

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

México, septiembre de 2018

Derechos reservados

ÍNDICE

| | | |
|---|---|----|
| | PRESENTACIÓN | 3 |
| 1 | ALCANCE | 4 |
| 2 | TERMINOLOGÍA USADA EN ESTA GUÍA | 4 |
| 3 | ESQUEMAS DE CALIBRACIÓN | 8 |
| 4 | DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN | 14 |
| 5 | BIBLIOGRAFÍA | 22 |
| | ANEXO | 23 |

PRESENTACIÓN

Durante la evaluación de la competencia técnica de los laboratorios de calibración y de ensayo, la demostración de la trazabilidad metrológica y la estimación de la incertidumbre de medida, requiere la aplicación de criterios técnicos uniformes y consistentes.

Con el propósito de asegurar la uniformidad y consistencia de los criterios técnicos en la evaluación de la trazabilidad metrológica y la incertidumbre de medida, la entidad mexicana de acreditación, a. c., solicitó al Centro Nacional de Metrología que encabezara un programa de elaboración de Guías Técnicas de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida.

Los Comités de Evaluación, a través de los Subcomités de los Laboratorios de Calibración y de Ensayo, se incorporan a este programa y su participación está orientada a transmitir sus conocimientos y experiencias técnicas en la puesta en práctica de las Políticas de Trazabilidad y de Incertidumbre establecidas por ema, mediante el consenso de sus grupos técnicos de apoyo. La incorporación de estos conocimientos y experiencias a las Guías, las constituyen en referencias técnicas para usarse en la evaluación de la competencia técnica de los laboratorios de calibración y ensayo.

En este programa, el CENAM se ocupa, entre otras actividades, de coordinar el programa de las Guías Técnicas; proponer criterios técnicos sobre la materia; validar los documentos producidos; procurar que todas las opiniones pertinentes sean apropiadamente consideradas en los documentos; apoyar la elaboración de las Guías con eventos de capacitación; asegurar la consistencia de las Guías con los documentos de referencia indicados al final de este documento.

La elaboración de las Guías está vinculada con la responsabilidad que comparten mutuamente los laboratorios acreditados de calibración y de ensayo, de ofrecer servicios con validez técnica en el marco de la evaluación de la conformidad. La calidad de estos servicios se apoya en la confiabilidad y uniformidad de las mediciones, cuyo fundamento está establecido en la trazabilidad metrológica y en la incertidumbre de medida. Los que ejercitan la evaluación de la competencia técnica de los laboratorios, así como los que realizan la práctica rutinaria de los servicios acreditados de calibración y ensayo, encontrarán en las Guías una referencia técnica de apoyo para el aseguramiento de las mediciones.

Las Guías Técnicas de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida no reemplazan a los documentos de referencia en que se fundamentan las políticas de trazabilidad e incertidumbre de ema. Las Guías aportan criterios técnicos que servirán de apoyo a la aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2018. La consistencia de las Guías con esta norma y con los demás documentos de referencia, permitirá conseguir el propósito de

asegurar la confiabilidad de la evaluación de la conformidad por parte de los laboratorios de calibración y ensayo.

La *Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la Calibración de Termómetros de Radiación* es producto del conocimiento metrológico desarrollado en el grupo de termometría de radiación del Centro Nacional de Metrología, aplicado a las actividades de medición, calibración y evaluación en el creciente campo de aplicaciones de medición de temperatura sin contacto.

El público objetivo de la *Guía* es el personal de los laboratorios de ensayos y calibraciones, por lo que los avances en la elaboración del documento se presentaron en las reuniones de trabajo del GRUPO DE TRABAJO “TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN” de la entidad mexicana de acreditación, con el fin de recibir retroalimentación sobre la forma del contenido. La meta fue elaborar un documento accesible para personal capacitado en termometría de radiación: esto implica que esta *Guía* no sustituye la capacitación formal que es necesaria para su correcta aplicación.

Esperamos que esta *Guía* contribuya a mejorar y homogeneizar el nivel de los conocimientos en termometría de radiación y fortalecer las competencias de los laboratorios de calibración y ensayo para beneficio de la industria de nuestro país.

