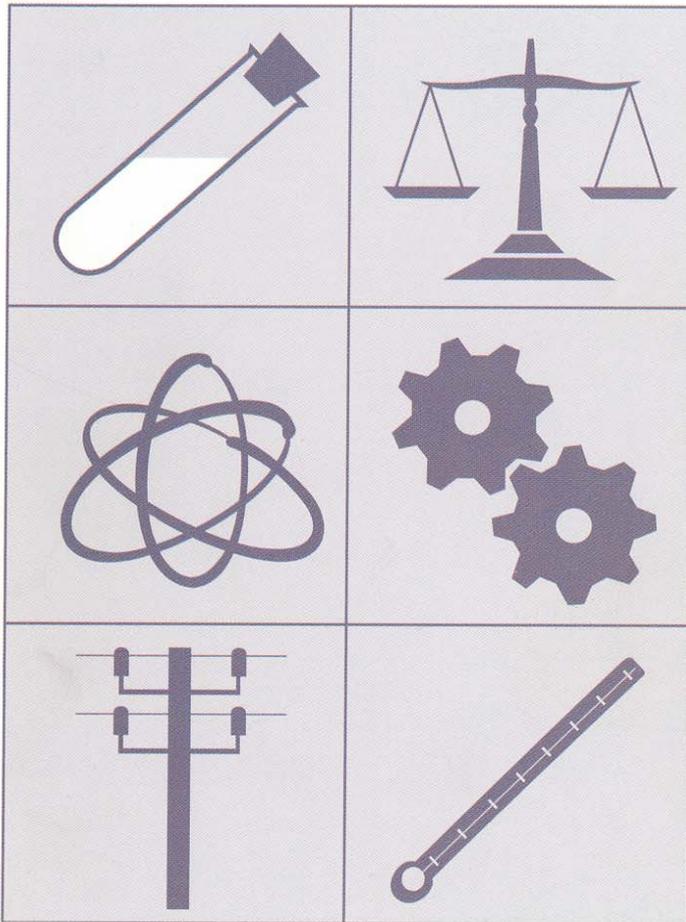


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



**PROCEDIMIENTO TH- 002 PARA LA
CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS
DE RADIACIÓN DE INFRARROJO**

m 08



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO

CEM

CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

Este procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, si ha sido necesario.

La presente edición se emite en formato digital. Hay disponible una edición en papel que se puede adquirir en nuestro departamento de publicaciones.

Este procedimiento de calibración es susceptible de modificación permanente a instancia de cualquier persona o entidad. Las propuestas de modificación se dirigirán por escrito, justificando su necesidad, a cualquiera de las siguientes direcciones:

Correo postal
Centro Español de Metrología
C/ del Alfar, 2,
28760 Tres Cantos, Madrid

Correo electrónico
cem@cem.es



ÍNDICE

	Página
1. OBJETO	4
2. ALCANCE.....	4
3. DEFINICIONES	4
4. GENERALIDADES	13
5. DESCRIPCIÓN.....	16
5.1. Equipos y materiales	16
5.2. Operaciones previas.....	16
5.3. Proceso de calibración	18
5.4. Toma y tratamiento de datos.....	21
6. RESULTADOS	23
6.1. Cálculo de incertidumbres	23
6.2. Interpretación de resultados.....	27
7. REFERENCIAS	28
8. ANEXOS.....	31



1. OBJETO

El objeto de este procedimiento es establecer y definir la sistemática a seguir en las calibraciones de termómetros de radiación (TR) de banda ancha por comparación a termómetros de radiación patrón calibrados con referencia a la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) [2] en cuerpos negros (CN). Según la Clasificación de instrumentos de Metrología de Temperatura [3], estos instrumentos se denominan “pirómetros ópticos (infrarrojos)” y su código de identificación es el 05.18, aunque prácticamente en la actualidad se denominan como termómetros de radiación de infrarrojo.

2. ALCANCE

Se refiere este procedimiento a la calibración de termómetros de radiación de infrarrojo, en el intervalo de 50 °C a 1000 °C para longitudes de onda en el rango del infrarrojo, según el detector que utilice el termómetro en cuestión.

Contempla tanto a los termómetros con salida eléctrica cuya señal es proporcional al flujo de radiación térmica recibida, como a los termómetros que además llevan incorporada una unidad de lectura directa de temperatura.

3. DEFINICIONES

Intensidad radiante [4]:

De una fuente en una dirección dada, es el cociente entre el flujo radiante que sale de la fuente, o de un elemento de la fuente, en un ángulo sólido elemental que contiene a dicha dirección y este ángulo sólido elemental. Símbolo I . Dimensiones W/sr.

Radiancia [4]:

En un punto de una superficie y en una dirección dada, es el cociente entre la intensidad radiante de un elemento de esta superficie y el área de



la proyección ortogonal de este elemento sobre un plano perpendicular a la dirección dada. Símbolo L . Dimensiones $W/(sr \cdot m^2)$.

Longitud de onda [4]:

Distancia, en la dirección de propagación de una onda periódica, entre dos puntos sucesivos en los que, en un instante dado, la fase es la misma. Símbolo λ . Dimensiones m.

Número de onda [4]:

Número utilizado para expresar la longitud de onda de una radiación. Se define como $1/\lambda$ inversa de la longitud de onda. Símbolo σ . Dimensiones de m^{-1} .

Primera constante de Planck [4]:

$$c_1 = 2\pi hc^2/n^2 = 3,741\ 774\ 9 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

Segunda constante de Planck [2]:

$$c_2 = hc/nk_B = 0,014\ 388 \text{ m} \cdot \text{K}$$

Cuerpo negro [5]:

Cuerpo ideal que absorbe completamente todo flujo radiante incidente independientemente de su longitud de onda y de su dirección, y emite flujo radiante a la máxima densidad espectral de exitancia radiante o radiancia en todas las longitudes de onda

Ley de radiación de Planck [6]:

La radiancia espectral de un cuerpo negro a la temperatura absoluta T y a la longitud de onda λ , $L(T, \lambda)$ en $W/(m^3 \cdot sr)$, se define de la siguiente forma:

$$L(T, \lambda) = \frac{c_1 \lambda^{-5} \pi^{-1}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$



donde $c_1 = \frac{2h\pi^2 c^2}{n^2}$ (que vale $3,74 \times 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$, si $n = 1$) y

$c_2 = \frac{hc}{nK_B}$ (que vale $1,4388 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$ si $n = 1$), son la primera y la

segunda constantes de radiación, respectivamente, siendo n el índice de refracción del medio de propagación, c la velocidad de la luz, h la constante de Planck y K_B la constante de Boltzmann. Esta $L(T, \lambda)$ es la que se integra para toda λ obteniéndose la radiancia definida anteriormente.

Ley de radiación de Wien [6]:

La radiancia de un cuerpo negro a la temperatura absoluta T y a la longitud de onda λ es proporcional a:

$$L_\lambda \propto \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T} \quad (2)$$

esta aproximación es válida cuando $c_2/\lambda T \ll 1$

Distancia al blanco y :

Distancia entre el blanco y el objetivo del termómetro o cualquier otra referencia indicada en el termómetro.

Tamaño del blanco d_b :

Diámetro del círculo localizado en el plano de enfoque, perpendicular a la línea de visualización del termómetro de radiación, que normalmente es circular y se define como el diámetro del círculo por el cual pasa a su través el 99 % de la potencia radiante recibida por el termómetro [7] (véase figura 1).

Campo de visión (en inglés FOV) o envolvente del campo de visión:

Superficie imaginaria que envuelve toda la radiación que sale del blanco y llega al detector (véase figura 1).

