámetro y longitud de operación de un termómetro IR
SSE	Efecto de tamaño de blanco
SPRT	Termómetro estándar de resistencia de platino
RT	Termómetro de radiación

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
λ	Longitud de onda
L	Radiancia
c_1	Constante en la Ley de Radiación de Planck
c_2	Constante en la Ley de Radiación de Planck
c_3	Constante en la Ley de Wien
T	Temperatura
i	Intensidad de radiación
ϵ	Emisividad
h	Constante de Planck
c_0	Velocidad de la luz en el vacío
k_B	Constante de Boltzmann
σ	Constante de Stefan- Boltzmann
σ_{SSE}	Efecto de tamaño de blanco
S	Señal emitida por el termómetro

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
R	Respuesta espectral absoluta
A	Constante ecuación de Sakuma-Hattori
B	Constante ecuación de Sakuma-Hattori
C'	Constante ecuación de Sakuma-Hattori
r	Radio
k	Conductividad térmica
s	Desviación estándar
a	Amplitud en ecuación de SSE
n	Parámetro de forma en ecuación SSE
U	Incertidumbre expandida
u	Incertidumbre típica
C	Corrección
κ	Factor de cobertura

SUBINDICE	SIGNIFICADO
m	Magnitud medida
der	Deriva
$cert$	Certificado
res	Resolución
bb	Cuerpo negro
fp	Calibrador de Placa plana
$mean$	Promedio
REF	Referencia
IBC	Instrumento bajo calibración
P	Patrón
unf	Uniformidad
est	Estabilidad
int	Interpolación
rep	Repetibilidad
d	Detector
w	Pared
$equiv$	Equivalente
aa	Absorción atmosférica
amb	Ambiente
ind	Indicador

4. DEFINICIONES

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 m.

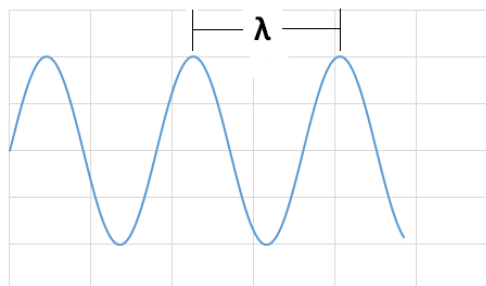


FIGURA 1. LONGITUD DE ONDA

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 , $[L] = W.sr^{-1}.m^{-2}$. La radiancia espectral es la radiancia por unidad de longitud de onda, se la nota como $L(\lambda)$, sus unidades son $[L(\lambda)] = W.sr^{-1}.m^{-3}$.

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 con la ley de radiación de Planck.

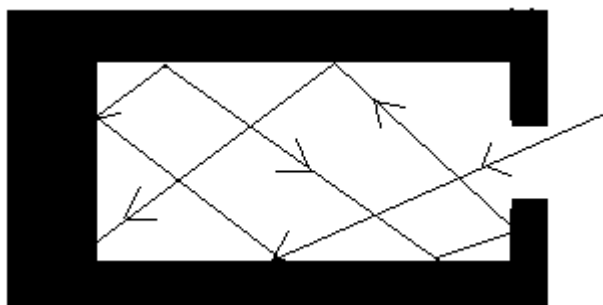


FIGURA 2. CAVIDAD QUE ACTÚA COMO CUERPO NEGRO

CUERPO GRIS: Un cuerpo en el cual la emisividad espectral no depende de la longitud de onda [1].

CUERPO DIFUSO: Un cuerpo en el cual la emisividad direccional no depende de la dirección [1].

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 [1].

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: Medidor de radiancia calibrado para indicar la temperatura de un cuerpo negro [2].

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.

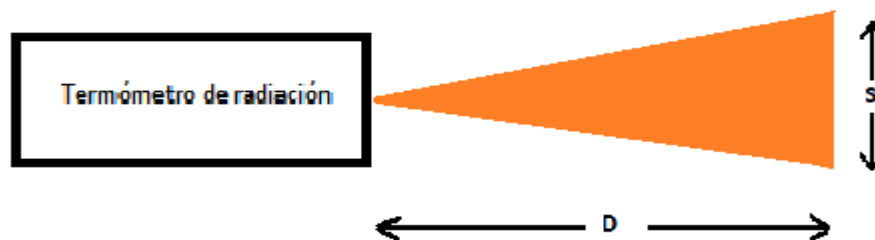


FIGURA 3. ÁNGULO DE MEDICIÓN EN UN TERMÓMETRO IR.

5. LINEAMIENTOS GENERALES

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 1000 μm . Incluye algo del ultravioleta, el visible y la región infrarroja del espectro [2]. 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. [1].

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) [1]. 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.

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:

$$L_{bb}(\lambda, T) = \pi i_{bb}(\lambda, T) = \frac{2\pi c_1}{\lambda^5 \left[e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1 \right]} \quad (1)$$

donde,

$$c_1 = hc_0^2 = 0.595522 \times 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/(\text{m}^2\cdot\text{sr}), \text{ y}$$

$$c_2 = \frac{hc_0}{k_B} = 14387.7688 \mu\text{m}\cdot\text{K}$$

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, otras 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 [1].

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.