Dr. Daniel Cárdenas García
Coordinador Científico
Grupo de Metrología en Termometría de Radiación
Centro Nacional de Metrología

1. ALCANCE

Esta guía especifica los requisitos para calibrar termómetros de radiación para los cuales:

- se conoce la distancia focal de su sistema óptico,
- se conoce el diámetro de su campo visual a una distancia dada, y el porcentaje de la señal que se produce en su detector bajo esas condiciones, con respecto a la señal que se produciría con una fuente hemisférica que irradiara totalmente su sistema óptico,
- se cuenta con una fuente radiante capaz de producir más del 95 % de la señal que produciría una fuente hemisférica que irradiara totalmente su sistema óptico,
- se conoce la banda de respuesta espectral de sus detectores,
- su ajuste de emisividad se puede establecer a 1.

Esta Guía no contempla la calibración de termómetros de radiación que no cumplen con lo anterior.

Nota: En los suplementos de esta guía se consideran requisitos para la “calibración” de termómetros de radiación que no cumplen con los requisitos anteriores.

2. TERMINOLOGÍA UTILIZADA EN ESTA GUÍA

2.1 Fuente

Dispositivo del cual proviene la radiación electromagnética que se capta con un termómetro de radiación para realizar las mediciones. Puede ser del tipo cavidad o tipo radiador plano.

2.2 Diámetro físico de la fuente

El del círculo que limita al campo térmico de un radiador plano, o el de la superficie del fondo de una **fuente** tipo cavidad o de su abertura.

2.3 Temperatura de radiancia de una superficie

La que tendría un radiador de cuerpo negro cuya radiancia espectral integrada en un intervalo dado tuviera el mismo valor que la de la superficie, integrada en el mismo intervalo.

2.4 Dirección de medición

La del eje de simetría del ángulo sólido imaginario que colecta la radiación que incide en el sistema óptico de un termómetro de radiación para realizar las mediciones.

Nota: Para los fines de esta Guía, la **dirección de medición** deberá ser ortogonal a la superficie de la **fuente** que se mide (si se trata de un radiador plano) o la del círculo que se describe en 2.8.

2.5 Distancia de medición

Al realizar el montaje de los termómetros de radiación para la calibración, la que se establece entre el extremo del termómetro de radiación más cercano a la **fente** (la superficie radiante de un radiador plano, o la pared del fondo o el borde de la abertura de una cavidad).

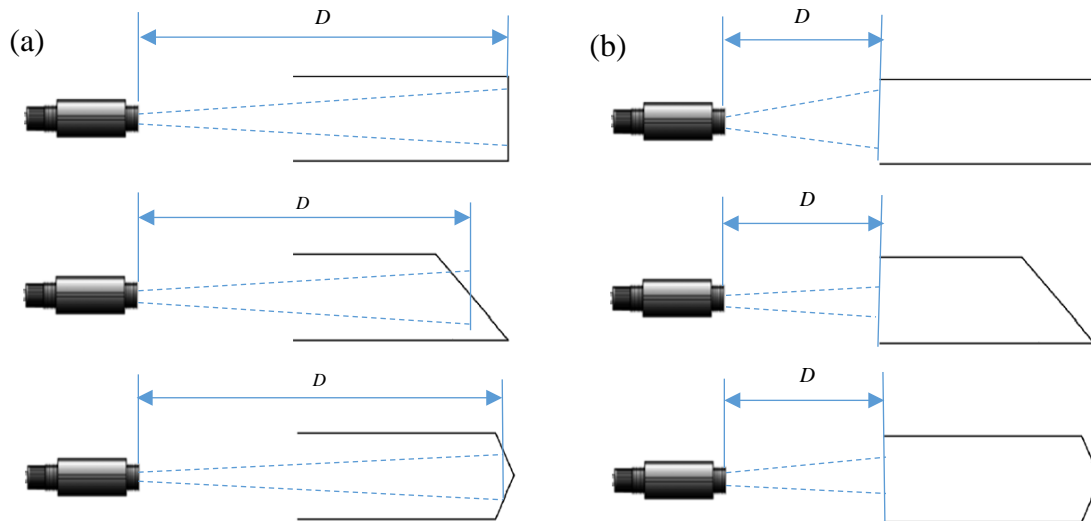


Fig. 1.1. Distancia de medición D a una cavidad (a) con respecto al fondo de la fuente (b) con respecto a su abertura.