Relación de distancias y/d_b :



Relación entre la distancia al blanco y el tamaño del blanco.

Apertura angular α :

Ángulo definido por el campo de visión del termómetro (véase figura 1).

Diafragma de apertura D_a :

También llamada pupila de entrada, es el diafragma del termómetro que define la apertura angular. Puede ser la montura de la lente del objetivo del termómetro.

Apertura de campo :

Tamaño de la imagen de la fuente de radiación que llega al detector. Imagen del blanco sobre el detector.

Diafragma de campo:

Diafragma situado delante del detector que limita la apertura de campo y con la óptica define el tamaño del blanco (véase figura 1).

Relación de apertura o número f :

Definido como $f = y/D_a$ es una de las características del termómetro, en caso de termómetros de enfoque variable f corresponde a la distancia mínima de enfoque (y mínima).

Apertura de salida de cuerpo negro β :

Ángulo sólido envolvente de la radiación procedente de la fuente que se propaga sin obstáculos(véase figura 1).

Efecto del tamaño de la fuente:

Radiación de la fuente procedente de la superficie exterior al área del blanco, que alcanza el detector del termómetro de radiación. Se debe principalmente a: ganancia de radiación por difracción en el



diafragma de campo del termómetro de radiación; dispersión de radiación; reflexiones múltiples en las superficies ópticas y aberraciones en las lentes del objetivo.

Además de estas definiciones específicas, también son de aplicación las siguientes definiciones generales:

Calibración [8] (6.11)

Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.

NOTAS:

1 El resultado de una calibración permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando o bien determinar las correcciones a aplicar en las indicaciones.

2 Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metrológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.

3 Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento denominado, a veces, **certificado de calibración** o informe de **calibración**.

Desviación estándar experimental [8] (3.8)

Para una serie de n mediciones de un mismo mensurando, la magnitud s que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$



siendo x_i el resultado de la i -ésima medición y \bar{x} la media aritmética de los n resultados considerados:

NOTAS

1 Considerando la serie de n valores como muestra de una distribución, \bar{x} es un estimador insesgado de la media m y s^2 es un estimador insesgado de la varianza s^2 de dicha distribución.

2 La expresión s/\sqrt{n} es una estimación de la desviación estándar de la distribución de \bar{x} y se denomina **desviación estándar experimental de la media**

3 La desviación estándar experimental de la media, en ocasiones se denomina, incorrectamente **error de la media**.

Error (de indicación) de un instrumento de medida [8] (5.20)

Indicación de un instrumento de medida menos un valor verdadero de la magnitud de entrada correspondiente.

NOTAS

1 Dado que un valor verdadero no puede determinarse, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero (ver 1.19 y 1.20).

2 Este concepto se aplica principalmente cuando se compara el instrumento con un patrón de referencia.

3 Para una medida materializada, la indicación es el valor que le ha sido asignado.

Incertidumbre de medida [10] (3.9)

Parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

NOTAS



- 1 El parámetro puede ser por ejemplo una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la semiapertura de un intervalo con un nivel de confianza determinado.
- 2 La incertidumbre de medida comprende, en general, varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones estándar experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones estándar, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.
- 3 Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor del mensurando, y que todos los componentes de la incertidumbre, comprendidos los que provienen de efectos sistemáticos, tales como los componentes asociados a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

Esta definición es la de la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” [10] donde sus bases están expuestas con detalle (en particular ver 2.2.4 y anexo D).

Incertidumbre típica [10]:

Incertidumbre del resultado de una medición, expresada en forma de desviación típica.

Resolución (de un dispositivo visualizador) [8] (5.12)

La menor diferencia de indicación de un dispositivo visualizador que puede percibirse de forma significativa.

NOTAS

- 1 Para un dispositivo visualizador digital, diferencia de la indicación que corresponde al cambio de una unidad en la cifra menos significativa.
- 2 Este concepto se aplica también a un dispositivo registrador.

Trazabilidad [8] (6.10)

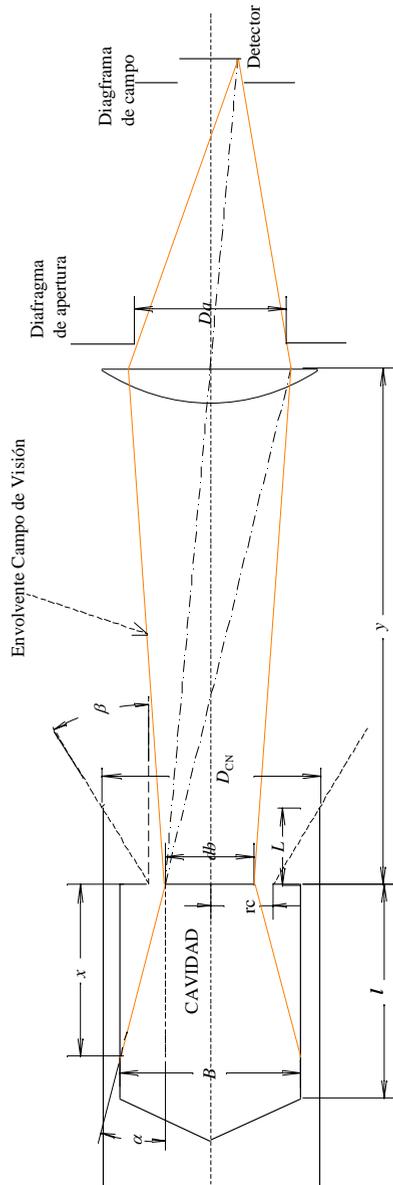


Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

NOTAS

- 1 A menudo, este concepto se expresa por el adjetivo **trazable**.
- 2 La cadena ininterrumpida de comparación se denomina **cadena de trazabilidad**.

ESQUEMA CUERPO NEGRO Y PIROMETRO



ENFOQUE EN LA APERTURA FIGURA 1



4. GENERALIDADES

Un termómetro de radiación de banda ancha es un instrumento de medida que indica la temperatura en función de la radiación de entrada. La radiación de entrada está limitada por el sistema óptico e influenciada por la respuesta espectral del detector. Para obtener la máxima sensibilidad se utilizan anchos de banda en longitud de onda de algunas micras.

Se denominan de foco variable cuando es posible desplazar una lente (lente de enfoque) en el termómetro para variar las condiciones de enfoque (distancia focal), lo que permite focalizar el objeto en el detector para cada distancia de medida. Si esto no es posible se denominan termómetros de radiación de banda ancha de foco fijo: termómetros de radiación de banda ancha con condiciones de enfoque fijas (lente de enfoque fija y por tanto distancia focal fija).

Los rangos de temperatura y de longitudes de onda más habituales son:

- bandas cercanas a $0,9 \mu\text{m}$ (detectores de Si): $420 \text{ }^\circ\text{C}$ a $1100 \text{ }^\circ\text{C}$
- bandas cercanas a $1,6 \mu\text{m}$ (detectores de InGaAs): $150 \text{ }^\circ\text{C}$ a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$
- bandas cercanas a $3,9 \mu\text{m}$ (detectores de PbSe): $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ o $4,6 \mu\text{m}$ (detectores de InSb): $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ a $500 \text{ }^\circ\text{C}$
- banda de $8 \mu\text{m}$ a $14 \mu\text{m}$ (detectores piroeléctricos): $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $500 \text{ }^\circ\text{C}$

La calibración de termómetros de infrarrojo debe hacerse por comparación con cuerpos negros cuya temperatura puede obtenerse mediante métodos de contacto o por termómetros de radiación, debiendo siempre tener trazabilidad a la EIT-90. En este procedimiento se describe la sistemática a seguir cuando se utiliza un termómetro de radiación patrón para medir la temperatura del CN, t_R .