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

donde,

$$c_3 = 2897.772 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

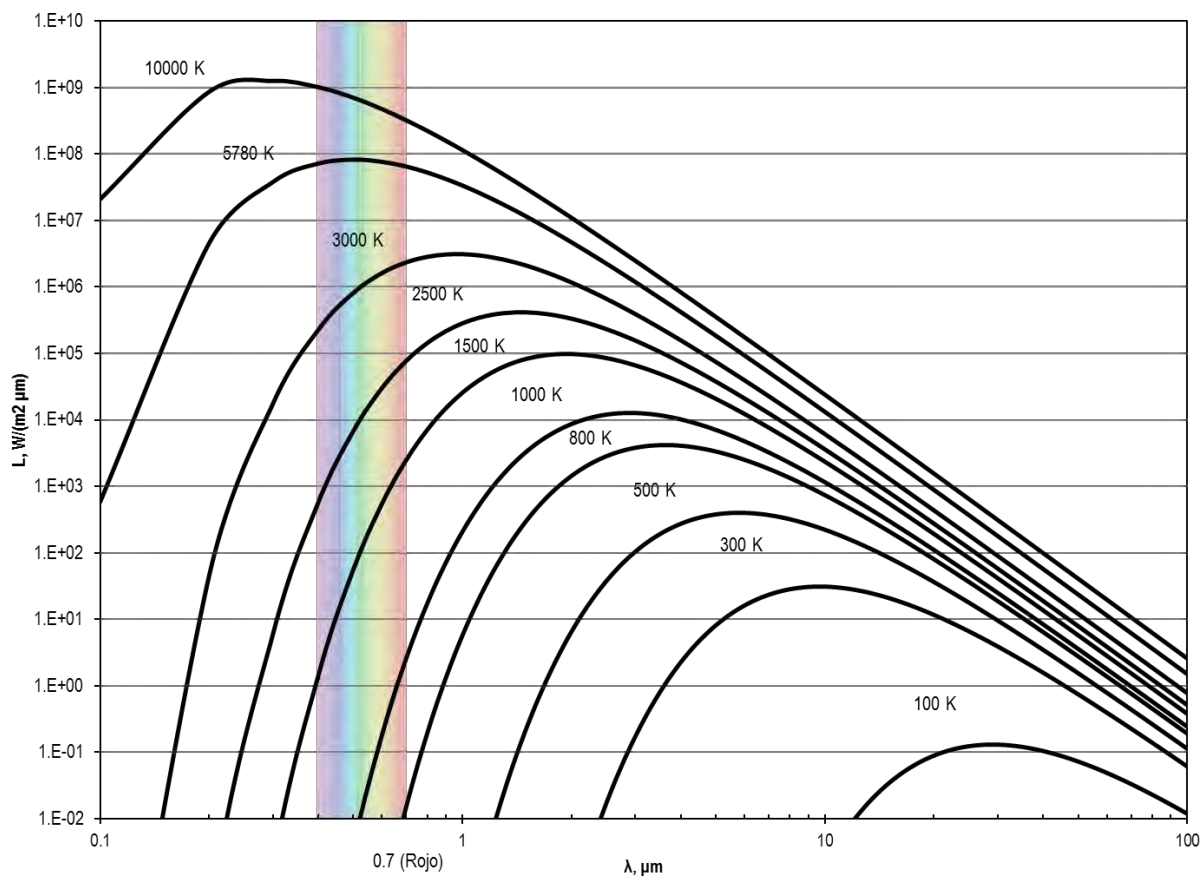


FIGURA 4. RADIANCIA ESPECTRAL DE UN CUERPO NEGRO A DIFERENTES TEMPERATURAS

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

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

donde: $\sigma = 2c_1\pi^5/15c_2^4 = 5.670367 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$

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

5.1 TERMOMETROS DE RADIACIÓN Y LA MEDICION DE TEMPERATURA CORPORAL

Los termómetros de radiación, de no contacto o infrarrojos, como son conocidos generalmente, son instrumentos de medición que permiten determinar la temperatura superficial de un objeto. Su principio de funcionamiento se basa en la detección de la energía emitida en forma de calor por un objeto. Esta energía se presenta como radiación térmica y es producida por cualquier cuerpo que tenga una temperatura mayor a 0 K, esto significa que todo cuerpo con una temperatura asociada siempre está emitiendo radiación térmica de manera natural. Debido a que la radiación térmica se da principalmente en la región infrarroja del espectro electromagnético es común que se le denomine radiación infrarroja. Sin embargo, a temperaturas altas ($\sim 727 \text{ }^\circ\text{C}$) es posible que esta radiación se perciba en la región visible del espectro.

Para detectar esta energía los termómetros disponen de un sistema óptico y de detección que les permite cuantificar la radiación térmica proveniente de una superficie y convertirla en señales eléctricas que se pueden relacionar con la temperatura.

En el proceso de medición, el termómetro no emite ningún tipo de radiación, lo que hace es detectar el calor producido por un objeto. Esto hace que su uso sea completamente seguro tanto para los seres vivos como para los objetos a medir, de hecho, uno de los grandes beneficios de esta tecnología de medición es que no necesita tener contacto con el objeto, lo que la hace ideal cuando se necesita inocuidad y minimizar la interacción con la medición.

Como se mencionó anteriormente, este tipo de termómetros requiere de un sistema óptico, el cual le permite delimitar el área en la cual se va a detectar la radiación. Para identificar esta área de medición generalmente se usa un láser aunque este no interactúe en la determinación de la temperatura. Debido a la presencia de este laser erróneamente se usan los términos “termómetros laser” para referirse a

los termómetros de no contacto. Estos términos deben evitarse ya que sugieren que el láser tiene que ver con el principio de medición.

En el caso de aplicaciones clínicas, un termómetro de radiación se puede ajustar a una emisividad cercana a la de la piel (entre 0.97 y 0.99 [3], [4], 5]) y usarse para medir la temperatura superficial del cuerpo. Para propósitos de la guía se toma el valor de 0.98 como el valor de emisividad de la piel de la frente.

La temperatura superficial no puede asociarse independientemente a la temperatura corporal, ya que esta depende entre otras variables de las condiciones ambientales [6]. Desde el punto de vista de la medición también se presentan fuertes limitaciones relacionadas con el conocimiento de las especificaciones de los termómetros de radiación usados en el ámbito clínico y su posibilidad de configuración durante la calibración, lo que conlleva a incrementar significativamente la incertidumbre de medición que se puede obtener en el laboratorio [7], y con la medición de la temperatura corporal de una persona o en pacientes [8]. Estos aspectos han derivado en que no se recomiende el uso de termómetros de frente o cámaras termográficas para diagnóstico de fiebre¹.

5.2 FUENTES DE RADIACION

Un termómetro de radiación es un medidor de radiancia calibrado para indicar la temperatura de un cuerpo negro [2]. 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 o mayores [9]. Las placas planas tienen emisividades más bajas (generalmente 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 [10].

Para escoger una u otra fuente de radiación debe tenerse en cuenta que las cavidades producen valores de emisividad mas predecibles. Sin embargo, las placas planas pueden ser usadas para calibrar termómetros con bajas relaciones D:S [11].

¹ INM/GTM-T/04 Buenas prácticas de medición en el uso de termómetros de radiación para la determinación de la temperatura corporal – 2021.



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 [11]

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 [12].

5.3 MODELO MATEMÁTICO

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

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

Donde $R(\lambda)$ es la respuesta espectral absoluta del termómetro y $L_{bb}(\lambda, T)$ es la ley de Planck. Para resolver la ecuación (4) se han propuesto diferentes aproximaciones, sin embargo, la más usada es la ecuación de Sakuma-Hattori [13]:

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

Las constantes A , B y C' son determinadas usando la longitud de onda de operación del termómetro [14].

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

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

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 [15].

Una característica útil de la ecuación de Sakuma Hattori es que no hay necesidad de un conocimiento detallado de la respuesta espectral del termómetro [16]

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) [11]:

$$S(T_m) = S(T_s) + \frac{(1 - \varepsilon_{RT})}{\varepsilon_{RT}} [S(T_b) - S(T_d)] + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{RT})}{\varepsilon_{RT}} [S(T_s) - S(T_b)] \quad (8)$$

La ecuación (8) es válida si la fuente de radiación se comporta como un cuerpo gris [17].

5.4 EFECTO DE TAMAÑO DE LA FUENTE

El efecto del tamaño de la fuente, (SSE, por su abreviatura en inglés), 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 [18].

Existen dos métodos principales usados para la estimación del SSE. En el método directo se usa un 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 integradora como fuente de radiación y diferentes tamaños de apertura ajustados para bloquear el objetivo del termómetro. Se registran la señal en el objetivo bloqueado y la señal fuera del objetivo bloqueado.

Los 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 valores de incertidumbre de medición [19].

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

$$\sigma_{SSE}(r) = \frac{S(d, T) - S(T_a)}{S(\infty, T) - S(T_a)} \quad (9)$$

Donde el SSE a la apertura d está determinado como la relación entre la señal $S(d, T)$ a una apertura d y la señal $S(\infty, T)$ a una apertura infinita y $S(T_a)$ representa la radiación emitida por el ambiente.

Sin embargo, en la práctica es más conveniente determinar el SSE como una función de la apertura máxima [20]

$$\sigma_{SSE}(d, d_{max}) = \frac{\sigma_{SSE}(d)}{\sigma_{SSE}(d_{max})} = \frac{S(d, T) - S(T_a)}{S(d_{max}, T) - S(T_a)} \quad (10)$$

Si no es posible obtener la señal no linealizada del termómetro de radiación, las señales se pueden estimar usando la ecuación de Sakuma-Hattori [21].

6. DESCRIPCIÓN DE EQUIPAMIENTO

- Calibradores de placa plana
- Cavidades de cuerpo negro
- Hornos
- Baños líquidos
- SPRTs
- Termómetro de radiación de referencia
- Regla métrica metálica.
- Termohigrómetro.

7. CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones ambientales del laboratorio deben cumplir con las especificaciones de operación dadas en los manuales de los equipos empleados. En el momento de ejecución de la calibración, la temperatura ambiente debe estar entre $20\text{ °C} \pm 2.5\text{ °C}$ (otros intervalos de temperatura ambiente podrían requerir correcciones adicionales e incrementar significativamente la incertidumbre de medición).

8. MÉTODO DE CALIBRACIÓN, ENSAYO Y/O MEDICION

La calibración se realiza por el método de comparación, midiendo la radiación térmica emitida por la fuente a una distancia determinada y comparándola con la temperatura equivalente indicada por el IBC.

9. OPERACIONES PREVIAS

Aclimatar los equipos bajo calibración y patrones por lo menos 8 horas [22]. Esto permite suponer que la temperatura del detector T_d es similar a la temperatura ambiente.

Siga 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 [11].

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

Las fuentes de radiación deben ser caracterizadas de acuerdo con las referencias [23] y [24] . El valor de la uniformidad ser tomada de este estudio.

Si se usa una cavidad asegure que el ángulo de incidencia está acorde con el tamaño del blanco del IBC.

Las fuentes de placa plana deben usarse solo si la respuesta espectral del termómetro de radiación de referencia es similar a la del IBC.

Si el punto de calibración es mayor o igual a la temperatura de rocío, asegúrese de tomar las precauciones necesarias para evitar condensación en la fuente de radiación.

10. RESOLUCIÓN ÓPTICA DEL TERMÓMETRO BAJO CALIBRACIÓN

La calibración debería realizarse a la distancia solicitada por el cliente. Sin embargo, es conveniente evitar correcciones excesivas debidas al SSE. La distancia debería ser seleccionada considerando que el tamaño de objetivo observado debe ser menor que el diámetro de la fuente de radiación, de acuerdo con la especificación D:S del IBC.

11. RESPUESTA ESPECTRAL

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

12. EMISIVIDAD DEL TERMÓMETRO BAJO CALIBRACIÓN

Si la emisividad del IBC se puede ajustar, debe ajustarse a la emisividad de la fuente. Si la emisividad del IBC es diferente que la emisividad del patrón es necesario realizar una corrección por emisividad, ver numeral 14.

13. PROCESO DE CALIBRACIÓN Y/O MEDICIÓN

- Limpie la superficie de los lentes de acuerdo con las especificaciones del fabricante.
- Si es posible ajuste la emisividad del termómetro infrarrojo a la emisividad de la fuente.
- Instale el aparato para la determinación del efecto del tamaño del blanco y ajuste las aperturas de acuerdo con la relación D:S del IBC. Determine el SSE a la máxima temperatura de calibración (también puede emplearse un diafragma).
- Si es posible determinar la variación ambiental del IBC. Introduzca el termómetro en la cámara climática apuntando a una fuente de radiación constante. Varíe la temperatura de la cámara entre 19 °C y 25 °C o de acuerdo con el uso del IBC. Si no es posible determinar la variación ambiental, siga las instrucciones del numeral 17 en el párrafo correspondiente a la determinación de la variación ambiental.
- La calibración es realizada desde la temperatura baja hasta la temperatura alta.
- Si se tiene 0 °C como uno de los puntos de calibración y es conveniente, realice una cavidad cilíndrica en el punto de hielo [25], [26].
- Ajuste la emisividad del termómetro de radiación de referencia a la emisividad de la fuente de radiación.
- Ubique el termómetro de radiación de referencia a la distancia de medición apropiada de acuerdo con la evaluación del SSE.
- Alinee el termómetro de radiación de referencia con el centro de la fuente
- Registre la indicación del termómetro de radiación de referencia, así como la temperatura del detector.
- Ubique el IBC a la distancia de medición. Esta puede ser la distancia a la cual la corrección del termómetro es cero o la recomendación del cliente. En cualquier caso, la distancia seleccionada debería producir un diámetro de tamaño del objetivo menor que el diámetro

de la fuente. Evite distancias mayores a 1 m para minimizar efectos de absorción atmosférica [27].

- Alinee el IBC con el centro de la fuente.
- Registre la indicación del IBC, así como la temperatura del detector.
- Ubique el patrón de chequeo a la distancia de medición apropiada.
- Alinee el patrón de chequeo con el centro de la fuente
- Registre la indicación del patrón de chequeo, así como la temperatura del detector.

Si el sistema de referencia usa un termómetro de contacto o una fuente de radiación calibrada, no es necesario aplicar los pasos relacionados con el termómetro de radiación de referencia.

14. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El mensurando en la calibración es la corrección del IBC, representada por:

$$C = T_{REF} - T_{IBC} \quad (11)$$

$$T_{REF} = T_{m,IBC} \quad (12)$$

$$S_{IBC}(T_{m,IBC}) = S_{IBC}(T_s) + \frac{(1 - \varepsilon_{RT,IBC})}{\varepsilon_{RT,IBC}} [S_{IBC}(T_b) - S_{IBC}(T_{d,IBC})] + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{RT,IBC})}{\varepsilon_{RT,IBC}} [S_{IBC}(T_s) - S_{IBC}(T_b)] \quad (13)$$

donde,

C : Corrección

T_{REF} : Temperatura de referencia.

T_{IBC} : Temperatura del IBC.

$T_{m,IBC}$: Temperatura teórica medida por el IBC calculada con la ecuación (13).

T_s : Temperatura de la fuente de radiación.

$\varepsilon_{RT,IBC}$: Emisividad nominal del IBC.

ε_s : Emisividad de la fuente de radiación.

T_b : Temperatura del ambiente.

$T_{d,IBC}$: Temperatura del detector del IBC.

Para el Sistema de medición con termómetro de contacto, T_s está dado por la ecuación (14).

$$T_s = T_{s,mean} + \delta T_{s,ind} + \delta T_{s,rep} + \delta T_{s,cert} + \delta T_{s,der} + \delta T_{s,int} + \delta T_{s,rad} + \delta T_{s,unf} \quad (14)$$

donde,

$T_{s,mean}$: Promedio de las indicaciones de T_s .

$\delta T_{s,ind}$: Corrección debida al indicador de T_s

$\delta T_{s,rep}$: Corrección debida a la repetibilidad de T_s

$\delta T_{s,cert}$: Corrección debida a la calibración de T_s

$\delta T_{s,der}$: Corrección debida a la deriva de T_s

$\delta T_{s,int}$: Corrección debida a la interpolación de T_s

$\delta T_{s,rad}$: Corrección debida al intercambio de calor entre la fuente y los alrededores

$\delta T_{s,unf}$: Corrección debida a la uniformidad de la fuente

Para la implementación de este sistema de medición con termómetro de contacto, se debe conocer la emisividad efectiva de la fuente de radiación.

Para el sistema de referencia con termómetro de radiación, T_s está dado por las ecuaciones (15) y (16).

$$S_P(T_s) = \frac{\varepsilon_{RT,P}}{\varepsilon_s} S_P(T_{m,P}) + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{RT,P})}{\varepsilon_s} S_P(T_b) - \frac{(1 - \varepsilon_{RT,P})}{\varepsilon_s} [S_P(T_b) - S_P(T_{d,P})] \quad (15)$$

$$T_{m,P} = T_{m,P,mean} + \delta T_{m,P,rep} + \delta T_{m,P,cert} + \delta T_{m,P,der} + \delta T_{m,P,int} + \delta T_{m,P,unf} \quad (16)$$

donde:

$T_{m,P}$: Temperatura del termómetro de radiación de referencia.