2.6 Señal máxima

La que se calcula para un valor de temperatura dado y que sería producida en el detector del termómetro de radiación al recibir 100 % de la energía emitida por una **fente** hemisférica con radio igual a la **distancia de medición** y el termómetro de radiación colocado en el centro de ese hemisferio con la **dirección de medición** apuntando hacia su cénit.

2.7 Campo visual

Área circular que se define sobre la superficie que mide un termómetro de radiación a una **distancia de medición** dada, la cual suministra una fracción de la energía que recibe el detector del termómetro de radiación para producir una señal proporcional.

Por lo general, la energía que recibe el detector no sólo proviene del área determinada de la relación que se da en las especificaciones del termómetro de radiación como un cociente entre la **distancia de medición** y el diámetro del **campo visual**, sino también de energía que recibe el detector emitida en regiones circundantes a esa área. Por ello, la especificación del campo visual debiera incluir la fracción de la **señal máxima** que se produce en el detector, al medir un campo con tamaño obtenido de la relación **distancia de medición** / diámetro de **campo visual**.

Los valores de las fracciones de la señal producida en el detector con respecto a la **señal máxima** con **campos visuales** de diferentes diámetros, se determinan en la caracterización del **efecto del tamaño de la fuente**. Véase la Sección 2.9.

2.8 Área efectiva de la fuente

La de un círculo proyectado de la superficie de la **fuentes**, donde se cumple el requisito de uniformidad establecido en 4.1.6.

2.9 Efecto del tamaño de la fuente (ETF)

Comportamiento de los termómetros de radiación en el cual suceden variaciones en los valores indicados, cuando se usan fuentes de diferentes **diámetros físicos** o a cambios en la **distancia de medición** mientras se mantiene invariable al **diámetro físico** de la fuente. Ello se debe a que en el detector del termómetro de radiación sólo se produce una fracción de la **señal máxima** cuando no se mide el campo hemisférico como el que se describe en la Sección 2.6 o un área muy grande, tal que las indicaciones del termómetro no cambian al medir un área mayor. La fracción de la señal producida tiende al 100 % de la **señal máxima** cuando el campo medido es cada vez más grande, o aparentemente más grande por reducir la **distancia de medición**.

Se define al parámetro siguiente para caracterizar al ETF con respecto a la **señal máxima** que se produce en su detector al medir una temperatura de radiancia dada:

$$\sigma(T_{\sigma}, T_{\sigma=1}, T_L) = \frac{S(T_{\sigma}) - S(T_L)}{S(T_{\sigma=1}) - S(T_L)}, \quad (2.1)$$

donde:

$S(T_{\sigma})$ es el valor calculado de la señal del detector del termómetro de radiación que corresponde a la temperatura indicada por el termómetro de radiación, pero menor que la que corresponde a la **señal máxima**,

$S(T_{\sigma=1})$ es el valor calculado de la **señal máxima**, que corresponde también al valor máximo de la temperatura indicada por el termómetro de radiación al recibir el 100 % de la energía emitida por una fuente hemisférica o suficientemente grande, tal que no se producen más cambios en las indicaciones por aumentar el diámetro de la **fuentes**,

$S(T_L)$ es el valor calculado de la señal del detector que corresponde a la temperatura del laboratorio, indicada por el termómetro de radiación.

Los valores de $S(T)$ para T_{σ} , $T_{\sigma=1}$ y T_L , se pueden calcular con la ecuación de Sakuma-Hattori descrita en el Anexo de esta Guía.

Se usará la notación $\sigma = 1$ para indicar que para un **campo visual** dado se cumple la condición de 100 % de **señal máxima**. De igual manera, se usará la notación $\sigma = 0.9$ para indicar a un **campo visual** para el cual sólo se obtiene el 90 % de la **señal máxima**, etc.