Si se midiera únicamente la temperatura de contacto se necesitaría un conocimiento completo de los materiales y geometría del CN, así como de los gradientes de temperatura en el mismo y un posterior cálculo numérico de la emisividad del CN, lo que está fuera del alcance de este procedimiento.

La calibración consiste en la determinación de las correcciones, C , de los valores de temperatura indicados por el termómetro, t_{PIR} , tomando como



referencia la temperatura de radiación medida por el patrón, con sus correcciones en cada punto de calibración:

$$C = (t_R + \delta t_{R,r} + \delta t_{R,c} + \delta t_{R,d} + \delta t_{R,ETF} + \delta t_{R,e}) - (t_{PIR} + \delta t_{PIR,r} + \delta t_{PIR,rep} + \delta t_{PIR,ETF}) \quad (3)$$

Donde se han tenido en cuenta las posibles correcciones debidas a la incertidumbre de calibración, deriva, resolución y efecto del tamaño de la fuente (ETF) del patrón; la corrección debida a la falta de estabilidad del CN y las correcciones debidas a la resolución, repetibilidad y ETF del termómetro a calibrar (pueden existir otras según cada caso particular: repetibilidad, influencia de las condiciones ambientales, correcciones del certificado de calibración no realizadas, etc.).

NOTA

En el caso de termómetros que no tengan indicación en grados y se obtenga directamente la salida de la señal del detector, la calibración nos dará una tabla que relaciona la temperatura de radiación de referencia, t_R , con la señal indicada por el termómetro, X . (No confundir esta salida de la señal del detector con algunas salidas analógicas que tienen los termómetros proporcionales a las indicaciones en grados).

Símbolos y abreviaturas

EIT-90	Escala internacional de temperatura de 1990
CN	Cuerpo negro
C	Corrección de la temperatura del termómetro en cada punto de calibración.
c	velocidad de la luz
c_1	primera constante de radiación
c_2	segunda constante de radiación
d_b	tamaño del blanco
D_a	diafragma de apertura
ETF	Efecto del tamaño de la fuente.
f	relación de apertura
h	constante de Planck
I	intensidad radiante
k	factor de cobertura



K_B	constante de Boltzmann
$L(\lambda, T)$	Radiancia del cuerpo negro en función de λ y T , dada por la ecuación de Planck.
n	índice de refracción
TR	termómetro de radiación
t_R, T_R	Temperatura de radiación .
t_{PIR}, T_{PIR}	Temperatura leída por el termómetro.
ΔT_{ETF}	Corrección de temperatura por ETF.
r	Radio de la apertura de una fuente.
r_c	radio nominal de la apertura de la fuente de calibración
r_{ef}	radio efectivo
r_0	radio del disco obturador en método diferencial
r_b	Radio del blanco del termómetro de radiación.
Δr_c	variaciones del radio de la fuente de calibración
s	coeficiente de sensibilidad
u	incertidumbre típica
U	incertidumbre combinada
S, X	señal a la salida del detector del TR
y	distancia al blanco
α	Ángulo del rayo que parte del elemento a distancia x del fondo y pasa por el centro de la apertura del cuerpo negro.
β	apertura de salida del cuerpo negro
$\delta t_{R,r}$	variación de la temperatura de radiación del CN debida a la resolución del TR patrón
$\delta t_{R,c}$	variación de la temperatura de radiación del CN debida a la calibración del TR patrón
$\delta t_{R,d}$	variación de la temperatura de radiación del CN debida a la deriva del TR patrón
$\delta t_{R,ETF}$	variación de la temperatura de radiación del CN debida al ETF del TR patrón
$\delta t_{R,e}$	variación de la temperatura de radiación del CN debida a la falta de estabilidad del CN
$\delta t_{PIR,r}$	variación de la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debida a la resolución del TR a calibrar
$\delta t_{PIR,rep}$	variación de la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debida a la repetibilidad del TR a calibrar
$\delta t_{PIR,ETF}$	variación de la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debida al ETF del TR a calibrar



ε	emisividad
λ	Longitud de onda.
$\sigma(r, r_c)$	Efecto del tamaño de la fuente entre dos fuentes de radios r_c y r .
σ_R	ETF del TR patrón
σ_{PIR}	ETF del TR a calibrar
$\Delta\sigma$	variación del ETF.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Los instrumentos y equipos que pueden utilizarse dependiendo del grado de exactitud requerido y considerando la coherencia en las incertidumbres, son los siguientes:

- Termómetro de radiación de infrarrojo de referencia calibrado en la misma banda que el termómetro que va a ser calibrado.
- Baño de aceite con cuerpo negro: de 50 °C a 200 °C, $\varepsilon > 0,999$
- Hornos con cuerpo negro de temperatura variable (por ej: tubo de calor de Cs, Na, hornos de resistencia...): de 200 °C a 1000 °C , $\varepsilon > 0,999$
- Hornos con cuerpo negro de los puntos fijos del Zn, In, Sn, Al, Ag con $\varepsilon > 0,999$
- Registradores de las condiciones ambientales del laboratorio (temperatura y humedad) adecuados para el margen de temperatura y humedad a las que se encuentra habitualmente el laboratorio.

5.2. Operaciones previas

1) Se comprobará que el termómetro a calibrar esté identificado de forma permanente con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno del propietario del termómetro unívoco. Si no fuera así se le asignará un código de identificación que se adherirá o fijará de forma segura sobre el



termómetro, de forma que no surja duda alguna en cuanto a la correspondencia entre el instrumento calibrado y el certificado emitido.

2) Se comprobará el perfecto estado del termómetro a calibrar y sus características técnicas, anotando los parámetros más necesarios para la calibración:

- Distancia a la apertura de la fuente de calibración.
- Tamaño del blanco teórico.
- Ancho de banda de longitudes de onda.
- Resolución de la lectura en temperatura y/o de la salida analógica.

La distancia a la apertura de la fuente de calibración será la distancia para la que el blanco del termómetro es mínimo, salvo que sea indicada otra cosa por el cliente.

3) Se estudiará el manual de operación del termómetro a calibrar, de forma que la persona que realice la calibración esté familiarizada con su manejo.

4) Se comprobará el estado de la batería (para aquellos termómetros que van equipados con una batería que les permita funcionar sin conexión a la red eléctrica), siguiendo las instrucciones del manual del termómetro y en caso necesario se procederá a su sustitución. Los equipos de lectura electrónicos en general deben estar encendidos, al menos, ½ hora antes de la medida.

5) Se comprobará el estado de calibración del patrón de referencia, si dispone de un certificado de calibración en vigor en la banda del termómetro a calibrar, y si dicho certificado garantiza la trazabilidad e incertidumbre apropiadas a las medidas que se van a realizar en el transcurso de la calibración.

6) Se realizarán las pruebas iniciales descritas en el manual técnico del termómetro a calibrar, encaminadas a comprobar el estado general de funcionamiento del termómetro (por ejemplo “autotest de encendido”, comprobación de la pantalla de visualización, etc.).



7) El control de emisividad del termómetro se ajustará al valor de 1 (siempre que lo permita el termómetro y en caso contrario, habrá que hacer las correcciones necesarias para el cálculo de temperaturas).

8) En el caso de que existan cerámicas o aislantes por delante de la apertura del CN, se comprobará que, a la distancia de calibración, con la geometría del CN, el diámetro de la apertura utilizada y el diafragma de apertura del TR a calibrar, no se bloquee el haz de radiación de salida del CN.

9) Se anotarán las condiciones ambientales durante la calibración: temperatura y humedad.