$\varepsilon_{RT,P}$: Emisividad nominal del termómetro de radiación de referencia.

$T_{d,P}$: Temperatura del detector del termómetro de radiación de referencia.

$T_{m,P,mean}$: Promedio de las indicaciones de termómetro de radiación de referencia.

$\delta T_{m,P,rep}$: Corrección debida a la repetibilidad de termómetro de radiación de referencia.

$\delta T_{m,P,cert}$: Corrección debida a la calibración de termómetro de radiación de referencia.

$\delta T_{m,P,der}$: Corrección debida a la deriva de termómetro de radiación de referencia.

$\delta T_{m,P,int}$: Corrección debida a la interpolación de termómetro de radiación de referencia.

$\delta T_{m,P,unf}$: Corrección debida a la uniformidad de la fuente.

Para la implementación del sistema de calibración con termómetro de radiación de referencia o fuente de radiación calibrada, debe coincidir la respuesta espectral con la del IBC.

La temperatura del IBC está dada por

$$T_{IBC} = T_{IBC,mean} + \delta T_{IBC,SSE} + \delta T_{IBC,rep} + \delta T_{IBC,res} + \delta T_{IBC,amb} + \delta T_{IBC,aa} \quad (17)$$

donde,

$T_{IBC,mean}$: Promedio de las indicaciones del IBC

$\delta T_{IBC,SSE}$: Corrección debida al efecto del tamaño del blanco

$\delta T_{IBC,rep}$: Corrección debida a la repetibilidad del IBC

$\delta T_{IBC,res}$: Corrección debida a la resolución del IBC

$\delta T_{IBC,amb}$: Corrección debida al efecto de la temperatura ambiente sobre el IBC

$\delta T_{IBC,aa}$: Corrección debida a la absorción atmosférica

15. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

La incertidumbre de medición se calcula de acuerdo con el documento JCGM 100:2008 [28].

16. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN

16.1.1. SISTEMA DE REFERENCIA CON TERMÓMETRO DE CONTACTO Y CAVIDAD

Los componentes de incertidumbre de medición para el sistema de referencia con cavidad y termómetro de contacto se presentan en la tabla 1.

La incertidumbre de medición por calibración del termómetro de contacto de referencia, así como la del indicador, se toman de los certificados de calibración. La incertidumbre de medición debida a la repetibilidad y deriva del termómetro de referencia se estima como la desviación estándar de las indicaciones y la máxima variación permitida en el punto triple del agua respectivamente.

La incertidumbre de medición debida a la interpolación de la corrección del termómetro de referencia se puede aproximar como [29]:

$$u(\delta T_{s,int}) \approx \sqrt{\frac{\chi^2}{(N - \rho)} \frac{1}{N}} \quad (18)$$

Donde χ^2 es la suma de residuos cuadrados, N es el número de observaciones y ρ es el número de coeficientes del polinomio interpolador elegido.

La incertidumbre de medición debida a la transferencia de calor surge de las pérdidas por convección y radiación [16]. El término convectivo es despreciable para el intervalo y las fuentes de radiación del laboratorio. El término radiativo se puede calcular a partir de la ecuación (19):

$$u(\delta T_{s,rad}) = \varepsilon_w \sigma (T_s^4 - T_b^4) \frac{d}{k} \left(\frac{r}{L}\right)^2 \quad (19)$$

donde d es el espesor del fondo de la cavidad, k es la conductividad térmica de la pared de la cavidad, r es el radio de apertura y L es la longitud de la cavidad.

La uniformidad puede ser estimada midiendo horizontalmente la cavidad con un termómetro de radiación con un tamaño de objetivo pequeño [29]. La máxima diferencia dentro del área útil de la cavidad se toma como la incertidumbre de medición por uniformidad.

El coeficiente de sensibilidad para las componentes de incertidumbre de medición relacionadas con T_s está dado por:

$$\frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial S_{IBC}(T_s)} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{RT,IBC}} \quad (20)$$

$$\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_s} = \frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial S_{IBC}(T_s)} \frac{\frac{\partial S_{IBC}(T_s)}{\partial T}}{\frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial T}} \quad (21)$$

La incertidumbre debida a la emisividad se divide en los componentes isotérmico y no isotérmico [16]. El componente isotérmico puede ser estimado a partir de las ecuaciones (22) a (27) donde se han considerado los efectos por emisividad de la pared de la cavidad, factores geométricos e imperfecciones de maquinación.

$$u(\varepsilon_{bb,w}) \approx \frac{1 - \varepsilon_{bb}}{1 - \varepsilon_w} u(\varepsilon_w) \quad (22)$$

$$u(\varepsilon_{bb,L}) \approx (1 - \varepsilon_{bb}) \frac{2u(L)}{L} \quad (23)$$

$$u(\varepsilon_{bb,d}) \approx (1 - \varepsilon_{bb}) \frac{2u(d)}{d} \quad (24)$$

$$u(\varepsilon_{bb,\theta}) \approx (1 - \varepsilon_{bb}) \cot \theta u(\theta) \quad (25)$$

$$u(\varepsilon_{bb,mac}) \approx (1 - \varepsilon_{bb}) \operatorname{cosec} \theta \left(\frac{\Delta t}{t} \right)^2 \quad (26)$$

$$u(\varepsilon_{bb}) = \sqrt{u^2(\varepsilon_{bb,w}) + u^2(\varepsilon_{bb,L}) + u^2(\varepsilon_{bb,d}) + u^2(\varepsilon_{bb,\theta}) + u^2(\varepsilon_{bb,mac})} \quad (27)$$

El término ε_w corresponde a la emisividad de la pared de la cavidad y la incertidumbre de medición se toma de los valores tabulados, los cuales son alrededor de ± 0.025 [16]. Los términos $u(\varepsilon_{bb,\theta})$ y $u(\varepsilon_{bb,mac})$ son usados solo para cavidades cónicas

El componente no isotérmico puede estimarse con la ecuación (28),

$$u(\varepsilon_{bb,T}) \approx \frac{c_2(1 - \varepsilon_w)|\Delta T|}{\sqrt{3}\lambda_T T^2 \left[1 - \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_T T}\right) \right]} \quad (28)$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura a lo largo de la cavidad y λ_T es la longitud de onda efectiva, la cual está dada por:

$$\lambda_T = A \left(1 + \frac{B}{AT} \right)^2 \quad (29)$$

El coeficiente de sensibilidad por emisividad está dado por:

$$\frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial \varepsilon_s} = \frac{1}{\varepsilon_{RT,IBC}} (S_{IBC}(T_s) - S_{IBC}(T_b)) \quad (30)$$

$$\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial \varepsilon_s} = \frac{\frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial \varepsilon_s}}{\frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial T}} \quad (31)$$

La incertidumbre de medición debida a la radiación reflejada es calculada a partir de la variación de temperatura de los alrededores $u(T_b)$. El coeficiente de sensibilidad está dado por:

$$\frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial S_{IBC}(T_b)} = \frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_{RT,IBC}} \quad (32)$$

$$\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_b} = \frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial S_{IBC}(T_b)} \frac{\frac{\partial S_{IBC}(T_b)}{\partial T}}{\frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial T}} \quad (33)$$

La incertidumbre típica de medición debida a la temperatura del detector se asume igual a 0.1 °C [16]. El coeficiente de sensibilidad está dado por:

$$\frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial S_{IBC}(T_{d,IBC})} = \frac{\varepsilon_{RT,IBC} - 1}{\varepsilon_{RT,IBC}} \quad (34)$$

$$\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_{d,IBC}} = \frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial S_{IBC}(T_{d,IBC})} \frac{\frac{\partial S_{IBC}(T_{d,IBC})}{\partial T}}{\frac{\partial S_{IBC}(T_{m,IBC})}{\partial T}} \quad (35)$$

Si la temperatura del detector no se puede estimar, se usa la variación de temperatura en el laboratorio como posible el intervalo de variación de la temperatura del detector y su correspondiente contribución a la incertidumbre de medición. En el caso de termómetros con emisividad variable puede emplearse para esta estimación el documento ASTM E2847 [11].

