

**GUÍA TÉCNICA SOBRE  
TRAZABILIDAD E INCERTIDUMBRE  
EN LA CALIBRACIÓN DE  
TERMÓMETROS DE RADIACIÓN**

**México, Abril de 2008**

**Derechos reservados ©**

## **PRESENTACIÓN**

Para asegurar la uniformidad y validez técnica de la expresión de la trazabilidad de las mediciones y de la estimación de la incertidumbre de las mismas, la entidad mexicana de acreditación, a. c., solicitó al Centro Nacional de Metrología la revisión y elaboración de Guías Técnicas sobre Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones.

Los Subcomités de evaluación de Laboratorios Acreditados de Calibración y de Ensayo de la entidad mexicana de acreditación se incorporaron a este proyecto transmitiendo sus conocimientos y experiencias relacionados con la trazabilidad e incertidumbre de sus mediciones.

El Centro Nacional de Metrología coordinó la elaboración de las Guías, proponiendo criterios técnicamente sustentados, procurando que las opiniones de los Subcomités fueran apropiadamente consideradas y asegurando la coherencia de las mismas con otros documentos técnicos de referencia.

Las Guías Técnicas de Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones observan lo establecido en documentos de referencia conocidos ampliamente en la comunidad internacional, en los cuales se fundamentan las políticas de Trazabilidad e Incertidumbre de la entidad mexicana de acreditación.

Las Guías aportan criterios técnicos que sirven de apoyo a la aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006. La coherencia de las Guías con esta norma y con otros documentos de referencia, contribuye a asegurar la confiabilidad y uniformidad de las mediciones que realizan los laboratorios acreditados.

Abril de 2008.

**Dr. Héctor O. Nava Jaimes**

**María Isabel López Martínez**

Director General  
Centro Nacional de Metrología

Directora Ejecutiva  
entidad mexicana de acreditación, a. c.

---

## **AGRADECIMIENTOS**

La entidad mexicana de acreditación expresa su reconocimiento al Fondo de Apoyo para la Micro, Pequeña y Mediana Empresa (FONDO PYME), auspiciado por la Secretaría de Economía, por haber proporcionado los recursos financieros para la elaboración de este documento, mediante el proyecto aprobado con folio FP2007-1605 de nombre “Elaboración de guías técnicas sobre trazabilidad e incertidumbre para la medición que permitan el fortalecimiento del Sistema Nacional de Acreditación de Laboratorios de Ensayo y Calibración” y por este medio hace patente su sincero reconocimiento y agradecimiento a la Secretaría de Economía, a la Subsecretaría para la Pequeña y Mediana Empresa, a la Dirección General de Desarrollo Empresarial y Oportunidades de Negocio, y a los profesionales que aportaron su tiempo y conocimiento en su desarrollo, destacando a los responsables de la elaboración:

## **GRUPO DE TRABAJO**

**HERNÁNDEZ LÓPEZ José Efraín, CENAM**

**LIRA CORTÉS Leonel, CENAM**

**LUYO ALVARADO Saúl Javier, CENAM**

**MÉNDEZ LANGO Edgar, CENAM**

**RODRÍGUEZ ARTEAGA Hugo, CENAM**

Se agradece los comentarios y sugerencias del

Subcomité de temperatura, presión y humedad, de la EMA

---

## ÍNDICE

PRESENTACIÓN .....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
GRUPO DE TRABAJO .....	3
ÍNDICE.....	4
1. Propósito de la Guía .....	5
2. Alcance .....	5
3. Mensurando .....	5
4. Método y sistema de medición .....	6
5. Confirmación metrológica.....	11
6. Trazabilidad de las mediciones .....	13
7. Estimación de la incertidumbre de medición .....	16
8. Validación de métodos .....	19
9. Buenas prácticas de medición .....	19
10. Referencias bibliográficas .....	20
Anexo A.....	22
Anexo B.....	30
Anexo C.....	31

---

## 1. Propósito de la Guía

La presente Guía tiene como finalidad orientar sobre:

- a) métodos para calibrar termómetros de radiación,
- b) estimar la incertidumbre de la calibración,
- c) los requisitos para demostrar trazabilidad de las mediciones en los servicios de calibración, y
- d) expresar la trazabilidad de las mediciones realizadas por los laboratorios.

En ella se describen los elementos básicos de un sistema de calibración de termómetros de radiación; se resaltan criterios para sustentar la trazabilidad y para estimar la incertidumbre de las mediciones. Estos criterios se deben observar durante la evaluación de un laboratorio.

## 2. Alcance

Esta Guía se aplica a la calibración de termómetros de radiación de banda ancha o angosta, a temperaturas menores al punto de solidificación de la plata, y sirve de apoyo para:

- Calibración por comparación de las mediciones de un termómetro patrón contra las mediciones del termómetro bajo calibración.
- Evaluar la estimación de la incertidumbre en las calibraciones.
- Evaluar la documentación de la trazabilidad de las mediciones que se realizan en las calibraciones.

Esta Guía no aplica en la calibración de:

- aquellos termómetros denominados como “pirómetros de filamento desvanecente”, ni
- de termómetros de radiación de banda múltiple.

Algunos conceptos y los términos más comunes de la termometría de radiación que se emplean en esta Guía se describen brevemente en el Anexo C.

## 3. Mensurando

Para los métodos de medición que se presentan en esta Guía, el mensurando es el error de medición del termómetro de radiación bajo calibración.

---

### 3.1 Modelo matemático para el mesurando

El modelo matemático del error de medición del instrumento bajo calibración (IBC), para cada temperatura de calibración es:

$$error_{IBC} = t_{IBC} - \Delta(\varepsilon_{IBC}) - t_p \quad (1)$$

donde:

$t_{IBC}$	es la temperatura de radiancia, indicada por el IBC en °C,
$\Delta(\varepsilon_{IBC})$	es la corrección por la diferencia entre la emisividad de la fuente radiante y la emisividad ajustada en el IBC, ( $\varepsilon_{IBC}$ ),
$t_p$	es la temperatura de la fuente radiante, indicada por el termómetro patrón que mide la temperatura de su pared.

### 4. Método y sistema de medición

El método empleado es el de comparación con los siguientes casos:

- comparar la temperatura de radiancia de un cuerpo negro medida por el IBC, donde la temperatura del cuerpo negro se mide con un termómetro de resistencia de platino patrón.
- comparar la temperatura de radiancia de una fuente conocida de radiación medida con el instrumento bajo calibración, contra la temperatura de radiancia medida por un termómetro de radiación calibrado, usado como patrón de referencia.

#### Sistema de medición

En consecuencia los sistemas de medición son:

- Un cuerpo negro cuya temperatura se mide con un termómetro de resistencia de platino o
- Una fuente de radiación caracterizada y un termómetro de radiación calibrado.

---

## 4.1 Características de los elementos de un sistema de medición

### Fuentes radiantes:

En las mediciones se utilizan generalmente cinco tipos de fuentes radiantes:

- Cuerpos negros con puntos fijos de la Escala Internacional de Temperatura de 1990.
- Cuerpos negros inmersos en baño líquido.
- Cavidad de un tubo de calor cerrada por un extremo.
- Cavidad de un horno de temperatura variable con calentamiento eléctrico, de una o más zonas de calefacción.
- Plato caliente de temperatura variable, con emisividad conocida.

### Requisitos para las fuentes radiantes:

- La abertura de la cavidad del cuerpo negro, o el radiador, deberá tener un diámetro cuando menos dos veces mayor que el diámetro del campo visual del IBC, a cualquiera de las distancias establecidas para la calibración [5].
- El valor de la emisividad del cuerpo negro, que se considera como una cavidad isotérmica, no debe ser menor que 0,99 [5].
- El valor de la emisividad de fuentes radiantes diferentes a cuerpos negros, debe tener evidencia de su validez.