5.3. Proceso de calibración

5.3.1. Secuencia de las operaciones objeto del procedimiento

1) Los hornos se estabilizarán en la temperatura de calibración con ayuda de un registro de la temperatura del termómetro de radiación de referencia o de la temperatura del termómetro de contacto del baño u horno del CN utilizado.

2) Si fuera necesario, previa consulta al cliente, las lentes del objetivo del termómetro a calibrar se limpiarán de alguna de las siguientes maneras:

- con un "kit" de limpieza de objetivos fotográficos.
- insuflando gas inerte (p. e. Argón).

Se deberán tener en cuenta las siguientes precauciones:

- no utilizar telas y papel abrasivos.
- no tocar el objetivo con los dedos.
- mantener el objetivo tapado siempre que no se realicen medidas.

3) El termómetro se posicionará (ver Anexo I) de forma que su eje óptico pase a través del centro de la apertura del CN, p. e. con la ayuda de un láser y de las marcas de referencia en el banco óptico. El enfoque se realizará, según sea el tipo de termómetro a calibrar:



- Si es de foco fijo, se situará a la distancia de calibración: bien la indicada por el fabricante, para la cual el tamaño del blanco del termómetro es mínimo, o bien la solicitada por el cliente.

- Si es de foco variable, se situará inicialmente a la distancia de calibración: bien la indicada por el fabricante, para la cual el tamaño del blanco del termómetro es mínimo, o bien la solicitada por el cliente. Después se moverá el termómetro para llevar el blanco al borde de la apertura y se ajustará el objetivo del termómetro hasta obtener el valor máximo. A continuación se volverá a llevar el termómetro a la posición en la que el blanco está en el centro de la apertura. (El enfoque en el borde de la apertura es crítico, este procedimiento se repetirá las veces que sea necesario hasta obtener un temperatura reproducible).

4) Medida del efecto del tamaño de la fuente (ETF). Se efectuarán medidas a la distancia de calibración para determinar el ETF del termómetro (véase anexo II), con el método directo o diferencial según las longitudes de onda en las que detecte el termómetro.

Si el ETF muy grande, deberá estudiarse la influencia en las incertidumbres de los diámetros de las fuentes de calibración, para evaluar si se aumentan éstas convenientemente o incluso no es posible calibrar el termómetro con dichas fuentes.

Una curva típica de ETF de un termómetro puede ser:

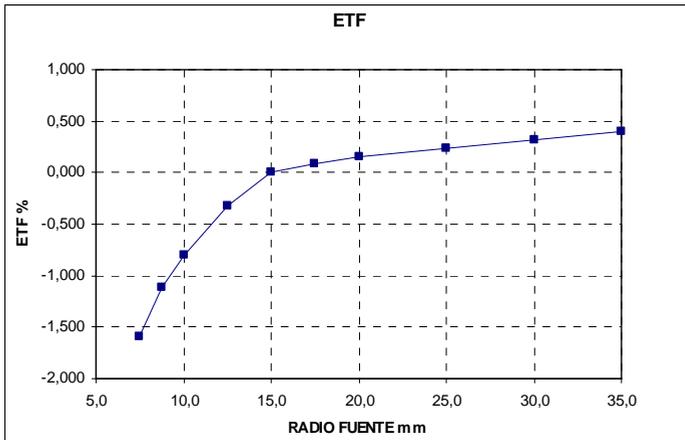


Figura 2

En este caso, fuentes de calibración inferiores a 25 mm de diámetro introducirían incertidumbres de calibración importantes.

5) Calibración del termómetro. Una vez posicionado el termómetro y estabilizado el medio isoterma que soporta al cuerpo negro, se procederá a la toma de lecturas de los termómetros de radiación patrón y a calibrar.

Se medirán al menos cinco puntos en el intervalo de calibración solicitado en orden creciente y al finalizar dichos puntos se repetirá uno de ellos para comprobar la estabilidad del termómetro durante la calibración.

5.3.2. Método de realización

Medida del ETF

Se seguirán los pasos descritos en el anexo II.

Calibración del termómetro



Los termómetros se calibran de acuerdo a la EIT-90, expresando la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ó en kelvin (K).

NOTA:

En aquellos termómetros que sólo tengan salida eléctrica del detector, se indicará la relación entre dicha señal de salida y la temperatura medida mediante una tabla, curva de calibración etc.

El método seguido consiste en la determinación de la temperatura indicada por el termómetro, t_{PIR} , relacionándola con la temperatura de referencia de la fuente de radiación, t_{R} , obteniendo las correcciones correspondientes y asignando las incertidumbres calculadas para el proceso de calibración. Se comienzan las medidas en el punto de temperatura más bajo y al finalizar todos los puntos de calibración se repite el primer punto realizado.

En cada punto de calibración, se realizarán 10 medidas para obtener la repetibilidad del termómetro, asignándole una temperatura que será la media de dichas medidas.

NOTA

Las lecturas de t_{R} deben estar corregidas según su certificado de calibración. La calibración debe haberse realizado para fuentes de tamaño iguales a las fuentes usadas en la calibración. Si no es así, los datos del certificado deben corregirse por ETF con los valores que se indiquen en el certificado de calibración (o las medidas propias del laboratorio). Véase apartado 6.2.

Se observará de forma continua la estabilidad de la temperatura de los CN, la estabilidad asignada al cuerpo negro debe ser mayor o igual que la desviación típica de las medidas realizadas con el termómetro de radiación de referencia.

5.4. Toma y tratamiento de datos



La toma de datos se podrá realizar de forma manual o de forma automática mediante un ordenador y un bus de comunicaciones conectado a los instrumentos correspondientes. En el último caso se deberá validar el programa informático utilizado antes de realizar la calibración.

5.4.1. Medida del ETF

Se seguirán las instrucciones dadas en el anexo II.

5.4.2. Calibración del termómetro

En la toma de datos, deben figurar básicamente las siguientes lecturas:

- Temperatura del horno o baño con CN: t_R (ya corregida según certificado de calibración y ETF en su caso).
- Lectura del termómetro de radiación a calibrar: t_{PIR} .
- Temperatura y humedad del ambiente.

Anotando también como parámetros importantes los siguientes:

- Distancia a la apertura y tamaño del blanco teórico.
- Diámetro de la apertura de la cavidad de CN.

Con estos datos se calculan las correcciones en cada punto de calibración. Se calcularán como diferencia entre las temperaturas t_R y t_{PIR} :

$$C = t_R - t_{PIR} \quad (4)$$

Los resultados de la calibración se indicarán en una tabla donde aparezca para cada punto de calibración: la temperatura de radiación patrón (t_R), del termómetro (t_{PIR}), corrección (C) e incertidumbre de calibración con su factor de cobertura.

NOTA



En algunos casos se puede dar un valor global de incertidumbre con su factor de cobertura.

Así mismo se conservarán registros de las configuraciones en las que se ha calibrado el termómetro (rangos, emisividad, resolución, etc.).