2.10 Emisividad espectral

Cociente que resulta al dividir los valores de la radiancia espectral de una superficie, debida a la radiación emitida por la superficie, y los de la radiancia espectral de un radiador de cuerpo negro que se encuentra a la misma temperatura, determinadas ambas radiancias a la misma longitud de onda:

$$\varepsilon_{\lambda,s}(T) = \frac{L_{\lambda,s}(T)}{L_{\lambda}(T)}, \quad (2.2)$$

donde:

$L_{\lambda,s}(T)$ es la radiancia espectral de la superficie, debida a la radiación emitida por ésta, que se encuentra a la temperatura T en kelvin, a una longitud de onda λ dada,

$L_{\lambda}(T)$ es la radiancia espectral de un radiador de cuerpo negro calculada con la ley de radiación de Planck, a la misma temperatura T de la superficie y la misma longitud de onda λ .

2.11 Emisividad efectiva de la fuente

Es el valor de emisividad determinado mediante el cociente siguiente:

$$\varepsilon_{ef}(\varepsilon_{\lambda}, \lambda_1, \lambda_2, T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda}(T) \cdot L_{\lambda}(T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(T) d\lambda}, \quad (2.3)$$

donde:

$\varepsilon_{\lambda}(T)$ son los valores medidos de la **emisividad espectral** de la **fente**, para longitudes de onda comprendidas entre λ_1 y λ_2 , a la temperatura T (en kelvin) de dicha **fente**,

$L_{\lambda}(T)$ es la radiancia espectral calculada con la ley de radiación de Planck a la temperatura T que se usó para medir la emisividad espectral de la **fente**,

λ_1, λ_2 son las longitudes de onda que delimitan la región espectral de interés. Para los propósitos de esta Guía, la región espectral de interés es la banda de respuesta espectral de los termómetros de radiación que intervienen en una calibración, ya sea el termómetro de radiación patrón o los termómetros de radiación que se calibran.

2.12 Superficie gris

Superficie que tiene una emisividad de valor constante menor que 1, para cualquier longitud de onda de un intervalo espectral dado.