La incertidumbre combinada de medición para el sistema de referencia está dada por:

$$\begin{aligned}
 u^2(T_{REF}) = & \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_s}\right)^2 \left[u^2(\delta T_{s,ind}) + u^2(\delta T_{s,rep}) + u^2(\delta T_{s,cert}) + u^2(\delta T_{s,der}) + u^2(\delta T_{s,int}) \right. \\
 & \left. + u^2(\delta T_{s,rad}) + u^2(\delta T_{s,unf}) \right] + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial \epsilon_s}\right)^2 \left(u^2(\epsilon_{bb}) + u^2(\epsilon_{bb,T}) \right) \\
 & + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_b}\right)^2 u^2(T_b) + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_{d,IBC}}\right)^2 u^2(T_{d,IBC})
 \end{aligned} \tag{36}$$

Tabla 1. PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE PARA EL SISTEMA DE REFERENCIA CON TERMÓMETRO DE CONTACTO Y CAVIDAD.

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	SÍMBOLO	DISTRIBUCIÓN	INCERTIDUMBRE TÍPICA	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD
Interpolación	$\delta T_{s,int}$	Normal	Ecuación (18)	Ecuaciones (20) y (21)
Calibración del termómetro de referencia	$\delta T_{s,cert}$	Normal	Incetidumbre del certificado	Ecuaciones (20) y (21)
Calibración del indicador de temperatura	$\delta T_{s,ind}$	Normal	Incetidumbre del certificado	Ecuaciones (20) y (21)
Repetibilidad del termómetro de referencia	$\delta T_{s,rep}$	Normal	Desviación estándar de las indicaciones del patrón	Ecuaciones (20) y (21)
Deriva del termómetro de referencia	$\delta T_{s,der}$	Rectangular	Máxima variación permitida en el punto triple del agua	Ecuaciones (20) y (21)
Intercambio de calor	$\delta T_{s,rad}$	Rectangular	Ecuación (19)	Ecuaciones (20) y (21)
Uniformidad de la fuente	$\delta T_{s,unf}$	Rectangular	Máxima diferencia de temperatura en la zona útil de la placa	Ecuaciones (20) y (21)
Emisividad isotérmica	ϵ_{bb}	Normal	Incetidumbre por emisividad de la pared, factores geométricos e imperfecciones de	Ecuaciones (30) y (31)

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	SÍMBOLO	DISTRIBUCIÓN	INCERTIDUMBRE TÍPICA	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD
			maquinación. Ecuación (27)	
Emisividad no isotérmica	$\varepsilon_{bb,T}$	Normal	Ecuación (28)	Ecuaciones (30) y (31)
Radiación reflejada	T_b	Rectangular	Incertidumbre en la temperatura de los alrededores	Ecuaciones (32) y (33)
Temperatura del detector del IBC	$T_{d,IBC}$	Normal	0.1 °C o variación de temperatura del laboratorio	Ecuación (35)

16.1.2. SISTEMA DE REFERENCIA CON TERMÓMETRO DE RADIACION O FUENTE DE RADIACIÓN

Los componentes de incertidumbre de medición para el sistema de referencia con termómetro de radiación se presentan en la Tabla 2.

Si el termómetro de radiación de referencia y el IBC tienen la misma respuesta espectral, la temperatura de referencia se puede evaluar a partir de:

$$S(T_{m,IBC}) = \frac{\varepsilon_{RT,P}}{\varepsilon_{RT,IBC}} S(T_{m,P}) - \frac{(1 - \varepsilon_{RT,IBC})}{\varepsilon_{RT,IBC}} S(T_{d,IBC}) + \frac{(1 - \varepsilon_{RT,P})}{\varepsilon_{RT,IBC}} S(T_{d,P}) \quad (37)$$

La incertidumbre de medición por calibración del termómetro de radiación de referencia se toma del certificado de calibración. La incertidumbre debida a la repetibilidad y deriva del termómetro de referencia se estima como la desviación estándar y el máximo variación entre calibraciones respectivamente.

Las incertidumbres de medición debidas a la interpolación, emisividad, radiación reflejada y temperatura del detector se calculan del mismo modo al presentado anteriormente.

Si la fuente de radiación es una cavidad, la uniformidad se puede del mismo modo al presentado anteriormente. Si la fuente de radiación es un calibrador de placa plana, la incertidumbre de medición

debida a la uniformidad se puede estimar como la máxima diferencia de temperatura con respecto al centro en los puntos de la figura 6 [24].

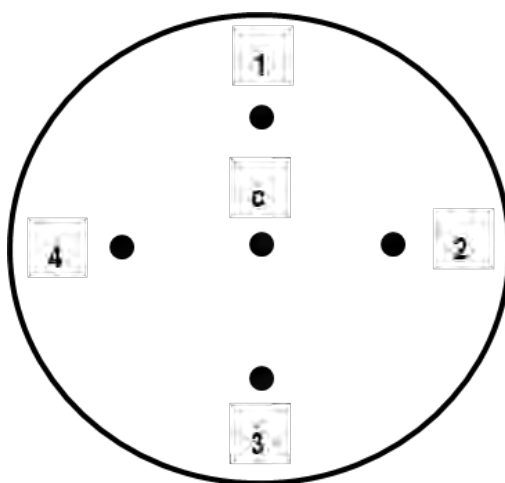


FIGURA 6. DETERMINACIÓN DE UNIFORMIDAD DEL CALIBRADOR DE PLACA

El coeficiente de sensibilidad para las componentes de incertidumbre de medición relacionadas con $T_{m,P}$ está dado por:

$$\frac{\partial S_P(T_s)}{\partial S_P(T_{m,P})} = \frac{\varepsilon_{RT,P}}{\varepsilon_s} \quad (38)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial T_{m,P}} = \frac{\partial S_P(T_s)}{\partial S_P(T_{m,P})} \frac{\frac{\partial S_P(T_{m,P})}{\partial T}}{\frac{\partial S_P(T_s)}{\partial T}} \quad (39)$$

El coeficiente de sensibilidad por emisividad está dado por:

$$\frac{\partial S_P(T_s)}{\partial \varepsilon_s} = \frac{1}{\varepsilon_s^2} [S_P(T_b) + (\varepsilon_{RT,P} - 1)S_P(T_d) - \varepsilon_{RT,P}S_P(T_m)] \quad (40)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial \varepsilon_s} = \frac{\frac{\partial S_P(T_s)}{\partial \varepsilon_s}}{\frac{\partial S_P(T_s)}{\partial T}} \quad (41)$$

El coeficiente de sensibilidad por radiación reflejada está dado por:

$$\frac{\partial S_P(T_s)}{\partial S_P(T_b)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_s} \quad (42)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial T_b} = \frac{\partial S_P(T_s)}{\partial S_P(T_b)} \frac{\frac{\partial S_P(T_b)}{\partial T}}{\frac{\partial S_P(T_s)}{\partial T}} \quad (43)$$