NOTA:

En el caso de medidas de la salida del detector del termómetro, $X(t_R)$, pueden ajustarse los resultados experimentales por mínimos cuadrados a una ecuación del tipo [9]:

$$X(T_R) = \frac{C}{\exp\left(\frac{C_2}{AT_R + B}\right) - 1} \quad (5)$$

donde A , B y C son constantes.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

La calibración consiste en obtener los valores de corrección del termómetro en cada punto de calibración. Partimos de la ecuación (4):

$$C = (t_R + \delta t_{R,r} + \delta t_{R,c} + \delta t_{R,d} + \delta t_{R,ETF} + \delta t_{R,e}) - (t_{PIR} + \delta t_{PIR,r} + \delta t_{PIR,rep} + \delta t_{PIR,ETF}) \quad (6)$$

La temperatura de radiación, t_R , es la media de 10 medidas realizadas con el termómetro de radiación patrón, $\delta t_{R,r}$, es la variación de t_R debida a la resolución del TR patrón, $\delta t_{R,c}$, es la variación de t_R debida a la incertidumbre de calibración del TR patrón, $\delta t_{R,d}$, es la variación de t_R debida a la deriva entre calibraciones, $\delta t_{R,ETF}$ es la variación de t_R debida al ETF del TR patrón y $\delta t_{R,e}$ es la variación de t_R debida a la falta de estabilidad del CN. La temperatura leída por el TR a calibrar es t_{PIR} que es la media de 10 medidas realizadas con el TR a calibrar, $\delta t_{PIR,r}$ es variación de t_{PIR} debida a la resolución del TR a calibrar, $\delta t_{PIR,rep}$ es variación de t_{PIR}

debida a la repetibilidad del TR a calibrar y $\delta t_{\text{PIR,ETF}}$ es la variación de t_{PIR} debida al ETF del TR a calibrar.

Para el cálculo de incertidumbres, se seguirán las pautas recomendadas en la guía ISO [10] y en el documento CEA-ENAC-LC/02 [11]. Para calcular la incertidumbre de la corrección del termómetro, que es el resultado de la calibración, debemos aplicar la ley de propagación de incertidumbres en la ecuación (6):

$$u^2(C) = u^2(t_R) + u^2(\delta t_{R,r}) + u^2(\delta t_{R,c}) + u^2(\delta t_{R,d}) + u^2(\delta t_{R,ETF}) + u^2(\delta t_{R,e}) + u^2(t_{\text{PIR}}) + u^2(\delta t_{\text{PIR,r}}) + u^2(\delta t_{\text{PIR,rep}}) + u^2(\delta t_{\text{PIR,ETF}}) \quad (7)$$

Los términos de ETF, se pueden expresar en función del ETF, σ , como:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta L}{L} = \frac{c_2}{\lambda T^2} \Delta T \quad \Rightarrow \quad u^2(\delta t_{\text{ETF}}) = \left(\frac{\lambda T^2}{c_2} \right)^2 u^2(\sigma) \quad (8)$$

derivando para la expresión de L de la aproximación de Wien.

Sustituyendo en (7):

$$u^2(C) = u^2(t_R) + u^2(\delta t_{R,r}) + u^2(\delta t_{R,c}) + u^2(\delta t_{R,d}) + s^2 u^2(\sigma_R) + u^2(\delta t_{R,e}) + u^2(t_{\text{PIR}}) + u^2(\delta t_{\text{PIR,r}}) + u^2(\delta t_{\text{PIR,rep}}) + s^2 u^2(\sigma_{\text{PIR}}) \quad (9)$$

donde s es:

$$s = \frac{\lambda T^2}{c_2} \quad (10)$$

NOTA:

Si se detectase alguna otra causa de incertidumbre particular (del termómetro a calibrar) durante el proceso de calibración, se añadirá al cálculo de incertidumbres, p. e. influencia de las condiciones ambientales.

Los términos de la ecuación (9) a considerar serán los siguientes:



$u(t_R)$: es la incertidumbre típica debida a la lectura del patrón de referencia. Como t_R es la media de 10 medidas se considerará la desviación típica de la media obtenida para las 10 medidas.

$u(\delta t_{R,r})$: es la incertidumbre típica debida a la resolución del patrón de referencia. Depende de cada termómetro.

$u(\delta t_{R,c})$: es la incertidumbre típica debida a la calibración del patrón de referencia. Se obtiene del certificado de calibración del TR patrón. Si se realizara una interpolación en los datos del certificado se debe incluir además los residuos del ajuste de la curva utilizada.

$u(\delta t_{R,d})$: es la incertidumbre típica debida a la deriva entre calibraciones del patrón de referencia. Se obtiene del histórico de calibraciones del TR patrón.

$u(\sigma_R)$: es la incertidumbre típica debida al ETF del patrón de referencia. Dependerá de cada termómetro. La fuente de calibración tiene una indeterminación en el radio que afecta a la indicación del termómetro debido al ETF de éste. Los resultados obtenidos en la calibración son para un radio de calibración nominal que se aleja del radio real de las fuentes utilizadas. Los errores cometidos son, por un lado, el que la fuente de radiación no es uniforme y tendrá un radio efectivo distinto del radio medido, y por otro, el error entre el radio medido y el radio nominal. Se debe estimar entonces una incertidumbre para el radio de las fuentes de calibración, $u(r)$. Con esta estimación obtenemos la variación de σ con la ecuación o la gráfica del ETF del patrón: $u(r) \Rightarrow u(\sigma)$. Si no se dispone de una gráfica o ecuación del ETF del patrón se estimará al menos una cota superior para este valor en el cálculo de incertidumbres (véase anexo II).

$u(\delta t_{R,e})$: es la incertidumbre típica debida a la falta de estabilidad del CN. Dependerá del CN utilizado.

$u(t_{PIR})$: es la incertidumbre típica debida a la lectura TR a calibrar. Como t_{PIR} es la media de 10 medidas se considerará la desviación típica de la media obtenida para las 10 medidas.

$u(\delta t_{PIR,r})$: es la incertidumbre típica debida a la resolución del TR a calibrar. Depende de cada termómetro.



$u(\delta t_{\text{PIR,rep}})$: es la incertidumbre típica debida a la repetibilidad del TR a calibrar. Se considerará la diferencia entre las correcciones obtenidas para el mismo punto de calibración que se repite dos veces, como una distribución rectangular.

$u(\sigma_{\text{PIR}})$: es la incertidumbre típica debida al ETF del TR a calibrar. Dependerá de cada termómetro. Como en el caso del TR patrón, se debe estimar una incertidumbre para el radio de las fuentes de calibración, $u(r)$. Con esta estimación obtenemos la variación de σ con la ecuación o la gráfica del ETF del TR a calibrar: $u(r) \Rightarrow u(\sigma)$. Si no se ha medido la curva completa del ETF del TR se estimará al menos una cota superior para este valor en el cálculo de incertidumbres (véase anexo II).

La incertidumbre combinada obtenida de la ecuación (9), se multiplicará por un factor $k = 2$, para obtener la incertidumbre expandida (se considera que la incertidumbre combinada corresponde a una distribución normal, por lo que este factor supone una probabilidad de cobertura del 95,45 %).

NOTA

Esto será cierto en general, ya que todas las contribuciones a la incertidumbre combinada son de tipo B y se puede asumir que se cumplen las condiciones del Teorema Central del Límite, y que, por lo tanto, la incertidumbre combinada sigue una distribución normal. Las únicas componentes de tipo A consideradas son $u(t_R)$, $u(t_{\text{PIR}})$, que, en general, también será pequeña comparada con el resto de contribuciones, si no fuera así se deberían calcular los grados efectivos de libertad según el Anexo E de [10].

Es conveniente recoger todas las contribuciones del cálculo de incertidumbre en una tabla [11]. En el Anexo III se ofrece un ejemplo numérico del cálculo de incertidumbres.