La tabla 1 incluye algunos ejemplos de cavidades de cuerpos negros y algunas de sus características.

Intervalo de temperaturas / °C		Medio para establecer la temperatura	Gradientes máximos de temperatura	
Desde	Hasta		En el fondo/°C <sup>1</sup>	Entre la abertura y el fondo <sup>2</sup>
-20	105	Inmersión en mezcla de etilenglicol y agua	± 1	- 2 % a + 0,4 %
50	250	Inmersión en aceite de silicón	± 1	- 2 % a + 0,4 %
50	500	Calefactor eléctrico	± 2,5	- 10 % a + 2 %
400	800	Calefactor eléctrico	± 2,5	- 10 % a + 2 %
800	962	Calefactor eléctrico	± 5	- 10 % a + 2 %

<sup>1</sup>Con respecto al centro.

<sup>2</sup>Cociente de temperaturas absolutas, con respecto al centro de la cavidad.

### Requisitos para los termómetros patrones:

---

Para cuerpos negros cuya temperatura se mide con un termómetro de resistencia de platino:

- El termómetro debe estar calibrado.
- Se deberá comprobar que la temperatura medida con el termómetro de resistencia de platino patrón, no depende de la profundidad de inmersión, en la proximidad del fondo de la cavidad. El resultado de una prueba de inmersión es suficiente, en el alcance de medición de interés.

Para fuentes de radiación con termómetros de radiación patrón.

- La emisividad de la cavidad debe ser conocida en el intervalo de temperatura que se utilice y en las regiones espectrales del patrón y del IBC.
- El termómetro patrón debe estar calibrado.
- En caso de que la emisividad de la fuente no corresponda a aquella que con la que fue calibrado el termómetro patrón, entonces se debe:
  - ajustar el control de del termómetro patrón al valor de emisividad de la fuente o
  - calcular la corrección correspondiente.

## 4.2 Condiciones de referencia para la realización de las calibraciones

### Del ambiente

La temperatura y la humedad del lugar donde se llevan a cabo las calibraciones deben estar dentro de los límites especificados de operación de los componentes del sistema de calibración y del IBC.

### Distancia

Un termómetro de radiación puede presentar un error de medición que está asociado con la relación entre el tamaño relativo del campo visual y el tamaño del objeto cuya temperatura se mide. Este error de medición es variable y para determinarlo es necesario que durante la calibración del termómetro se realicen mediciones a varias distancias entre el termómetro y la fuente radiante.

Para que el usuario de un termómetro de radiación bajo calibración, disponga de información sobre el error de medición de tal termómetro, la calibración se debe realizar al menos a dos distancias:

- aquella para la cual el campo de visión del IBC tiene un diámetro que es igual a la mitad del diámetro de la fuente radiante, y
- aquella para la cual el campo de visión del IBC tiene un diámetro cuyo tamaño está entre el 70% y el 90 % del diámetro de la fuente radiante.

---

La distancia establecida para la calibración y el diámetro de la fuente radiante, deberán estar descritas en el informe de la calibración.

### **Alineación del eje de simetría del campo visual del IBC**

El eje de simetría del sistema óptico del IBC debe ser coincidente con el eje de simetría de la cavidad del cuerpo negro o coincidente con la normal que cruza el centro del radiador usado como fuente radiante.

### **Condiciones para el instrumento**

El IBC se deberá mantener por lo menos 48 horas en un ambiente con temperatura y humedad dentro de los límites de operación especificados en su manual de operación o referencia que aplique.

### **Condiciones para la estabilidad de la temperatura de la fuente radiante antes de iniciar la calibración**

Deberá esperarse hasta que el termómetro patrón indique que la temperatura de la fuente radiante es estable.

El laboratorio deberá especificar las condiciones para declarar la estabilidad de la temperatura de la fuente.

### **Número de mediciones por serie**

Se recomienda que la temperatura medida con el IBC se compare con el promedio de dos mediciones de temperatura del termómetro patrón realizadas antes y después de una medición del IBC. Esta serie de comparaciones entre la lectura del IBC y el promedio de mediciones del patrón, se debe ejecutar al menos tres veces.

## **4.3 Esquemas de calibración**

### **4.3.1 Cuando el control de emisividad del IBC permite ser ajustado a la emisividad efectiva de la fuente**

Bajo este esquema tanto el patrón como el IBC se deben ajustar al valor de emisividad de la fuente radiante y la corrección  $\Delta(\varepsilon_{IBC})$  se hace igual a cero en la ecuación 1.

---

Por lo tanto, el error de medición bajo este esquema de calibración, es el que resulta de comparar las lecturas del IBC contra las lecturas del patrón:

$$error_{IBC} = t_{IBC} - t_p$$

**Ejemplo 1:**

Supóngase que a una distancia dada, se calibra un termómetro ajustado a  $\varepsilon = 1,00$  y que la calibración se realiza mediante la medición de la temperatura de un cuerpo negro donde el termómetro patrón indica que éste se encuentra a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ .

Supóngase también que la temperatura indicada por el IBC es  $100,4\text{ }^\circ\text{C}$ . ¿Cuál sería el error de medición del IBC a esa temperatura de calibración?

**Solución:**

Bajo este esquema:

$$\Delta(\varepsilon_{IBC} = 1) = 0$$

**Nota:** Cuando un termómetro de radiación opera ajustado a  $\varepsilon = 1$ , los valores desplegados no provienen de una señal compensada. Por esto, la corrección  $\Delta(\varepsilon_{IBC})$  vale cero.

Dado que  $t_{IBC} = 100,4\text{ }^\circ\text{C}$  y  $t_p = 100\text{ }^\circ\text{C}$ , el error de medición del IBC es:

$$Error_{IBC} = 100,4\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C} - 100\text{ }^\circ\text{C} = 0,4\text{ }^\circ\text{C}$$

#### 4.3.2 Cuando el IBC no permite ser ajustado al valor de emisividad efectiva de la fuente

Se debe usar este esquema cuando el IBC opera a un valor de emisividad fijo (distinto al de la fuente) y se debe calcular la compensación  $\Delta(\varepsilon_{IBC})$  que el termómetro introduce en el valor desplegado de la temperatura medida.

Bajo este esquema, el error de medición es el que resulta de comparar las lecturas corregidas del IBC contra las lecturas del patrón, como indica la ecuación 1; véase ejemplo 2.

---

## 5. Confirmación metrológica

*Confirmación metrológica:* Conjunto de operaciones requeridas para asegurar que el equipo de medición es conforme a los requisitos correspondientes a su uso previsto.

Notas:

- La confirmación metrológica generalmente incluye la calibración y verificación, cualquier ajuste o reparación necesario y la subsiguiente recalibración, la comparación con los requisitos metrológicos para el uso previsto del equipo, así como cualquier sellado y etiquetado requerido.
- La confirmación metrológica se obtiene cuando se ha demostrado y documentado la adecuación del equipo de medición para el uso previsto.
- Los requisitos para el uso previsto del equipo de medición, incluyen consideraciones tales como alcance, resolución y error máximo permitido.

### **Ejemplo 2:**

Supóngase que a una distancia dada, se calibra un termómetro con banda de respuesta espectral de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$  y que opera con un ajuste de emisividad a  $\varepsilon = 0,95$  y que la calibración se realiza mediante la medición de la temperatura de un cuerpo negro donde un termómetro patrón se encuentra instalado en la pared que forma la cavidad e indica que ésta se encuentra a 100 °C.

Supóngase que la temperatura indicada por el IBC es 103,5 °C. ¿Cuál sería el error de medición del IBC, si el instrumento pudiera ajustarse a  $\varepsilon = 1$ ?