3. ESQUEMAS DE CALIBRACIÓN

3.1 Con trazabilidad a la calibración de un termómetro de contacto patrón

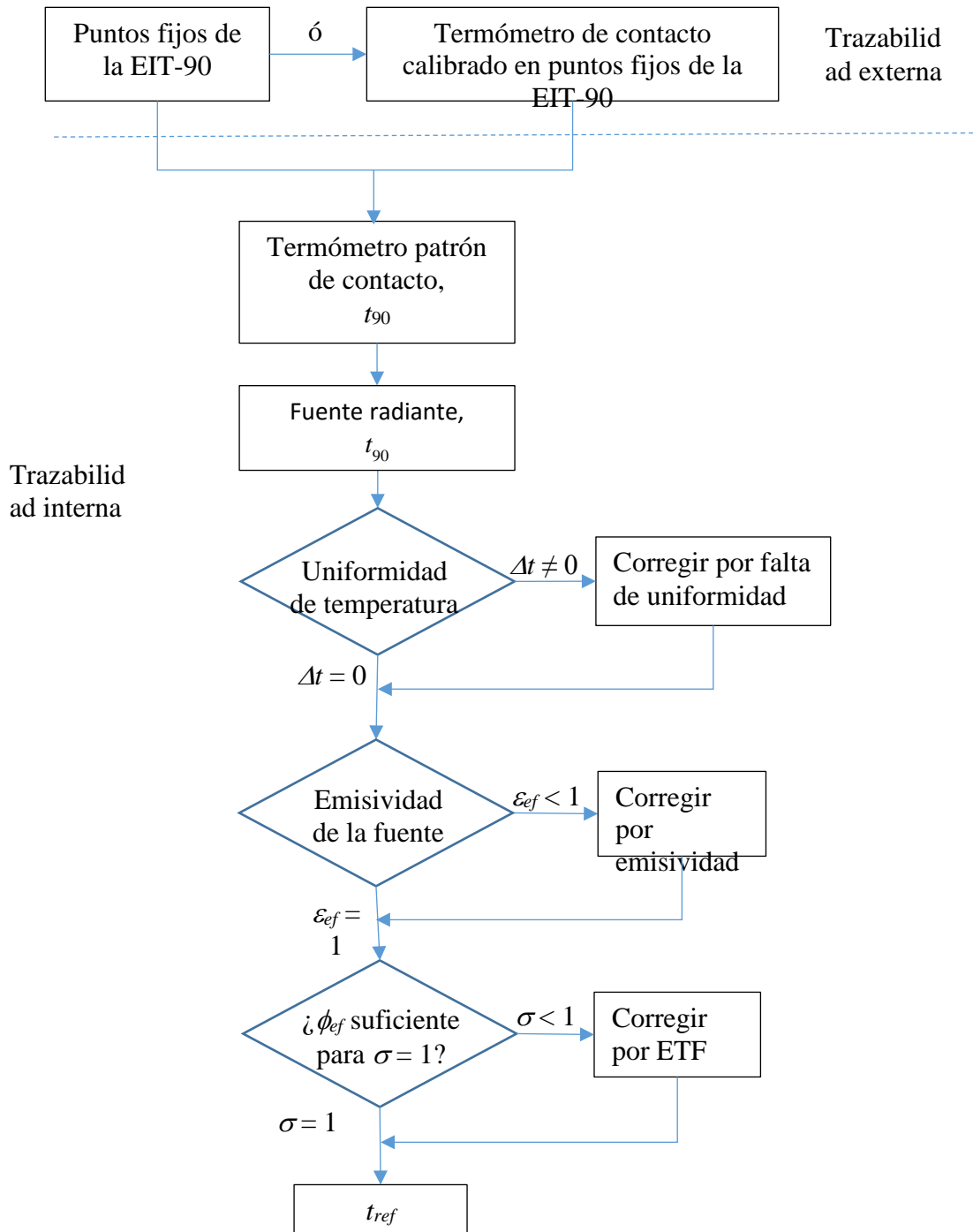


Fig. 3.1. Diagrama de flujo para obtener el valor de la temperatura de referencia cuando el termómetro patrón es uno de contacto y el que se calibra se encuentra ajustado a $\epsilon_{instr} = 1$.

El esquema de calibración cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 3.1, tiene como origen de la trazabilidad al conjunto de celdas de puntos fijos de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) [1] con las cuales se calibra el termómetro de contacto patrón que otorgará trazabilidad a las mediciones de las temperaturas de la **fuelle** con la que se calibrarán los termómetros de radiación de los clientes del laboratorio. Opcionalmente, el termómetro de contacto patrón puede estar calibrado por comparación contra otro termómetro de contacto patrón calibrado en puntos fijos de la EIT-90, que puede pertenecer o no al laboratorio que realizará las calibraciones de los termómetros de radiación de sus clientes.

Para la correcta aplicación del esquema de la figura 3.1 los termómetros de radiación que se calibran con ajuste de emisividad igual a 1 y se corrigen los valores medidos de la temperatura t_{90} de la **fuelle**, debido a las siguientes magnitudes de influencia:

- **Falta de uniformidad de temperatura**

Por lo general, la superficie radiante de la **fuelle** tiene gradientes de temperatura que ocasionan variaciones de la temperatura indicada en función de la región medida y el área cubierta por el **campo de visión** del termómetro de radiación que se calibra. Esta falta de uniformidad debe caracterizarse y no debe confundirse con las variaciones de temperatura en el tiempo.

Aparte, debe considerarse que la temperatura donde se coloca el sensor del termómetro de contacto patrón para la medición de la temperatura de la **fuelle** difiere de la temperatura de la superficie que miden los termómetros de radiación que se calibran (por intercambio de calor por conducción y radiación, y también por corrientes de convección en la atmósfera que se encuentra enfrente de la superficie de la **fuelle**).

El laboratorio que realiza las calibraciones deberá contar con las estimaciones pertinentes de las correcciones que aplicará a los valores indicados por el termómetro de contacto patrón.