Tabla 1. Resumen del cálculo de $u(C)$

Magnitud	Estimación	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coefficiente de Sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$
X_i	x_i			$u_i(y)$
t_R	$\frac{\sum_{i=1}^{10} t_{Ri}}{10}$	$u(t_R)$	1	$u(t_R)$
$\delta t_{R,r}$	0	$u(\delta t_{R,r})$	1	$u(\delta t_{R,r})$
$\delta t_{R,c}$	0	$u(\delta t_{R,c})$	1	$u(\delta t_{R,c})$
$\delta t_{R,d}$	0	$u(\delta t_{R,d})$	1	$u(\delta t_{R,d})$
σ_R	0	$u(\sigma_R)$	$\lambda T^2 / C_2$	$u(\sigma_R) \lambda T^2 / C_2$
$\delta t_{R,e}$	0	$u(\delta t_{R,e})$	1	$u(\delta t_{R,e})$
t_{PIR}	$\frac{\sum_{i=1}^{10} t_{PIRi}}{10}$	$u(t_{PIR})$	1	$u(t_{PIR})$
$\delta t_{PIR,r}$	0	$u(\delta t_{PIR,r})$	1	$u(\delta t_{PIR,r})$
$\delta t_{PIR,rep}$	0	$u(\delta t_{PIR,rep})$	1	$u(\delta t_{PIR,rep})$
σ_{PIR}	0	$u(\sigma_{PIR})$	$\lambda T^2 / C_2$	$u(\sigma_{PIR}) \lambda T^2 / C_2$
C	$t_R - t_{PIR}$			$u(C)$

6.2. Interpretación de resultados

Si se detecta que alguna de las correcciones obtenidas en los puntos de calibración es significativamente más alta que en el resto, conviene repetir la medida en dicho punto de calibración. Las correcciones obtenidas, con su incertidumbre, deben ser coherentes con la tolerancia asignada por el usuario al termómetro para su calibración.

Para ello se comparará la corrección obtenida, aumentada en la incertidumbre, con dicho límite de tolerancia. Si la corrección más la



incertidumbre es menor que el límite de tolerancia en todos los puntos de calibración, se puede declarar el cumplimiento con dicho límite de tolerancia, en caso contrario, se decidirán acciones a tomar.

Los valores de temperatura obtenidos en la calibración del termómetro, se obtienen para una distancia entre el termómetro y la apertura de la fuente de radiación y para un tamaño de la fuente de radiación y ambos valores deben figurar en el certificado de calibración.

Si se realiza un estudio del ETF, el cliente podrá corregir dichos valores en el caso de que el termómetro mida sobre otras fuentes de diferente tamaño al de la fuente de calibración.

La temperatura de un CN de radio r distinto del de calibración, T , se obtendrá de la lectura del termómetro, T_{PIR} teniendo en cuenta la corrección C por la calibración y la corrección por el efecto del tamaño de la fuente ΔT_{ETF} :

$$T = T_{\text{PIR}} + C + \Delta T_{\text{ETF}} \quad (11)$$

Donde

$$\Delta T_{\text{ETF}} = \frac{\lambda T^2}{c_2} \sigma(r_c, r) \quad (12)$$

Un período de tiempo razonable para la recalibración de estos instrumentos puede oscilar entre 3 y 12 meses, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente de las características técnicas comprobadas del termómetro (por ejemplo la estabilidad del detector), del uso que se realice del mismo, y de la exactitud requerida. El usuario del equipo será siempre el responsable de asignar el período de recalibración, y de revisarlo cuando sea preciso, considerando por ejemplo, los resultados obtenidos con respecto a las calibraciones anteriores y a las incertidumbres consideradas.

7. REFERENCIAS



7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

Manual de funcionamiento del termómetro a calibrar.
Manual de funcionamiento del horno o baño.
Manual de funcionamiento del termómetro de referencia.

7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 0. 1997.
- [2] “Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90)”. Ed. CEM, 1990.
- [3] Clasificación de instrumentos de Metrología de Temperatura 1ª Edición. SCI-Miner (1993).
- [4] Norma Española UNE 82100 Magnitudes y unidades Parte 6: Luz y radiaciones electromagnéticas conexas.
- [5] “Theory and practice of radiation thermometry” Ed. D. P. DeWitt and G. D. Nutter, Wiley & Sons, 1988.
- [6] “Temperature” T. J. Quinn. Ed. Academia Press, 1990.
- [7] Norma ASTM-E1256-95 “Standard test methods for radiation thermometers (single band type)”
- [8] Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de metrología (VIM)-CEM.1994.
- [9] J. Fisher et al. “Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point”.
http://www.bipm.org/wg/CCT/CCT-WG5/Allowed/Miscellaneous/Low_T_Uncertainty_Paper_Version_1.7_1.pdf
- [10] “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida”. Versión española. 1ª Ed., 1998, publicada por el CEM.



- [11] Documento ENAC CEA-ENAC-LC/02 Rev. 1. “Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones”; 1998.
- [12] “The characterization of radiation thermometers subject to the size of source effect” P. Bloemberger, Y. Duan, R. Bosma, Z. Yuan. Proced. TEMPMEKO’96. Ed. P. Marcarino, Turín, 1997.

8. ANEXOS

Anexo I: Alineación de hornos y de termómetros.

Anexo II: Efecto del tamaño de la fuente.

Anexo III: Ejemplo de cálculo de incertidumbre.

ANEXO I ALINEACIÓN DE HORNOS Y DE TERMÓMETROS

Los cuerpos negros CN y los termómetros de medida deben estar alineados en la mesa óptica que se utilice de soporte. La alineación se puede realizar con ayuda de un láser que defina un eje óptico y se procurará (en el caso de que se utilicen varios CN) que todos los ejes queden a la misma altura h del banco óptico, para posteriormente facilitar el enfoque de los termómetros.

En el posicionado de los CN se seguirá el siguiente proceso:



Figura 3

Una vez posicionado el horno con el CN lo más horizontal posible (por ejemplo con la ayuda de un nivel) y con su apertura enfrentada a un láser que se situará en la posición donde posteriormente se va a colocar el termómetro a calibrar, a la misma altura h que el centro de la apertura del cuerpo negro CN, definiendo asimismo la horizontalidad del haz láser mediante puntos exteriores (por ejemplo marcas en la pared) que determinen un plano horizontal, se procederá al ajuste fino del posicionamiento según se explica a continuación.

El haz láser se hará pasar por el centro de la apertura del cuerpo negro CN.

El cuerpo negro se inclinará en el plano horizontal y en el plano vertical, para conseguir que el rayo del láser incida en el vértice de la cavidad V, sin dejar de pasar por el centro de la apertura c, obteniendo la coincidencia del eje óptico de la cavidad CN con el haz láser.

Además se comprobará la perfecta alineación de todo el conjunto, desplazando el láser verticalmente de forma que al incidir en los puntos a y a' de la apertura de la cavidad, se observen las trazas longitudinalmente en su interior. Igualmente se observará desplazando el láser horizontalmente.



La situación de los ejes ópticos de los CN, se materializará mediante el dibujo de marcas de su proyección vertical en el banco óptico y de dos punteros P_1 y P_2 , cuya altura h se ha obtenido haciéndolos coincidir con el haz del láser.

Posteriormente, el termómetro a calibrar y el patrón se posicionarán con las referencias de las marcas y los punteros citados anteriormente.



ANEXO II EFECTO DEL TAMAÑO DE LA FUENTE

El efecto del tamaño de la fuente ETF puede definirse como la radiación de la fuente procedente de la superficie exterior al área del blanco que alcanza al detector del termómetro de radiación.

El ETF es debido a imperfecciones del sistema óptico del termómetro y característico de cada tipo o modelo de instrumento.

Este efecto es debido principalmente a las siguientes causas:

- Ganancia de radiación por difracción en el diafragma de campo del termómetro (principio de Huygens).
- Dispersión de radiación (scattering) en las superficies de las lentes del objetivo del termómetro.
- Reflexiones múltiples en las superficies ópticas.
- Aberraciones causadas por las lentes del objetivo.

Como consecuencia de este efecto, fuentes con igual temperatura de radiación pero de distinto tamaño producen señales (temperaturas) distintas en el termómetro, de valores crecientes con el tamaño de la fuente.