### **Solución:**

La compensación introducida a la temperatura medida por el IBC a un valor de emisividad  $\varepsilon = 0,95$  para la banda de respuesta espectral de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$  y a la temperatura de 100 °C, de acuerdo al método que se describe en el Anexo A de esta guía, vale:

$$\Delta(\varepsilon_{IBC} = 0,95) = 3,2 \text{ °C}$$

Entonces, dado que  $t_{IBC} = 103,5 \text{ °C}$  y  $t_P = 100 \text{ °C}$  (la temperatura de calibración medida con el patrón), el error de medición del IBC es:

$$Error_{IBC} = 103,5 \text{ °C} - 3,2 \text{ °C} - 100 \text{ °C} = 0,3 \text{ °C}$$

---

La confirmación metrológica es útil en ausencia de prescripciones de características de los baños y hornos establecidas por el fabricante, esto es común en este tipo de equipo. Su propósito es asegurar que el sistema de calibración tenga las características adecuadas para el uso previsto.

El laboratorio debe tener un sistema de confirmación metrológica para su sistema de medición que indique el programa de calibración y verificación de sus patrones, la caracterización de fuentes de radiación y el control metrológico de aquellos instrumentos de medición que se usen durante la calibración.

Nota para el evaluador: Este sistema de confirmación metrológica está de acuerdo a lo establecido en la norma NMX-EC-17025-INMC-2006, apartados 5.6.3.1 (Patrones de referencia) y 5.6.3.3 (Verificaciones intermedias).

El sistema debe contener criterios técnicos respecto al sistema de calibración utilizado en la calibración: caracterización periódica de uniformidad térmica, criterios de estabilidad y control estadístico.

La confirmación metrológica es útil en ausencia de prescripciones de características de equipos e instrumentos usados en la calibración para asegurar que sus características sean adecuadas para el uso previsto.

Los criterios técnicos respecto a la utilidad de los equipos e instrumentos de medición utilizados en la calibración, son los siguientes:

**Fuente de radiación:** Los principales aspectos a considerar son:

- verificación de su emisividad y
- caracterización de sus gradientes térmicos.

Se recomienda el uso de cartas de control para observar el comportamiento de estas características en el tiempo.

Notas:

- La verificación de la emisividad efectiva de una fuente depende de la emisividad de sus paredes y de su forma geométrica. Existen en la literatura modelos para estimar su valor en función de estos parámetros [12].
- Los gradientes térmicos pueden medirse con termómetros de resistencia de platino (insertos en las paredes de la cavidad) conjuntamente con termómetros de radiación de ángulo sólido agudo, vía la medición del campo de temperatura en la zona de interés.

**Termómetro patrón de resistencia de platino.** El patrón debe:

- estar calibrado,
- presentar evidencias de que su inmersión en las paredes que forman la cavidad es adecuada, es decir, que la inmersión es mayor que cualquiera de aquellas donde el termómetro muestra dependencia con la posición del sensor y

- 
- verificarse periódicamente su  $R_0$  en un baño de hielo.

**Termómetro de radiación patrón.** El patrón debe:

- estar calibrado y
- tener caracterizada su dependencia del valor medido como función de la distancia del mismo a la fuente radiante.

## 6. Trazabilidad de las mediciones

### Definiciones:

*Trazabilidad:* Propiedad del resultado de una medición o de un patrón, tal que ésta pueda ser relacionada con referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas incertidumbres determinadas [6].

### NOTAS

- Este concepto se expresa frecuentemente por el adjetivo trazable.
- La cadena ininterrumpida de comparaciones es llamada cadena de trazabilidad.

*Patrón:* Medida materializada, aparato de medición o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad, o uno o varios valores conocidos de una magnitud, para servir de referencia [6]. Un material de referencia certificado también es un patrón de medición.

*Calibración:* Conjunto de operaciones que establecen bajo condiciones especificadas, la relación entre los valores indicados por un aparato o sistema de medición o los valores representados por una medida materializada y los valores correspondientes de la magnitud realizada por los patrones [6].

*Verificación:* Confirmación y provisión de evidencia objetiva de que se han cumplido los requisitos especificados [7].

Los aspectos relacionados con la trazabilidad de las mediciones deben ser acordes con lo dispuesto en la política de la ema al respecto y cumplir con los requisitos de la sección 5.6 de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000.

Una carta de trazabilidad completa debe indicar los valores de las incertidumbres de cada uno de los instrumentos que incluye e información de sus informes de calibración.

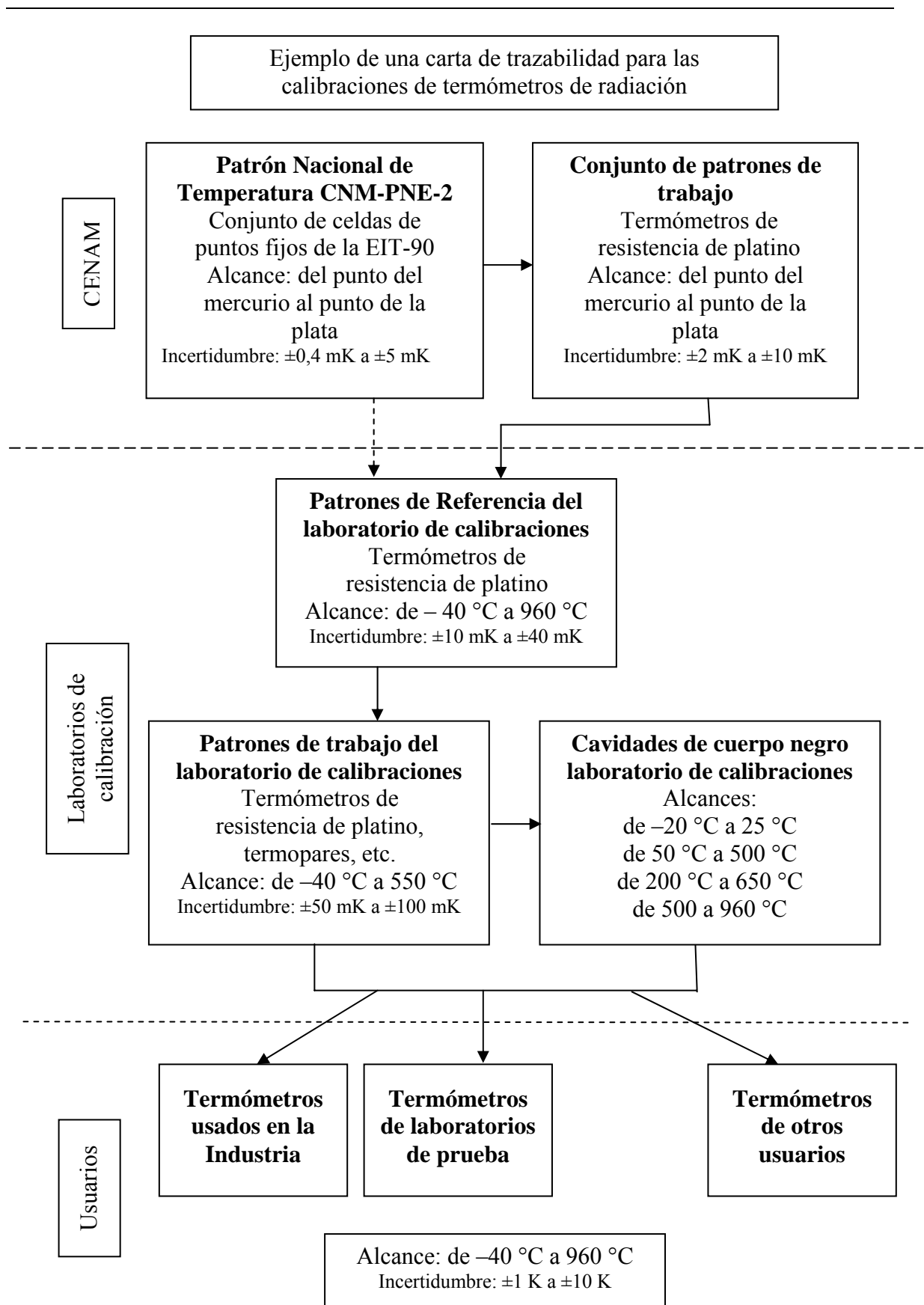
---

**Nota para el evaluador:**

La trazabilidad a patrones nacionales, de las mediciones realizadas con los patrones de referencia o de trabajo que son utilizados por el laboratorio solicitante, será obtenida de sus calibraciones y demostrada por:

- certificados o informes de calibración, cuya vigencia es validada por verificaciones intermedias (entre calibraciones subsecuentes),
- registros en cartas de control que el laboratorio lleve a cabo para dichos patrones y que pueda presentar como evidencia y

sólo puede considerarse completa si se cuenta con una estimación correcta de la incertidumbre de las mediciones que son obtenidas con esos patrones



## 7. Estimación de la incertidumbre de medición

La tabla 2 contiene a los componentes de incertidumbre del mesurando que se deben de tomar en consideración para los esquemas de calibración de esta guía.