- **Emisividad efectiva**

Por lo general, las **emisividades efectivas** de las **fuentes** son menores que 1 y esto tiene consecuencia en las temperaturas de radiancia que se miden con los termómetros de radiación durante la calibración. Las temperaturas de radiancia se calculan con los valores de la temperatura de la **fuelle** medida con el termómetro de contacto patrón, corregidos por los gradientes de temperatura que se establecen y se describen en el párrafo anterior. El valor de la **emisividad efectiva** se determina para cada una de las bandas de respuesta espectral de los termómetros que se calibran.

- **Diámetro del área efectiva de la fuente**

El método descrito en esta Guía pretende que las calibraciones se realicen libres del ETF. Para ello es necesario que se conozca la fracción de **señal máxima** de los **campos visuales** de los termómetros de radiación que se calibran, para entonces determinar si el diámetro del **área efectiva** de la fuente tiene el tamaño adecuado para minimizar dicho efecto, tal como se indica en la Sección 4.1.5.

Cuando a la **distancia de medición** el diámetro del **área efectiva** de la fuente no es suficiente para alcanzar la condición $\sigma = 1$ para el **campo visual** del termómetro de radiación que se calibra, se

tienen que determinar correcciones por EFT para los valores indicados por los termómetros de radiación que se calibran, a cada una de las temperaturas de calibración. Véase la Tabla 1 en la sección 4.1.5.

Con los valores de t_{90} obtenidos, corregidos para compensar las magnitudes de influencia mencionadas (falta de uniformidad de temperatura y **emisividad efectiva**) se determinan los valores de las temperaturas de referencia contra los cuales se comparan las indicaciones de los termómetros de radiación que se calibran, corregidas por ETF si fuera pertinente.