En lo que sigue, se considera que las fuentes de radiación son circulares y, mientras no se indique, lo contrario con radiación uniforme en toda la superficie.

La definición general es de la forma [12]:

$$\sigma(r, r_b) = \frac{S(L, r) - S(L, r_b)}{S(L, \infty)} \quad (13)$$

Siendo:

- $\sigma(r, r_b)$ El efecto del tamaño de la fuente que tiene un radio r y la radiación procede de la corona circular exterior a r_b .



- $S(L,r)$, $S(L,r_b)$, y $S(L,\infty)$ Las señales del pirómetro para fuentes de radiación de radios r , r_b e ∞ .

Hasta aquí, las fuentes se han considerado como superficies de radiación uniformes y planas, pero en la práctica los cuerpos negros CN utilizados en la calibración de termómetros, tienen una zona central de radiación constante (temperatura constante) que forma la apertura de la fuente de radio r_c , y las zonas que le rodean presentan variaciones de temperatura y al mismo tiempo un menor coeficiente de emisividad, con lo que se tiene una disminución de la radiación con el radio, aceptándose que se mantiene la simetría radial de la temperatura y de la radiancia $L = L(r)$. La aplicación de correcciones a las fuentes no uniformes se resuelve utilizando el concepto de radio efectivo r_{ef} [12], obtenido de:

$$\sigma'(r, r_c) = L(r_c)^{-1} \times \int_{r_c}^r L(\rho) \times [d\sigma(\rho, r_c) / d\rho] \times d\rho \quad (14)$$

$$\sigma(r_{ef}, r_c) = \sigma'(r, r_c) \quad (15)$$

De estas ecuaciones se obtiene el valor de r_{ef} que sería el radio de una fuente uniforme, a la temperatura T_R de la zona uniforme de la fuente real no uniforme, que produce la misma señal en el termómetro.

Este cálculo del r_{ef} solamente se realiza para calibraciones de gran exactitud.

En general, los valores de un termómetro deben darse para una fuente de radiación uniforme con un radio nominal r_c , aunque las medidas se realicen en CN con diferentes radios efectivos y se estima una incertidumbre para ese radio nominal, $u(r)$.

NOTA:

Además de la diferencia entre el radio nominal y el radio efectivo del CN, $u(r)$ debe incluir la incertidumbre debida a la diferencia entre el radio nominal y el radio real medido de la apertura del CN utilizado.

Para la medida del ETF se necesita una fuente de radiación de diámetro grande, habitualmente se utilizan:



- esferas integradoras, esferas con una gran apertura ($\cong 100$ mm de diámetro) iluminadas uniformemente (superficie lambertiana). Las lámparas que iluminan la esfera suelen ser de cristal de cuarzo limitando la longitud de onda a valores inferiores a $2,5 \mu\text{m}$.
- CN de gran apertura para todas las longitudes de onda

Existen dos formas de medir el ETF:

A.- Método directo

Mediante aperturas de radio variable, simulando fuentes de radiación de distintos tamaños, se obtienen valores de $S(L,r)$ para los diferentes radios y de $S(L,\infty)$ enfocando directamente a la fuente con radio máximo, pudiendo expresar el ETF por aplicación directa de la ecuación (13). En este método los pequeños errores en las medidas $S(L,r)$ y $S(L,r_b)$ tienen una gran influencia en la determinación de su diferencia y por lo tanto en $\sigma(r, r_b)$.

Puesto que no se conoce el valor de r_b de la ecuación (13), se tomará como referencia para calcular σ, r_c , es decir, se considera que $\sigma = 0$ para $r = r_c$.

B.- Método diferencial

Mediante aperturas de radio variable, simulando fuentes de radiación de distintos tamaños, dejando fijo un disco obturador opaco en negro mate de radio r_0 , situado en el centro de la apertura del diafragma, de diámetro algo mayor que el radio del blanco teórico del termómetro, sobre el cual se enfocará el termómetro.

Este método, si bien experimentalmente es más exacto, presupone la linealidad del detector y que el termómetro detecte para radiaciones pequeñas.

Se observarán posibles reflexiones, midiendo en la zona comprendida entre el círculo obturador y el diafragma variable, con y sin el conjunto iris círculo obturador.

De esta forma se obtiene directamente $S(L,r)-S(L,r_0)$ para las diferentes aperturas, cuando se enfoca el termómetro en el disco obturador y $S(L,\infty)$ cuando se enfoca en la fuente fuera del obturador, midiendo en este caso, directamente el numerador y el denominador de la ecuación (13).



Consideraremos que σ es 0 cuando $r = r_0$, y el valor obtenido para $r = r_0$, que será distinto de cero en la práctica (“background”), se restará al resto de las medidas.

Para la elección de los equipos de ensayo y del método de realización, deberá tenerse en cuenta el intervalo de longitudes de onda:

- Esfera integradora (método directo, y diferencial en el caso de que haya salida proporcional a la señal del detector) para termómetro de $\lambda < 2 \mu\text{m}$.
- Cuerpo negro de gran apertura (método directo) para termómetros de $\lambda > 2 \mu\text{m}$.

El termómetro se posicionará a la distancia de calibración.

Las medidas se realizarán con las fuentes con un nivel de radiación superior a 100 °C, para que la influencia de la radiación ambiente sea despreciable.

Durante las medidas, se evitarán reflexiones parásitas y el calentamiento del instrumental interpuesto entre la fuente de radiación y el termómetro.

Los datos se obtienen en °C, que se pasarán a energía radiante utilizando:

$$S \propto \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (16)$$

Así, con la ecuación (13), se obtiene una tabla de datos r , σ , que será el resultado del ETF del termómetro. Esta lista de datos es conveniente representarla en forma gráfica (véanse figuras 2 y 4).

Además de la medida del ETF y su presentación en forma de tabla o de gráfica, puede ser útil ajustar posteriormente a una curva a los valores de σ obtenidos tomando como referencia ($\sigma = 0$), el radio de calibración, r_c , para el método directo y el radio del obturador, r_0 , para el método diferencial. Es decir, p. e. para el método directo se puede probar la curva:

$$\sigma(r, r_c) = a \cdot (1 - \exp(b \cdot (r_c - r))) \quad (17)$$



Los resultados obtenidos del ETF, se utilizarán para las correcciones e incertidumbres en la calibración del termómetro en cuestión, así como para orientar al propietario del termómetro sobre las correcciones que debe realizar por ETF, cuando utilice fuentes de distinto tamaño al de la fuente de calibración.

En el caso de que no se realicen medidas para distintos diámetros de fuente según se ha indicado anteriormente, se debería estimar, al menos, la diferencia de temperatura medida por el termómetro para la fuente de calibración (r_c) y una fuente infinita (r_∞). Una fuente infinita sería lo equivalente a meter el termómetro de radiación a calibrar "dentro" del CN, en la práctica lo acercaríamos lo máximo posible a la apertura (teniendo cuidado de no calentar excesivamente el termómetro) para tomar una lectura a comparar con la obtenida a la distancia de calibración. Esta será una cota máxima para el ETF del termómetro, que nos permite estimar si la calibración se ha realizado en condiciones óptimas de diámetro de fuente.