Componentes de incertidumbre	Descripción de la componente	Esquema	
		4.3.1	4.3.2
Fuente radiante	De la medición de su temperatura	X	X
	Del valor de su emisividad	X	X
Instrumento bajo calibración	Lecturas	X	X
	Efecto del tamaño de la fuente	Véase sección 7.4	
	Distancia de calibración	X	X
	Compensación por ajuste de emisividad	-	X

### 7.1 Componente de incertidumbre: termómetro patrón

Para esta componente debe considerarse lo siguiente:

- la calibración del termómetro patrón,
- la resolución del termómetro patrón,
- la dispersión de las lecturas que se realizan con el termómetro patrón.

### 7.2 Componente de incertidumbre: emisividad de la fuente radiante

#### 7.2.1 De la emisividad intrínseca de la pared de la fuente radiante isotérmica que se observa dentro del campo visual del IBC

Una forma de determinar la incertidumbre de la emisividad intrínseca, es con la ecuación siguiente [8]:

$$u(\varepsilon_{bb, w}) \approx \frac{1 - \varepsilon_{bb}}{1 - \varepsilon} u(\varepsilon)$$

donde:

- $\varepsilon_{bb}$  emisividad efectiva de la fuente radiante,  
 $\varepsilon$  emisividad intrínseca del material que recubre a la pared de la fuente radiante,

---

$u(\varepsilon)$  incertidumbre de la emisividad intrínseca del recubrimiento.

### 7.2.2 Incertidumbre de la emisividad que se debe a condiciones no isotérmicas

Cuando no se pueden asegurar condiciones isotérmicas en las paredes que forman a la fuente radiante, se requiere la medición de la distribución de temperaturas en ellas, por ejemplo mediante el uso de un termómetro de radiación de buena resolución y campo visual agudo. Si las desviaciones a condiciones isotérmicas fueran pequeñas, la estimación de la incertidumbre de la emisividad efectiva de la fuente puede realizarse con métodos numéricos de simulación basados en el método de Monte Carlo.

Cuando las desviaciones a condiciones isotérmicas son grandes, se puede hacer la estimación de la incertidumbre bajo la suposición que sólo la pared del fondo se encuentra a una temperatura menor con respecto a la que se tendría en cualquiera otra región de la cavidad, con un valor máximo  $\Delta T$ , que llevaría al valor de la emisividad de la cavidad a un valor mínimo. Si se asocia una distribución rectangular con valor medio igual a cero al error debido a los gradientes de temperatura, la incertidumbre de la emisividad por gradientes de temperatura se puede determinar con la siguiente ecuación [8]:

$$u(\varepsilon_{bb, T}) \approx \frac{c_2(1-\varepsilon)|\Delta T|}{\sqrt{3}\lambda_{T_i} T_i^2 [1 - \exp(-c_2/\lambda_{T_i} T_i)]}$$

Donde  $T_i$  se refiere a cada uno de los valores de las temperaturas de calibración expresados en kelvin y  $\lambda_{T_i}$  son las longitudes de onda efectivas limitantes que les corresponden, de acuerdo con la ecuación B.1 y calculadas con coeficientes dados en la tabla B.1 del Anexo B.

### 7.2.3 Coeficientes de sensibilidad para las incertidumbres de la emisividad de la fuente

- La combinación de las incertidumbres de la emisividad de la fuente radiante con otras incertidumbres del proceso de calibración, requiere que las primeras, mediante el uso de coeficientes de sensibilidad, se expresen en unidades de temperatura.
- Con el auxilio de métodos de simulación numérica, se puede determinar el efecto que un cambio de emisividad de la fuente tiene en la temperatura de radiancia medida con el IBC y con ello obtener los coeficientes de sensibilidad requeridos, tal como se muestra en un ejemplo en la sección A.1.2 del Anexo A.

---

### 7.3 Componente de incertidumbre: lecturas del IBC

Para esta componente debe considerarse lo siguiente:

- la dispersión de las lecturas que se obtienen con el IBC,
- la resolución de la pantalla de desplegados del IBC.

### 7.4 Sobre la incertidumbre que se debe al efecto del tamaño de la fuente

Idealmente, las lecturas de un termómetro de radiación debieran ser independientes del tamaño de la fuente de radiación que se mide, siempre que la imagen de la fuente, formada dentro del IBC, cubra totalmente el área de su detector. Sin embargo, experimentalmente se observa que esto no es así.

El efecto del tamaño de la fuente se puede determinar por dos métodos: “directo” e “indirecto”, con resultados similares [8]. La descripción de estos métodos está más allá del alcance de la Guía, sin embargo, para tener una idea de los métodos, se describe uno de ellos.

Si al efecto del tamaño de la fuente se le describe con:

$$\sigma(D, D_0) = \frac{S(L, D) - S(L, D_0)}{S(L)}$$

donde  $D$  es el diámetro de una fuente de radiancia uniforme,  $D_0$  es un diámetro de referencia arbitrario y  $L$  es la radiancia de la fuente entonces, en el método indirecto,  $D_0$  es el diámetro de una zona oscura centrada en la fuente de radiancia. En este caso,  $S(L)$  es la señal obtenida al observar a la fuente de radiancia sin obstrucción de la zona oscura y  $S(L, D)$  es la señal obtenida al observar a la fuente con una zona oscura central que tiene el diámetro  $D$  de la fuente y  $S(L, D_0)$  es la señal obtenida cuando a la fuente se le coloca enfrente una abertura variable con su diámetro ajustado al tamaño de la zona oscura central.

Cuando se conoce la función del efecto del tamaño de la fuente, es conveniente realizar correcciones a los valores medidos y estimar sus incertidumbres.

El propósito de esta Guía no está dirigido a la determinación de esas correcciones ni sus incertidumbres, sino a la calibración de un termómetro de radiación a diferentes distancias, para que el usuario conozca las variaciones del error del instrumento por esta causa.

Por esta razón, en esta Guía, no se solicita estimar una incertidumbre para el efecto del tamaño de la fuente.

---

## 8. Validación de métodos

El laboratorio deberá validar sus métodos de calibración mediante:

- La presentación de evidencias de que sus patrones se encuentran calibrados.
- Que la calibración cubre los intervalos de temperatura de los servicios ofrecidos.
- La presentación de evidencias objetivas y documentadas sobre la emisividad de sus fuentes radiantes.

La participación en comparaciones es muy recomendable como parte de la validación de métodos.

## 9. Buenas prácticas de medición

Se recomienda seguir las siguientes prácticas, orientadas a mejorar la validez de los resultados:

### Para el termómetro patrón de resistencia de platino

Se deberá comprobar que sus lecturas no dependen de la profundidad de inmersión en la pared de la fuente radiante.