El coeficiente de sensibilidad por la temperatura del detector está dado por:

$$\frac{\partial S_P(T_s)}{\partial S_P(T_{d,P})} = \frac{1 - \varepsilon_{RT,P}}{\varepsilon_s} \quad (44)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial T_{d,P}} = \frac{\partial S_P(T_s)}{\partial S_P(T_{d,P})} \frac{\frac{\partial S_P(T_{d,P})}{\partial T}}{\frac{\partial S_P(T_s)}{\partial T}} \quad (45)$$

La incertidumbre de medición en la temperatura de la fuente está dada por:

$$\begin{aligned} u^2(T_s) = & \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_{m,P}} \right)^2 [u^2(\delta T_{m,P,rep}) + u^2(\delta T_{m,P,cert}) + u^2(\delta T_{m,P,der}) + u^2(\delta T_{m,int}) \\ & + u^2(\delta T_{m,P,unf})] + \left(\frac{\partial T_s}{\partial \varepsilon_s} \right)^2 (u^2(\varepsilon_{bb}) + u^2(\varepsilon_{bb,T})) + \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_b} \right)^2 u^2(T_b) \\ & + \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_{d,P}} \right)^2 u^2(T_{d,P}) \end{aligned} \quad (46)$$

La incertidumbre combinada de medición para el sistema de referencia en este caso está dada por:

$$u^2(T_{REF}) = \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_s}\right)^2 u^2(T_s) + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial \varepsilon_s}\right)^2 (u^2(\varepsilon_{bb}) + u^2(\varepsilon_{bb,T})) + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_b}\right)^2 u^2(T_b) + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_{d,IBC}}\right)^2 u^2(T_{d,IBC}) \quad (47)$$

Las ecuaciones (46) y (47) se combinan para obtener:

$$u^2(T_{REF}) = \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_s}\right)^2 \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_{m,P}}\right)^2 [u^2(\delta T_{m,P,rep}) + u^2(\delta T_{m,P,cert}) + u^2(\delta T_{m,P,der}) + u^2(\delta T_{m,int}) + u^2(\delta T_{m,P,unf})] + \left[\left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_s}\right)^2 \left(\frac{\partial T_s}{\partial \varepsilon_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial \varepsilon_s}\right)^2\right] (u^2(\varepsilon_{bb}) + u^2(\varepsilon_{bb,T})) + \left[\left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_s}\right)^2 \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_b}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_b}\right)^2\right] u^2(T_b) + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_s}\right)^2 \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_{d,P}}\right)^2 u^2(T_{d,P}) + \left(\frac{\partial T_{m,IBC}}{\partial T_{d,IBC}}\right)^2 u^2(T_{d,IBC}) \quad (48)$$

Tabla 2. PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN PARA EL SISTEMA DE REFERENCIA CON TERMÓMETRO DE RADIACIÓN O FUENTE DE RADIACIÓN

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	SÍMBOLO	DISTRIBUCIÓN	INCERTIDUMBRE TÍPICA	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD
Calibración del termómetro de referencia	$\delta T_{m,P,cert}$	Normal	Incertidumbre del certificado	Ecuaciones (20) y (21), (38) y (39)
Repetibilidad del termómetro	$\delta T_{m,P,rep}$	Normal	Desviación estándar de las indicaciones de la fuente	Ecuaciones (20) y (21), (38) y (39)
Deriva del termómetro de referencia	$\delta T_{m,P,der}$	Rectangular	Máxima variación entre calibraciones	Ecuaciones (20) y (21), (38) y (39)
Interpolación	$\delta T_{m,P,int}$	Normal	Ecuación (18)	Ecuaciones (20) y (21), (38) y (39)

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	SÍMBOLO	DISTRIBUCIÓN	INCERTIDUMBRE TÍPICA	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD
Uniformidad de la fuente	$\delta T_{m,P,unf}$	Rectangular	Máxima diferencia de temperatura en la zona útil de la placa	Ecuaciones (20) y (21), (38) y (39)
Emisividad isotérmica	ε_{bb}	Normal	Incertidumbre por emisividad de la pared, factores geométricos e imperfecciones de maquinación. ecuación (27)	Ecuaciones (30), (31), (40) y (41)
Emisividad no isotérmica	$\varepsilon_{bb,T}$	Normal	Ecuación (28)	Ecuaciones (30), (31), (40) y (41)
Temperatura del detector del IBC	$T_{d,IBC}$	Normal	0.1 °C o variación de temperatura del laboratorio	Ecuación (35)
Temperatura del detector del termómetro de radiación de referencia	$T_{d,P}$	Normal	0.1 °C o variación de temperatura del laboratorio	Ecuaciones (34) y (45)
Radiación reflejada	T_b	Rectangular	Incertidumbre en la temperatura de ambientes	Ecuaciones (32), (33), (42) y (43)

17. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN DE LA CORRECCIÓN

Los componentes de incertidumbre de medición para la corrección se presentan en la Tabla 4.

La función SSE se estima por el método directo usando aperturas variables. Los diámetros de apertura se seleccionan de acuerdo con la especificación D:S del IBC. El SSE se mide a una temperatura cercana al límite superior del intervalo de calibración del IBC [20], [22]. La función SSE puede ser ajustada usando la siguiente ecuación:

$$\sigma_{SSE} = a(d^n - d_{max}^n) + 1 \quad (49)$$

Este modelo es especialmente útil para representar datos empíricos de termómetros de radiación. Las constantes a y n representan la amplitud y el parámetro de forma [30].

La contribución a la incertidumbre de medición debida al SSE es calculada a partir de la incertidumbre en el radio de la fuente y la ley de Planck [31].

$$u(\sigma_{SSE}) = \frac{\partial \sigma_{SSE}}{\partial d} u(d) \quad (50)$$

$$u(d) = \sqrt{[(1 + \alpha(T_{ap} - 20))^2]u^2(d_0) + [(d_0(T_{ap} - 20))^2]u^2(\alpha) + [(d_0\alpha)^2]u^2(T_{ap})} \quad (51)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \sigma_{SSE}} = \frac{\lambda_T T^2}{\sqrt{2}c_2 \sigma_{SSE}} \frac{e^{\frac{c_2}{\lambda_T T}} - 1}{e^{\frac{c_2}{\lambda_T T}}} \quad (52)$$

Donde α es el coeficiente de expansión lineal, T_{ap} es la temperatura en la apertura de la fuente y d_0 es el diámetro de la fuente a 20 °C. Los valores de α para el grafito están disponibles en [32] asumiendo una incertidumbre de medición conservadora de 25 %. La incertidumbre de medición en T_{ap} y d_0 se asumen como 1 °C y 1 % respectivamente.

La incertidumbre de medición debida a la repetibilidad se calcula a partir de la desviación estándar de las indicaciones del IBC.

La incertidumbre de medición debida a la temperatura ambiente se estima a través de las ecuaciones (53) y (54). La sensibilidad del detector $u\left(\frac{\Delta S}{S}\right)$ se evalúa ubicando el IBC en frente de una fuente de radiación en una cámara climática para las temperaturas ambientales esperadas en el laboratorio. Se ha encontrado que este efecto es independiente de la temperatura de la fuente de radiación [16].

$$\frac{u(S_{amb})}{S_{amb}} = u\left(\frac{\Delta S}{S}\right) \left[1 - \frac{S(T_{d,IBC})}{S(T_{m,P})}\right] \quad (53)$$

$$u(\delta T_{IBC,amb}) = \frac{\lambda_T T_P^2 (1 - e^{-c_2/\lambda_T T_P})}{c_2} \frac{u(S_{amb})}{S_{amb}} \quad (54)$$

Si no es posible medir la sensibilidad del detector, se pueden usar los valores de la t
Tabla 3.