Para resaltar la importancia de esta medida veamos, p. e., un termómetro con un ETF como el de la figura 2 de banda en $10 \mu\text{m}$ y a $900 \text{ }^\circ\text{C}$:

Un $r_c = 20 \text{ mm}$ con Δr_c estimada de $\pm 2,5 \text{ mm} \Rightarrow \Delta\sigma = 0,0012 \Rightarrow u(\sigma) = 0,0012/\sqrt{12} = 0,00035 \Rightarrow$ incertidumbre de C debida al ETF del termómetro a calibrar $= 0,00035\lambda T^2/c_2 = 0,33 \text{ }^\circ\text{C}$

Un $r_c = 15 \text{ mm}$ con Δr_c estimada de $\pm 2,5 \text{ mm} \Rightarrow \Delta\sigma = 0,0040 \Rightarrow u(\sigma) = 0,0040/\sqrt{12} = 0,00115 \Rightarrow$ incertidumbre de C debida al ETF del termómetro a calibrar $= 0,00115\lambda T^2/c_2 = 1,10 \text{ }^\circ\text{C}$

Un $r_c = 10 \text{ mm}$ con Δr_c estimada de $\pm 1 \text{ mm} \Rightarrow \Delta\sigma = 0,0136 \Rightarrow u(\sigma) = 0,0136/\sqrt{12} = 0,00393 \Rightarrow$ incertidumbre de C debida al ETF del termómetro a calibrar $= 0,00393\lambda T^2/c_2 = 3,76 \text{ }^\circ\text{C}$

Como vemos en los cálculos anteriores, una fuente de 10 mm de radio es inadecuada para la calibración de este termómetro y una fuente de 15 mm de radio introduce incertidumbres importantes en la calibración.



ANEXO III

EJEMPLO DE CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

El ejemplo que aparece descrito a continuación, es la calibración por comparación en CN de un termómetro de radiación en la banda de $8\ \mu\text{m}$ a $14\ \mu\text{m}$ a $900\ \text{°C}$.

Datos para el cálculo de incertidumbre

El sistema de calibración utilizado consta de:

- 1) Un cuerpo negro de inconel inmerso en un heat pipe de Na con estabilidad a $900\ \text{°C}$ mejor que $\pm 0,08\ \text{°C}$. La apertura del CN es de 15 mm de radio y su emisividad mejor que 0,999.
- 2) Un termómetro de radiación patrón calibrado en la banda de $8\ \mu\text{m}$ a $14\ \mu\text{m}$ con fuentes de radiación de 15 mm de radio. La corrección a $900\ \text{°C}$ es de $8,5\ \text{°C}$ y la incertidumbre de calibración es de $3\ \text{°C}$ para $k = 2$ a $900\ \text{°C}$. La deriva a un año se obtiene del histórico de calibraciones y es una variación máxima de $2\ \text{°C}$ en un año. El termómetro tiene una resolución de $0,1\ \text{°C}$.
- 3) El ETF del termómetro se obtiene del certificado de calibración y está representado en la figura 4.

El termómetro a calibrar es:

- 1) Un termómetro de radiación en la banda de $8\ \mu\text{m}$ a $14\ \mu\text{m}$ de resolución $1\ \text{°C}$.
- 2) El ETF del termómetro se mide durante la calibración y está representado en la figura 2.

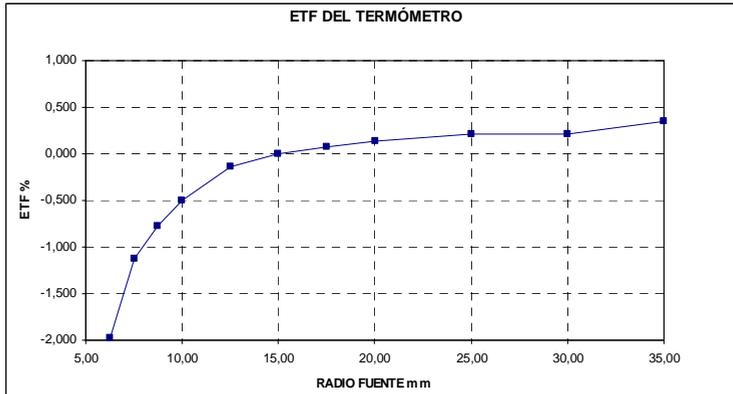


Figura 4

Las medidas realizadas en el punto de calibración son:

Termómetro patrón: media de 890,8 °C con desviación típica de la media de 0,07 °C $\Rightarrow t_R = 890,8 \text{ °C} + 8,5 \text{ °C} = 899,3 \text{ °C}$

Termómetro a calibrar: media de 891 °C con desviación típica de la media de 0,4 °C $\Rightarrow t_{PIR} = 891 \text{ °C}$

La repetibilidad se evalúa repitiendo la medida a 900 °C, obteniéndose una diferencia entre las correcciones de 0,4 °C.

A continuación se explican los cálculos para estimar cada una de las incertidumbres típicas que contribuyen al cálculo de $u(C)$ a partir de los datos anteriores:

$u(t_R)$: es la desviación típica de la media, 0,07 °C

$u(\delta t_{R,r})$: es la incertidumbre típica debida a la resolución del patrón, $0,1/\sqrt{12}$ °C

$u(\delta t_{R,c})$: es la incertidumbre típica debida a la calibración del patrón, 3/2 °C

$u(\delta t_{R,d})$: es la incertidumbre típica debida a la deriva entre calibraciones del patrón, $2/\sqrt{3}$ °C



$u(\sigma_R)$: es la incertidumbre típica debida al ETF del patrón. La fuente de calibración tiene un radio de 15 mm y se estima una variación en el radio, $\Delta r_c = \pm 2,5$ mm. Utilizando la gráfica del ETF del patrón: $\Delta\sigma = 0,0021 \Rightarrow u(\sigma) = 0,0021/\sqrt{12}$.

$u(\delta t_{R,e})$: es la incertidumbre típica debida a la falta de estabilidad del CN, $0,08/\sqrt{3}$ °C

$u(t_{PIR})$: es la desviación típica de la media, 0,4 °C.

$u(\delta t_{PIR,i})$: es la incertidumbre típica debida a la resolución del TR a calibrar, $1/\sqrt{12}$ °C

$u(\delta t_{PIR,rep})$: es la incertidumbre típica debida a la repetibilidad del TR a calibrar, $0,4/\sqrt{12}$ °C

$u(\sigma_{PIR})$: es la incertidumbre típica debida al ETF a calibrar. La fuente de calibración tiene un radio de 15 mm y se estima una variación en el radio, $\Delta r_c = \pm 2,5$ mm. Utilizando la gráfica del ETF del TR a calibrar: $\Delta\sigma = 0,0040 \Rightarrow u(\sigma) = 0,0040/\sqrt{12}$.

Con estos datos podemos hacer la siguiente tabla resumen:



Tabla 3. Resumen del cálculo de $u(C)$

Magnitud	Estimación	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coficiente de Sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$, °C
X_i	x_i , °C			
t_R	899,3	0,07 °C	1	0,07
$\delta t_{R,r}$	0	$0,1/\sqrt{12}$ °C	1	0,03
$\delta t_{R,c}$	0	$3/2$ °C	1	1,5
$\delta t_{R,d}$	0	$2/\sqrt{3}$ °C	1	1,15
σ_R	0	$0,0021/\sqrt{12}$	$\lambda T^2/c_2$	0,58
$\delta t_{R,e}$	0	$0,08/\sqrt{3}$ °C	1	0,05
t_{PIR}	891	0,4 °C	1	0,4
$\delta t_{PIR,r}$	0	$1/\sqrt{12}$ °C	1	0,3
$\delta t_{PIR,rep}$	0	$0,4/\sqrt{12}$ °C	1	0,12
σ_{PIR}	0	$0,0040/\sqrt{12}$	$\lambda T^2/c_2$	1,10
C	8,3			2,3

La incertidumbre expandida:

$$U = k \cdot u(C) = 2 \cdot 2,3 \text{ °C} = 4,6 \text{ °C}$$