Se deberá verificar el valor de su  $R_0$  en un baño de hielo.

### Para el termómetro de radiación patrón

Se deberá asegurar la limpieza de su sistema óptico.

Se debe sujetar con soportes mecánicos para asegurar su posición y alineación.

### Para la fuente radiante

Deberá esperarse un tiempo razonable, posterior al momento en que su indicador de temperatura permanezca sin cambios. Se deberá contar con estudios documentados que suministren información sobre los tiempos requeridos para que el equipo alcance su estabilidad.

En el caso de plato caliente, se debe contar con el conocimiento de su emisividad espectral,  $\epsilon(\lambda)$ , en la banda espectral de respuesta del IBC.

Nota: Si la respuesta espectral del IBC no está contenida en el intervalo de la respuesta espectral del termómetro patrón y la fuente radiante no es un cuerpo negro, entonces es

---

muy recomendable que el laboratorio verifique la validez de las correcciones que se calculan.

### **Para el IBC**

El instrumento se deberá mantener por al menos 48 horas en un ambiente con humedad menor que 70%.

Se deberá verificar que el sistema óptico del IBC se encuentre limpio de polvo y manchas. Si fuera necesario realizar una limpieza, se deben seguir las indicaciones del fabricante.

Se debe realizar la calibración con un juego de pilas nuevas, o con un eliminador de batería.

Se debe sujetar con soportes mecánicos para asegurar su posición y alineación.

### **Para la toma de lecturas**

Se recomienda que las indicaciones de temperatura obtenidas con el IBC, se comparen con el promedio de las dos indicaciones del termómetro patrón obtenidas antes y después de tomar una lectura con el IBC.

Se sugiere que el número de repeticiones de lecturas, obtenidas de la manera que se describe en el párrafo anterior, sea mayor que 3.

## **10. Referencias bibliográficas**

- [1] National Institute for Standards and Technology; “The NIST reference for Constants, Units and Uncertainty”; páginas electrónicas de la Internet para “first radiation constant for spectral radiance” y “Stefan-Boltzmann constant”: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants>.
- [2] Preston-Thomas, H.; The International Temperature Scale of 1990; Metrologia 27; 1990; pp 3-10.
- [3] Nutter, G. D. “Radiation Thermometers”, Capítulo 4 de “Theory and Practice of Radiation Thermometers”, editado por D. P. De Witt y Gene D. Nutter; John Wiley & Sons; Nueva York; 1989; pp 250-252.
- [4] Norma Industrial Japonesa; “General rules for expression of the performance of radiation thermometers”; JIS C 1612.
- [5] Organización Internacional de Metrología Legal; “Total Radiation Pyrometers”; Documento Internacional D24 1996 (E).
- [6] Norma NMX-Z-055-1997-IMNC: “Metrología – Vocabulario de términos fundamentales y generales”.

- 
- [7] Norma NMX-CC-9000-IMNC-2000 Sistemas de gestión de la calidad – Fundamentos y vocabulario.
  - [8] Grupo de trabajo 5 para Termometría de Radiación del CCT, “Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point”; Documento en preparación, 2006.
  - [9] Leftwich, R. F.; “Wide Band Radiation Thermometers”, Capítulo 7 de “Theory and Practice of Radiation Thermometers”, editado por D. P. De Witt y Gene D. Nutter; John Wiley & Sons; Nueva York; 1989; pp 505-506.
  - [10] Li, W.; “Calibration of infrared thermometers at emissivity settings less than 1”; Memorias de *TEMPMEKO 2001, 8th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*, editado por B. Fellmuth, J. Seidel, G. Scholz, VDE Verlag GmbH, Berlin; 2002; pp 735-740,.
  - [11] Nutter, G. D.; “Spectral Band Radiation Thermometers”, Capítulo 5 de “Theory and Practice of Radiation Thermometers”, editado por D. P. De Witt y Gene D. Nutter; John Wiley & Sons; Nueva York; 1989; pp 424.
  - [12] Bedford, R. E. Capítulo 12 de “Theory and Practice of Radiation Thermometers”, editado por D. P. De Witt y Gene D. Nutter; John Wiley & Sons; Nueva York; 1989.

---

## Anexo A

### Ejemplo del cálculo de las compensaciones introducidas por un termómetro de radiación que opera a un ajuste de emisividad distinto de 1

En la literatura se pueden encontrar varias propuestas para determinar una compensación al valor de temperatura medido de un objeto que no es un cuerpo negro, en función de su emisividad y su temperatura [9, 10].

En general, el valor de la emisividad suele variar para las diferentes longitudes de onda del espectro emitido por una fuente de radiación y para las diferentes temperaturas a las que la fuente se pueda encontrar.

Sin embargo, se puede determinar un valor de emisividad promedio de la fuente de radiación para la banda de respuesta espectral del patrón y del IBC que pueda manejarse como si fuera independiente de las longitudes de onda de esa banda.

Con un valor de emisividad tal, la señal de salida  $B(T)$  que produce la radiancia de una fuente de radiación que no es un cuerpo negro, se compensa mediante el cociente de esa señal y esa emisividad [11]:

$$B'(T) = \frac{B(T)}{\varepsilon} \quad (\text{A.1})$$

De esta manera, se obtiene un valor de señal que sería equivalente al de un cuerpo negro que se encuentra a la misma temperatura del objeto que se mide y con este valor determinar el valor de la temperatura de la fuente.

#### A1.1 Banda de respuesta espectral de los termómetros de radiación de banda ancha

Un inconveniente para realizar mediciones de temperatura con termómetros de radiación es la transmitancia del medio que hay entre el objeto medido y el instrumento. Por ejemplo, una atmósfera con vapor de agua y  $\text{CO}_2$  es poco “transparente” para ciertas regiones del espectro infrarrojo que puede coincidir con la región espectral de detección del IBC.

Una solución práctica para tal problema es utilizar filtros ópticos para medir la radiancia en una región espectral específica. Por eso, muchos termómetros de radiación utilizan la banda de  $8 \mu\text{m}$  a  $14 \mu\text{m}$ , en la cual la transparencia de la atmósfera es adecuada para muchas aplicaciones.

---

### A1.2 Señal que se produce en un termómetro de radiación, que opera basado en la generación de una fuerza electromotriz (FEM) en una termopila

De acuerdo con [10], la señal de salida de un termómetro de banda ancha, que opera basado en la generación de señal en una termopila, se puede determinar con la ecuación siguiente:

$$B(T) = \varepsilon_F \left[ \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_{\lambda}(T_F) d\lambda - \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_{\lambda}(T_R) d\lambda \right] \quad (A.2)$$

Donde:

- $\varepsilon_F$  es el ajuste de emisividad con el que opera el termómetro, que en el mejor de los casos corresponde al valor de emisividad de la fuente que se mide,
- $L_{\lambda}(T_F)$  es la radiancia espectral de un cuerpo negro que se encuentra a la temperatura  $T_F$  de la fuente que se mide, en kelvin, la cual es indicada por el instrumento que se calibra,
- $L_{\lambda}(T_R)$  es la radiancia espectral de un cuerpo negro que se encuentra a la temperatura  $T_R$  de las paredes del recinto donde se realizan las mediciones, en kelvin,

$\lambda_1, \lambda_2$  son las longitudes de onda extremas del filtro pasabanda que define a la respuesta espectral del termómetro.

La ecuación A.2 es válida si se cumplen las siguientes condiciones:

- El elemento transductor del detector del instrumento, es una termopila
- La respuesta del detector es plana en la banda de respuesta del instrumento.
- El detector del instrumento se encuentra a la misma temperatura que la del recinto donde se efectúan las mediciones,
- El objeto que se mide se comporta como un cuerpo gris, es decir, que el valor de su emisividad es independiente de las longitudes de onda del espectro emitido por él, en la banda de respuesta del instrumento.