Tabla 3. INCERTIDUMBRES DE MEDICIÓN DEBIDAS A LA TEMPERATURA AMBIENTE [16]

Longitud de onda, μm	$\left(\frac{\Delta S/S}{dT}\right), K^{-1}$
10	1×10^{-03}
3.9	8×10^{-04}
1.6	1.5×10^{-04}
0.9	2×10^{-04}

La incertidumbre relativa expandida de medición debida a la absorción atmosférica para distancias menores a 1 m en el peor caso es 0.0006 ($\kappa = 2.0$) [16]. El coeficiente de sensibilidad se calcula como:

$$\frac{\partial T}{\partial S_{aa}} = \frac{S}{\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)} \quad (55)$$

La incertidumbre combinada para la corrección está dada por:

$$u^2(C) = \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma_{SSE}}\right)^2 u^2(\sigma_{SSE}) + u^2(\delta T_{IBC,rep}) + u^2(\delta T_{IBC,res}) + u^2(\delta T_{IBC,amb}) + \left(\frac{\partial T}{\partial S_{aa}}\right)^2 \left(\frac{u(S_{aa})}{S}\right)^2 + u^2(T_{REF}) \quad (56)$$

Tabla 4. PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN PARA LA CORRECCION

FUENTE DE INCERTIDUMBRE DE MEDICION	SÍMBOLO	DISTRIBUCIÓN	INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN TÍPICA	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD
Tamaño de la fuente / SSE	σ_{SSE}	Normal	Ecuación (50)	Ecuación (52)
Repetibilidad del termómetro bajo calibración	$\delta T_{IBC,rep}$	Normal	Desviación estándar del termómetro bajo calibración	- 1
Resolución del IBC	$\delta T_{IBC,res}$	Rectangular	Resolución sobre $2\sqrt{3}$	-1
Temperatura ambiente	$\delta T_{IBC,amb}$	Normal	Ecuación (54)	-1
Absorción Atmosférica	S_{aa}	Normal	0.0003	Ecuación (55)
Temperatura medida	T_{REF}	Normal	Ecuación (36) o (47)	1

En el Anexo 1 se presenta un ejemplo de estimación de la incertidumbre de medición.

18. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Siegel and J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, (1992), 3rd ed. 1992.
- [2] D. P. DeWitt and G. D. Nutter, *Theory and Practice of Radiation Thermometry*. Wiley, 1988.
- [3] F. J. Sanchez-Marin, S. Calixto-Carrera, and C. Villaseñor-Mora, "Novel approach to assess the emissivity of the human skin," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 14, no. 2, p. 24006, 2009.
- [4] C. A. James, A. J. Richardson, P. W. Watt, and N. S. Maxwell, "Reliability and validity of skin temperature measurement by telemetry thermistors and a thermal camera during exercise in the heat," *Journal of thermal biology*, vol. 45, pp. 141–149, 2014.
- [5] T. Togawa, "Non-contact skin emissivity: measurement from reflectance using step change in ambient radiation temperature," *Clinical Physics and Physiological Measurement*, vol. 10, no. 1, p. 39, 1989.
- [6] ASTM E1965 - 98, "Standard specification for Infrared Thermometers for Intermittent Determination of Patient Temperature," *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016*, 2016.
- [7] T. Fletcher, A. Whittam, R. Simpson, and G. Machin, "Comparison of non-contact infrared skin thermometers," *Journal of medical engineering & technology*, vol. 42, no. 2, pp. 65–71, 2018.

- [8] C.-C. Liu, R.-E. Chang, and W.-C. Chang, "Limitations of forehead infrared body temperature detection for fever screening for severe acute respiratory syndrome," *Infection Control & Hospital Epidemiology*, vol. 25, no. 12, pp. 1109–1111, 2004.
- [9] Z. M. Zhang, B. K. Tsai, and G. Machin, *Radiometric Temperature Measurements: I. Fundamentals*. Elsevier Science, 2009.
- [10] D. Cardenas/Garcia, "Calibración de calibradores planos para termómetros de radiación Nota técnica." Centro Nacional de Metrología, México, 2011.
- [11] ASTM E2847-14, "Standard Test Method for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Thermometers," *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014*, 2015, doi: 10.1520/E2847.
- [12] F. Liebmann, "Infrared Calibration Development at Fluke Corporation Hart Scientific Division," in *SPIE Defense and Security Symposium*, 2008, p. 693906.
- [13] F. Sakuma, S. Hattori, and J. F. Schooley, "Temperature: Its measurement and control in science and industry," *JF Schooley, AIP, New York*, pp. 421–427, 1982.
- [14] P. Saunders, "MSL Technical Guide 22: Calibration of Low-Temperature Infrared Thermometers,(June 2009)." 2009.
- [15] P. Saunders and D. R. White, "Physical basis of interpolation equations for radiation thermometry," *Metrologia*, vol. 40, no. 4, pp. 195–203, Aug. 2003, doi: 10.1088/0026-1394/40/4/309.
- [16] J. Fischer *et al.*, "Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver Point." BIPM-CCT-WG5, 2008.
- [17] P. Saunders, "Calibration and use of low-temperature direct-reading radiation thermometers," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, no. 2, p. 25104, 2008.
- [18] H. W. Yoon, D. W. Allen, and R. D. Saunders, "Methods to reduce the size-of-source effect in radiometers," *Metrologia*, vol. 42, no. 2, p. 89, 2005.
- [19] G. Machin and R. Sergienko, "A comparative study of size of source effect (SSE) determination techniques," in *Proc. Tempmeko*, 2001, vol. 1, pp. 155–160.
- [20] I. Pušnik, G. Grgić, and J. Drnovšek, "System for the determination of the size-of-source effect of radiation thermometers with the direct reading of temperature," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 1330–1336, Jun. 2006, doi: 10.1088/0957-0233/17/6/007.
- [21] A. Manoi and P. Saunders, "Size-of-source Effect in Infrared Thermometers with Direct Reading of Temperature," *International Journal of Thermophysics*, vol. 38, no. 7, pp. 1–11, Jul. 2017, doi: 10.1007/s10765-017-2237-3.
- [22] ASTM E1256 – 17, "Standard Test Methods for Radiation Thermometers (Single Waveband Type)," *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014*, 2017, doi: 10.1520/E1256-15.3.1.1.