### A1.2 Determinación del valor compensado de temperatura de un objeto con emisividad $\varepsilon < 1$

Cuando se conocen las longitudes de onda que delimitan a la banda de respuesta del instrumento, la ecuación A.2 puede resolverse mediante integración numérica para diferentes valores de emisividad, en función de la temperatura  $T_F$  de la fuente que se mide y  $T_R$  del recinto donde se llevan a cabo las mediciones.

La tabla A1 muestra los valores de  $B(T)$  obtenidos con la ecuación A.2 para  $T_F$  igual a 373,15 kelvin (100 °C) y 376,55 kelvin (103,2 °C), para un termómetro que opera con un filtro pasabanda de  $\lambda_1 = 8$  mm a  $\lambda_2 = 14$  mm, para  $\varepsilon = 1$  y  $T_R = 295,15$  kelvin (22 °C). Los valores mostrados de  $B'(t_F)$  en la tabla para  $\varepsilon = 0,95$  se obtuvieron al dividir los valores de  $B(t_F)$  con este valor de emisividad.

---

**Nota:**

Para los cálculos, se usaron valores de temperatura termodinámica (en kelvin), denotados con  $T$  (mayúscula), que luego se hicieron corresponder a los valores de temperatura práctica (en °C) que se dan en la tabla A1, denotados con  $t$  (minúscula).

De acuerdo con los valores dados en la tabla, un cuerpo negro que se encontrara a 100 °C, debiera producir una señal de salida  $B(t_F) = 85,8$  unidades arbitrarias (u.a.), en el detector de un termómetro que opera con la banda de respuesta descrita. Si el termómetro se ajustara a  $\varepsilon = 1$ , el valor de 85,8 u. a., correspondería a un valor de temperatura medido igual a 100 °C, mismo que sería desplegado en su pantalla de lecturas.

<b>Tabla A1</b>		
Valores obtenidos para $B(t_F)$ y $B'(t_F)$ con los valores de emisividad indicados, para un termómetro con banda de respuesta de 8 $\mu\text{m}$ a 14 $\mu\text{m}$ , cuando $t_R = 22$ °C		
$\varepsilon_F$	1,00	0,95
$t_F/^\circ\text{C}$	$B(t_F) / (\text{u. a.})$	$B'(t_F) / (\text{u. a.})$
<b>100</b>	<b>85,8</b>	<b>90,3</b>
<b>103,2</b>	<b>90,3</b>	<b>95,1</b>

Pero cuando ese termómetro se operara ajustado a  $\varepsilon = 0,95$ , el instrumento calcularía un valor de señal compensado  $B'(t_F)$  igual 90,3 u. a., que correspondería a un valor de temperatura medido de 103,2 °C.

Estos resultados tienen las siguientes interpretaciones:

- Si el objeto que se mide fuera un cuerpo negro a 100,0 °C, la señal producida en el detector del termómetro ajustado a  $\varepsilon = 1$ , sería igual a 85,8 u.a.
- Si el objeto que se mide fuera un cuerpo negro a 103,2 °C, la señal producida en el detector del termómetro ajustado a  $\varepsilon = 1$ , sería igual a 90,3 u.a.
- Si el objeto fuera un cuerpo gris a 103,2 °C y su emisividad valiera 0,95, se produciría en el detector una señal que sería el 95 % de la producida por un cuerpo negro a esa temperatura, es decir: 90,3 u. a.  $\times$  0,95 = 85,8 u. a.
- Si el cuerpo gris citado en (c), se midiera con el termómetro ajustado a  $\varepsilon = 1$ , el valor de temperatura desplegado sería 100 °C, que corresponde a una señal de 85,8 u. a. El error se debería a que el ajuste en el instrumento no corresponde a la emisividad del objeto.
- Si el cuerpo gris citado en (c), se midiera con el termómetro ajustado a  $\varepsilon = 0,95$ ; el valor de señal de 85,8 u. a. sería compensado a 90,3 u. a. y el valor de temperatura desplegado sería 103,2 °C. En este caso, el valor ajustado en el instrumento, correspondería a la emisividad del objeto.

- f. Cuando el objeto que se mide es un cuerpo negro a 100 °C y el termómetro opera ajustado a  $\varepsilon = 0,95$ ; la señal producida sería igual a 85,8 u. a., la cual sería compensada y llevada al valor de 90,3 u. a. En este caso el valor desplegado sería 103,2 °C.

Del comentario dado en el inciso (f), se puede inferir que el valor de compensación introducido por el instrumento, al operar ajustado a un valor de emisividad distinto de 1, corresponde a la diferencia de las dos temperaturas calculadas, para la señal compensada y sin compensar:

$$\text{Compensación} = t_F(B_{\text{compensada}}) - t_F(B_{\text{sin compensar}})$$

### Ejemplo A.1

¿Cuál es el valor de compensación introducido a la temperatura indicada de 103,2 °C por un termómetro que opera a un ajuste de emisividad a  $\varepsilon = 0,95$  si el instrumento trabaja con una banda de respuesta de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ ?

#### Solución:

De acuerdo con los valores mostrados en la tabla A1, el valor de temperatura que se determina para una señal de 90,3 u. a., es:

$$t_F \Big|_{B=90,3 \text{ u. a.}} = 103,2 \text{ °C}$$

Se sabe que el instrumento calcula este valor de temperatura a partir de una señal compensada. De acuerdo con la ecuación A.1, se puede determinar el valor de la señal sin compensación, de la manera siguiente:

$$B(t_F) = \varepsilon B'(t_F) = 0,95 \times 90,3 \text{ u. a.} = 85,8 \text{ u. a.}$$

El valor de temperatura que corresponde a la señal sin compensar es:

$$t_F \Big|_{B=85,8 \text{ u. a.}} = 100,0 \text{ °C}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \text{Compensación} &= 103,2 \text{ °C} - 100,0 \text{ °C} \\ &= 3,2 \text{ °C} \end{aligned}$$

### A1.3 Coeficientes de sensibilidad para los valores de las compensaciones calculadas

Al calcular las compensaciones de las temperaturas medidas con un termómetro que opera ajustado a un valor de emisividad distinto de 1, para un intervalo de temperaturas cercanas

---

de la temperatura de calibración, se puede obtener un coeficiente de sensibilidad para las incertidumbres de la compensación calculada.

La figura A1 muestra los resultados de un cálculo tal, para un termómetro que opera ajustado a  $\varepsilon = 0,95$  y tiene una banda de respuesta de 8 mm a 14 mm, donde las compensaciones, a cada temperatura una de las temperaturas del eje x, se calcularon de la manera que se describe en el ejemplo A1.

El valor absoluto de la pendiente de la curva mostrada en la figura, se puede usar como el coeficiente de sensibilidad que se requiere para determinar las incertidumbres de las compensaciones calculadas que provienen de la incertidumbre de la resolución de las lecturas del termómetro que se calibra.

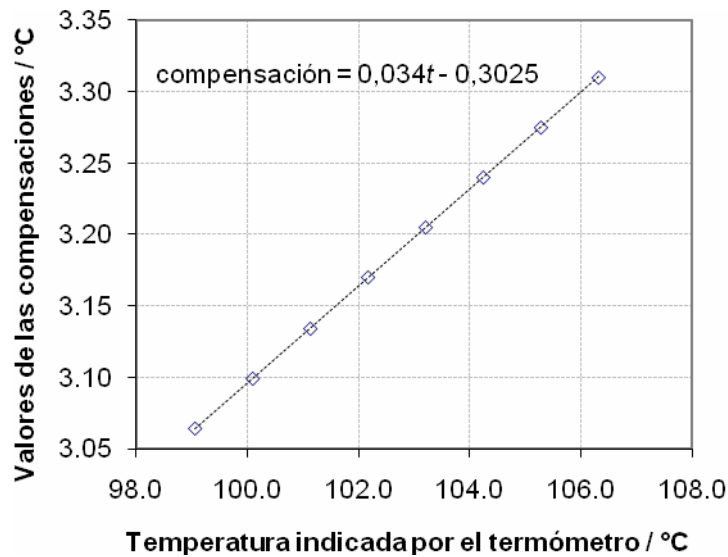


Fig. A1. Compensaciones calculadas, alrededor de 103,2 °C que es la temperatura indicada por el instrumento en el ejemplo A.1.

### Ejemplo A3

Determinar la incertidumbre de la compensación calculada en el ejemplo A.1, si la resolución del IBC es 1 °C.

#### Solución

La incertidumbre de la resolución del instrumento, con una distribución de probabilidad rectangular asociada, tiene el valor siguiente:

$$u_{\text{resolución}}(t_{\text{IBC}}) = \frac{\pm 1^{\circ}\text{C}}{\sqrt{12}} = \pm 0,29^{\circ}\text{C}$$

La incertidumbre de la compensación, se obtiene de multiplicar la incertidumbre de la resolución del IBC por la pendiente de la curva de la figura A1 (el coeficiente de sensibilidad), o sea:

$$u_{\text{compensación}}(t_{\text{IBC}}) = 0,034 \cdot (\pm 0,29^{\circ}\text{C}) = \pm 0,01^{\circ}\text{C}$$

#### A1.4 Variación de los valores de temperaturas de radiancia calculadas en función de la emisividad del objeto

La tabla A2 muestra los valores de  $t_R$ , las temperaturas de radiancia calculadas a partir de valores de señales empobrecidas por la emisividad del objeto.

<b>Tabla A2</b>		
Valores de temperaturas de radiancia calculadas para señales empobrecidas $B_G(t_F)$ por la emisividad indicada para el objeto, para la banda de 8 $\mu\text{m}$ a 14 $\mu\text{m}$		
$\varepsilon$	$B_G(t_F) / \text{u. a.}$	$t_{\text{RAD}} / ^{\circ}\text{C}$
0,99	84,9	99,4
0,98	84,1	98,8
0,97	83,2	98,1
0,96	82,4	97,5
0,95	81,5	96,9

Para los resultados mostrados en la tabla, se usó como punto de partida el valor de  $B(t_F)$  igual a 85,8 u. a. que se obtiene con la ecuación A.2, cuando  $t_F$  es la temperatura de un cuerpo negro a 100 °C y  $t_R$  es 22 °C. Luego se obtuvieron los valores de  $B_G(t_F)$ , al multiplicar el valor de 85,8 u. a. por los valores de emisividad indicados en la primera columna.

---

Las temperaturas de radiancia de la tercera columna, se calcularon para la banda de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ , en un proceso iterativo inverso al solicitado por la ecuación A.2. Es decir, se buscaron los valores de  $t_F$  correspondientes, para los cuales  $B(T)$  tiene los valores que se dan en la segunda columna de la tabla.

Al graficar los valores de temperatura dados en la tabla A2, en función de la emisividad del objeto, como se muestra en la figura A1, se observa la variación de las temperaturas de radiancia medidas del objeto.

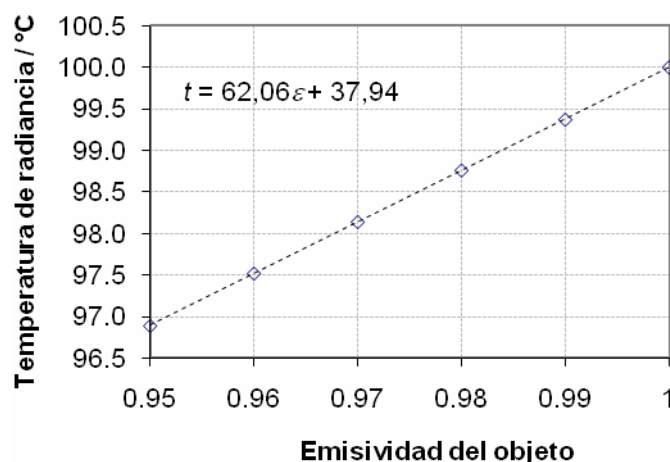


Figura A1. Temperaturas de radiancia de un objeto en función de su emisividad, cuando ellas se calculan para una banda de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ .

El valor absoluto de la pendiente de la curva ahí mostrada, puede usarse como coeficiente de sensibilidad para los determinar las incertidumbres relacionadas con la emisividad de la fuente radiante usada para la calibración.

---

### **Ejemplo A3**

Determinar la incertidumbre de la temperatura de radiancia medida de la fuente a la temperatura de calibración de 100 °C, debida a que su emisividad tiene un valor igual a 0,99 con una incertidumbre de  $\pm 0,01$  y tiene asociada una función de probabilidad con distribución rectangular.

### **Solución**

El coeficiente de sensibilidad para la incertidumbre de la emisividad de la fuente, a la temperatura de calibración de 100 °C, es el valor absoluto de pendiente de la curva que se muestra en la figura A1, de manera que la incertidumbre de la temperatura de radiancia medida es:

$$u(\varepsilon_F) = \frac{\pm 0,01 \cdot |-62,1^\circ\text{C}|}{\sqrt{3}} = \pm 0,36^\circ\text{C}$$

---

## Anexo B

### Longitud de onda efectiva limitante

Cuando un termómetro de radiación permite medir la señal de salida de su detector, se le puede calibrar a diferentes puntos de referencia para encontrar los coeficientes de alguna función de interpolación, como la siguiente ecuación [8]:

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT + B}\right)} \quad (\text{B.1})$$

Donde  $c_2$ , es la segunda constante de radiación,  $C$  es una constante de proporcionalidad,  $A$  y  $B$  constantes de la función, determinadas en la calibración.

A A.3 se le conoce como la ecuación de Sakuma-Hattori, la cual ofrece la gran ventaja de determinar la temperatura de radiancia, sin requerir la respuesta espectral del termómetro de radiación. Sin embargo, tiene limitaciones importantes, particularmente cuando se trata de termómetros de banda ancha.

La tabla A.2 da valores aproximados de  $A$  y  $B$  para termómetros con bandas de respuesta espectral simétricas centradas en  $\lambda_0$ , y también valores determinados para longitudes de onda efectivas limitadoras, en función de la temperatura medida con el termómetro que se calibra. Tales longitudes de onda se determinan con la ecuación siguiente, para cada temperatura de calibración [8]:

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

<b>Tabla B.1</b>					
Valores aproximados para las constantes A y B de la ecuación de Sakuma-Hattori					
<b>Respuesta espectral del termómetro/<math>\mu\text{m}</math></b>	<b>A/<math>\mu\text{m}</math></b>	<b>B/<math>\mu\text{m}\cdot\text{K}</math></b>	<b><math>\lambda_0 / \mu\text{m}</math></b>	<b>Intervalo de temperatura/ <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Intervalo para <math>\lambda_T / \mu\text{m}</math></b>
0,9	0,896	5,91	0,899	420 - 1085	0,914 - 0,905
1,6	1,58	5,16	1,590	150 - 962	1,604 - 1,588
3,9	3,90	1,80	3,904	20 - 962	3,912 - 3,903
8 - 14	9,61	151	11,00	-40 - 500	10,95 - 10,00

---

## Anexo C.

### Algunas definiciones de termometría de radiación

#### Radiación electromagnética

Cualquier objeto que tenga una temperatura mayor que 0 kelvin, emite energía que se conoce como *radiación electromagnética*, la cual se divide en regiones que se llaman *espectros*, que dependen de su longitud de onda.