- [23] K. D. Hill and D. J. Woods, "Exploring the size-of-source and distance effects of radiation thermometers," in *Proceedings of TEMPMEKO 2004, 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*, 2004, vol. 1, pp. 599–604.
- [24] S. Carvajal and C. Sanchez, "Estudio comparativo de métodos para la determinación de la uniformidad en calibradores infrarrojos de placa plana," *Editorial III Congreso Metrocol*. Bogotá, 2016.
- [25] J. Ivarson and R. Falk, "Simple ice reference point for IR-radiation thermometers; TEMPMEKO'96, 6th Intern. Symp. on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Torino 1996," *Proceedings S*, pp. 317–320, 1758.
- [26] P. Saunders, "MSL Technical Guide 2 The Ice Point," pp. 1–2.
- [27] P. Saunders *et al.*, "Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point," *International Journal of Thermophysics*, vol. 29, no. 3, pp. 1066–1083, 2008, doi: 10.1007/s10765-008-0385-1.
- [28] JCGM 100:2008, "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement: GUM 1995 with minor corrections." BIPM, 2008.
- [29] J. V Nicholas and D. R. White, *Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration*. Wiley, 2001.
- [30] P. Bloembergen, "Analytical representations of the size-of-source effect," *Metrologia*, vol. 46, no. 5, pp. 534–543, Oct. 2009, doi: 10.1088/0026-1394/46/5/018.
- [31] I. Pušnik, G. Grgić, and J. Drnovšek, "Calculated Uncertainty of Temperature Due to the Size-of-Source Effect in Commercial Radiation Thermometers," *International Journal of Thermophysics*, vol. 29, no. 1, pp. 322–329, 2008, doi: 10.1007/s10765-007-0330-8.
- [32] American Institute of Physics, *American Institute of Physics Handbook, 3rd Edition*. New York, NY: McGraw-Hill, 1972.

19. ANEXOS

Anexo 1. Calibración de un termómetro de radiación a 35 °C.

ANEXO 1. CALIBRACIÓN DE UN TERMÓMETRO DE RADIACIÓN A 35 °C

Datos del termómetro de radiación:

Emisividad	1.000
Banda espectral	8 μm a 14 μm
D:S	20:1
Resolución de display	0.01 °C

Distancia de calibración: 400 mm

Patrón: Termómetro de radiación de referencia TRT II Rango espectral 8 μm a 14 μm operado a una emisividad de 1.000.

Fuente de radiación: Cavidad cilíndrica de grafito con una apertura de 32 mm y una profundidad de 120 mm

Los datos de calibración se presentan en la siguiente tabla:

Número de medición	Temperatura de Patrón, °C	Temperatura del detector del patrón, °C	Temperatura del IBC, °C	Temperatura del detector del IBC, °C
1	34.87	21.6	34.84	25.5
2	34.88	21.6	34.88	25.5
3	34.88	21.6	34.88	25.5
4	34.88	21.6	34.87	25.5
5	34.88	21.6	34.86	25.5
6	34.88	21.6	34.87	25.5
7	34.88	21.6	34.87	25.5
8	34.88	21.6	34.88	25.4
9	34.88	21.6	34.88	25.4
PROMEDIO	34.879	21.6	34.870	25.457

Número de medición	Temperatura de Patrón, °C	Temperatura del detector del patrón, °C	Temperatura del IBC, °C	Temperatura del detector del IBC, °C
Desviación estándar	0.0033	0.000	0.0132	0.0132

FUENTES DE INCERTIDUMBRE DE MEDICION

Incertidumbre del patrón, se toma del certificado de calibración:

$$u(\delta T_{m,P,cert}) = 0.033 \text{ °C}$$

Incertidumbre por interpolación del patrón:

$$u(\delta T_{m,P,int}) = 0.002 \text{ °C}$$

Incertidumbre por repetibilidad de las lecturas del patrón:

$$u(\delta T_{m,P,rep}) = 0.001 \text{ °C}$$

Incertidumbre debida a la uniformidad de la fuente de radiación:

$$u(\delta T_{m,P,unf}) = 0.087 \text{ °C}$$

Incertidumbre debida a la deriva del patrón:

$$u(\delta T_{m,P,der}) = 0.107 \text{ °C}$$

Incertidumbre debida a la radiación reflejada:

$$u(\delta T_b) = 1.00 \text{ °C}$$

La incertidumbre debida a la emisividad isoterma:

$$u(\epsilon_{bb}) = 0.001$$

La incertidumbre debida a la emisividad no isoterma:

$$u(\epsilon_{bb,T}) = 0.0002$$

Incertidumbre debida a la temperatura del detector del patrón:

$$u(T_{d,P}) = 0 \text{ °C}$$

Incertidumbre debida a la temperatura del detector del IBC:

$$u(T_{d,m}) = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La incertidumbre de medición en la temperatura de referencia está dada por:

Fuente de Incertidumbre	Tipo	Dist	U		Factor	u		G.L.	C		C·u	
Interpolación	B	N	0.002	°C	1.00	0.002	°C	1	1.000	--	0.002	°C
Temperatura de Detector del patrón	B	N	0.200	°C	2.00	0.100	°C	200	0.000	--	0.000	°C
Repetibilidad termómetro de referencia	A	N	0.003	°C	3.00	0.001	°C	8	1.000	--	0.001	°C
Deriva del termómetro de referencia	A	R	0.185	°C	1.73	0.107	°C	200	1.000	--	0.107	°C
Calibración del termómetro de referencia	B	N	0.066	°C	2.00	0.033	°C	200	1.000	--	0.033	°C
Emisividad isoterma	B	N	0.001	--	1.00	0.001	--	200	17.474	°C	0.009	°C
Emisividad no isoterma	B	R	0.000	--	1.73	0.000	--	200	17.474	°C	0.003	°C
Uniformidad de la fuente	B	R	0.150	°C	1.73	0.087	°C	200	1.000	--	0.087	°C
Radiación reflejada	A	N	2.000	°C	2.00	1.000	°C	200	0.001	--	0.001	°C
Temperatura de Detector del IBC	B	N	0.200	°C	2.00	0.100	°C	200	0.000	--	0.000	°C
Temperatura de referencia	A	N	0.278	°C	1.97	0.142	°C	431				

Incertidumbre de medición por SSE:

$$u(\sigma_{SSE}) = 0.0002 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Incertidumbre de medición por resolución del termómetro bajo calibración

$$u(\delta(T_{IBC})_{res}) = 0.0029 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Incertidumbre de medición por repetibilidad de las lecturas del IBC

$$u(\delta(T_{IBC})_{rep}) = 0.004 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La incertidumbre de medición debida a la absorción atmosférica

$$u(S_{aa})/S = 0.0003$$

La incertidumbre de medición debida a la temperatura ambiente en términos de señal

$$u(S_{amb})/S_{amb} = 0.0001$$

La incertidumbre de medición de la corrección está dada por:

GUÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE RADIACIÓN Y SU
APLICACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA CORPORAL

Fuente de Incertidumbre	Tipo	Dist	U		Factor	u		G.L.	C		C·u	
SSE	B	N	0.000	--	1.00	0.000	--	200	44.130	°C	0.009	°C
Repetibilidad del Termómetro bajo calibración	A	N	0.013	°C	3.00	0.004	°C	8	-1.000	--	0.004	°C
Resolución	B	R	0.005	°C	1.73	0.003	°C	200	-1.000	--	0.003	°C
Absorción atmosférica	B	N	0.001	--	2.00	0.000	--	200	68.910	°C	0.021	°C
Temperatura ambiente	B	N	0.000	--	1.00	0.000	--	200	61.244	°C	0.008	°C
Temperatura de referencia	A	N	0.278	°C	1.97	0.142	°C	431	1.000	--	0.142	°C
Corrección	A	N	0.282	°C	1.97	0.144	°C	456				

Los resultados se pueden presentar como ilustra la siguiente tabla:

Temperatura, °C	Corrección, °C	<i>k</i>	Incertidumbre de medición, °C
34.87	2.28	2.0	± 0.29



**MINISTERIO DE COMERCIO,
INDUSTRIA Y TURISMO**

GUÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE

**TERMÓMETROS DE RADIACIÓN Y SU
APLICACIÓN PARA LA MEDICIÓN
DE LA TEMPERATURA CORPORAL**

ISBN e-Book: 978-958-53805-5-4

**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