Entre los espectros más comunes están: el ultravioleta, el visible y el infrarrojo. El infrarrojo se divide en: el infrarrojo cercano, el infrarrojo de longitudes de onda medias y el infrarrojo de longitudes de onda grandes.

#### Radiancia de un cuerpo negro, ley de Planck

Un cuerpo negro es una fuente que emite radiación electromagnética de acuerdo con la ley de Planck:

$$L_{CN}(\lambda, T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad [W \cdot m^{-3} \cdot sr^{-1}]$$

Donde:

$c_{1L}$  es la primera constante de radiación para radiancia espectral, con valor igual a  $1,191\,042\,759 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$  [1].

$\lambda$  Es la longitud de onda, en m.

$c_2$  Segunda constante de radiación, con un valor igual a  $1,4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$  [2].

$T$  Temperatura del cuerpo negro, en kelvin.

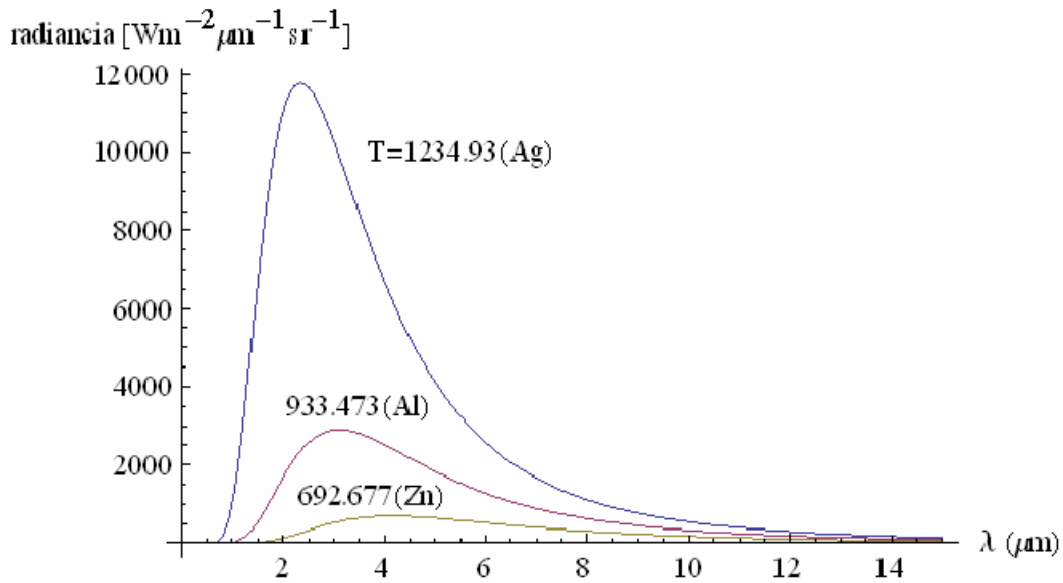
$L_{CN}(\lambda, T)$  es la radiación electromagnética emitida, llamada *radiancia espectral* porque involucra propiedades físicas de la fuente, como son:

- la potencia radiada, en W,
- el área de la fuente, en  $\text{m}^2$ ,
- el ángulo sólido, en sr.

Ejemplos de radiancia espectral se muestran en la figura 1.

#### Termometría de radiación

La temperatura de un objeto se puede medir a partir de su radiancia espectral. Un termómetro que funcione así se llama **termómetro de radiación**, y la temperatura medida se llama **temperatura de radiancia**.



**Figura 1.** Radiancia espectral de tres cuerpos negros de punto fijo. El punto fijo del oro, aluminio y zinc.

### Ley de Wien

Cuando se cumple  $c_2/\lambda T \gg 1$ , se puede emplear la ley de Wien para la radiancia espectral de un cuerpo negro:

$$L_{CN}(\lambda, T) \approx \frac{c_{1L}}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}]$$

### Emisividad de superficies reales

La radiancia de un objeto real,  $L_{sup}$ , y la radiancia de un cuerpo negro,  $L_{CN}$ , están relacionadas a través de la emisividad, como se indica en el siguiente cociente:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{L_{sup}(\lambda, T)}{L_{CN}(\lambda, T)}$$

Algunos fabricantes de termómetros de radiación, sino es que la mayoría, suponen un valor constante de emisividad para cualquier objeto o fuente, es decir independiente de la temperatura y la longitud de onda. Sin embargo, en la mayoría de los casos no se cumple: la emisividad de los cuerpos en general depende tanto de su temperatura como de la longitud de onda. Solamente para un cuerpo negro ideal se cumple que el valor de su emisividad es independiente de su temperatura y de la longitud de onda.

---

## Escala internacional de temperatura (EIT-90)

La escala internacional de temperatura, entre el triple punto de equilibrio del hidrogeno (13,8033 K) y el punto de solidificación de la plata (961,78 °C),  $T_{90}$  está definida por medio de termómetros de resistencia de platino calibrados, a través de un conjunto de puntos fijos, con procedimientos de interpolación específicos [2].

Arriba del punto fijo de la plata,  $T_{90}$  está definida por la siguiente ecuación:

$$\frac{L_{\lambda}(T_{90})}{L_{\lambda}[T_{90}(X)]} = \frac{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_{90}(X)}\right) - 1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_{90}}\right) - 1}$$

Donde:

$L_{\lambda}(T_{90})$  y  $L_{\lambda}[T_{90}(X)]$  son las concentraciones espectrales de las radiancias de un cuerpo negro, a la longitud de onda  $\lambda$ , a las temperaturas  $T_{90}$  y  $T_{90}(X)$ , respectivamente;  $T_{90}(X)$  se refiere a la temperatura del punto de solidificación que puede ser cobre, oro o plata, y  $c_2 = 0,014388 \text{ m}\cdot\text{K}$ .

Nota: la EIT-90 establece el cociente de radiancias espectrales (ecuación anterior), para medir temperaturas superiores al punto de solidificación de la plata. Para temperaturas inferiores se emplean termómetros de resistencia de platino.

## Ecuación de medición

El termómetro de radiación mide la concentración de radiancia que incide sobre su detector, que puede ser de tipo térmico o fotoeléctrico, y que como respuesta entrega una señal de salida,  $S$  con unidades de corriente o tensión eléctrica. La ecuación del termómetro de radiación, en su forma general, es la siguiente [3]:

$$S = \int_0^{\infty} R_i(\lambda) L_{\lambda}(\lambda) d\lambda$$

Donde:

$R_i$  es la respuesta de radiancia espectral del instrumento

$L_{\lambda}$  es la radiancia espectral incidente en el detector

## Termómetro de radiación de banda angosta

---

Es aquel que posee un filtro óptico que transmite un intervalo estrecho de longitudes de onda. Este intervalo denominado ancho de banda espectral ( $\Delta_\lambda$ ) es en el orden de algunos nanómetros (nm).

### **Termómetro de radiación de banda ancha**

Es aquel que se caracteriza por tener un filtro óptico que transmite un intervalo amplio de longitudes de onda ( $\Delta_\lambda$ ), este intervalo es aproximadamente de algunos micrometros ( $\mu\text{m}$ )

### **Termómetro de radiación con emisividad menor que uno, fija o ajustable**

La temperatura de radiancia corregida, cuando el termómetro de radiación marca una emisividad, está dada por la siguiente ecuación:

$$T_c = \left( \frac{1}{T_{IBC}} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon_\lambda \right)^{-1}$$

Donde:

$T_{IBC}$  = temperatura que mide que mide el instrumento del cuerpo negro

$T_c$  = temperatura corregida

y el error de compensación  $\Delta_{comp}$ , está dada por:

$$\Delta_{comp} = T_c - T_{IBC}$$

El error de medición es:

$$Error_{IBC} = T_{IBC} - T_p - \Delta_{comp}$$

Con  $T_p$ , la temperatura medida por el termómetro patrón.