3.2 Con trazabilidad a la calibración de un termómetro de radiación patrón

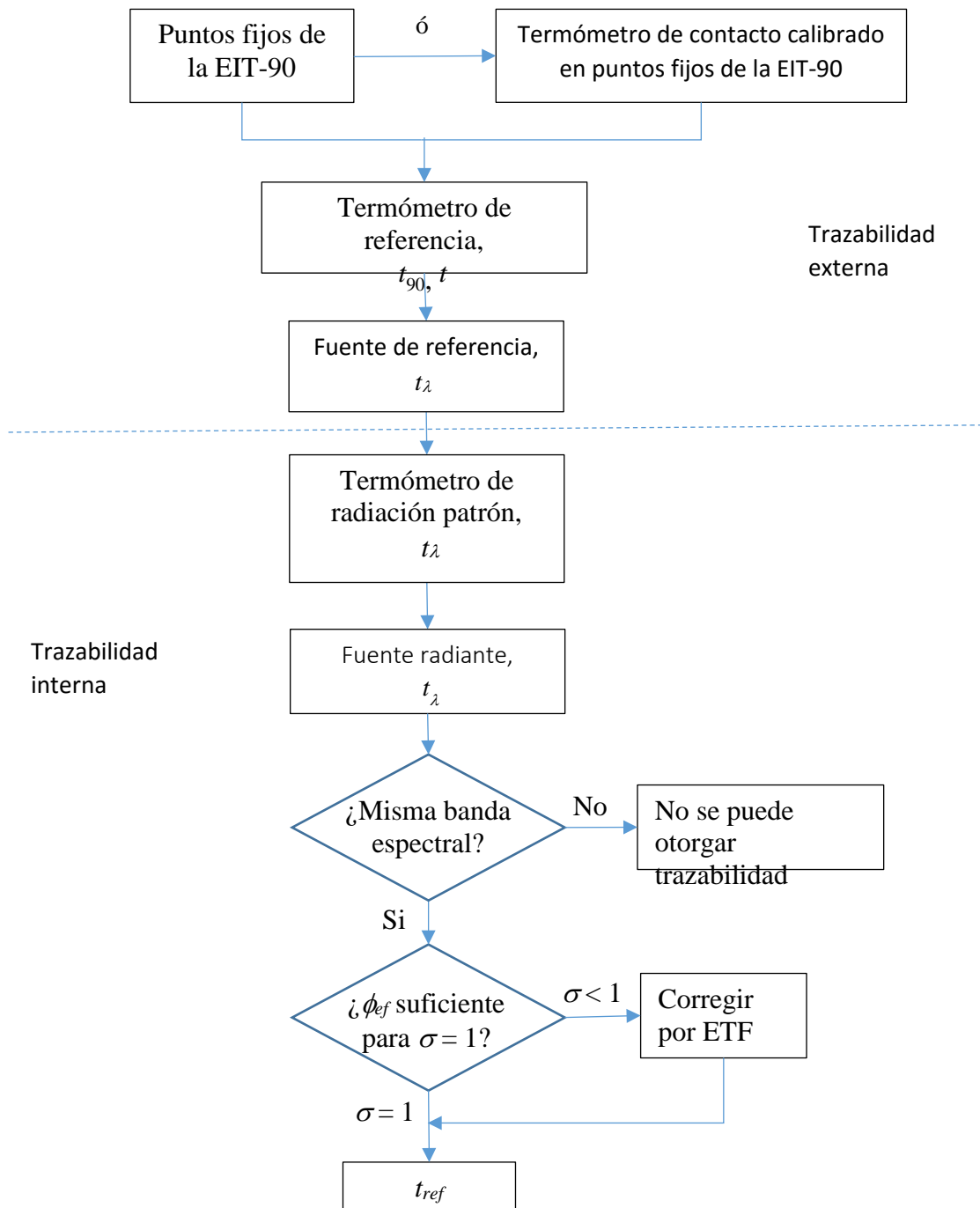


Fig. 3.2. Diagrama de flujo para obtener el valor de la temperatura de referencia cuando el termómetro patrón es uno de radiación y el que se calibra se encuentra ajustado a $\varepsilon_{instr} = 1$.

El esquema de calibración cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 3.2 tiene como origen de la trazabilidad al conjunto de celdas de puntos fijos de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) con las cuales se calibra un termómetro de referencia que puede ser uno de radiación o uno de contacto, el cual definirá las temperaturas de radiancia de una **fuentes** de referencia que se usará para la calibración del termómetro de radiación patrón del laboratorio. De igual manera que en la Sección 3.1, el termómetro de referencia puede estar calibrado por comparación contra otro termómetro calibrado en puntos fijos de la EIT-90.

Para la correcta aplicación del esquema descrito en la figura 3.2, los termómetros de radiación se calibran ajustados a un valor de emisividad igual a 1 incluyendo al patrón, teniendo en consideración a las siguientes magnitudes de influencia, debidas a las características de los termómetros de radiación:

- **Banda de respuesta espectral**

Los valores de las **temperaturas de radiancia** t_λ de la fuente del laboratorio, medidos con el termómetro de radiación patrón son válidos sólo si los termómetros de radiación que el laboratorio calibra a sus clientes operan con la misma banda espectral del termómetro de radiación patrón.

No se puede otorgar trazabilidad a calibraciones de termómetros que operen con bandas de respuesta distintas a menos que la **emisividad efectiva** de la **fuentes** radiante sea mayor que 0.999, para cada una de las bandas de respuesta de los termómetros. El laboratorio deberá sustentarlo con mediciones de su emisividad espectral que cubran los intervalos espectrales en que operan el termómetro de radiación patrón y los termómetros de radiación que se calibran con esa fuente y demostrar que su personal tiene capacidad para calcular las correcciones que fueran necesarias a las mediciones de temperaturas de radiancia obtenidas con el termómetro de radiación patrón, para adecuarlas a las mediciones de temperaturas de radiancia hechas con los termómetros de radiación que se calibran a los intervalos espectrales con que operan.

- **Campos visuales de los termómetros de radiación**

De igual manera que en el esquema 3.1, es necesario que se conozca la fracción de **señal máxima** de los **campos visuales** de los termómetros de radiación que se calibran, para entonces determinar si el diámetro del **área efectiva** de la fuente es suficientemente grande para minimizar el ETF, como se indica en la Sección 4.1.5. Los diámetros de los **campos visuales** a $\sigma=1$, tanto para el termómetro de radiación patrón como para los termómetros de radiación que se calibran, deben ser menores que el diámetro del **área efectiva de la fuente**, tantas veces como se infiere de los valores dados en la Tabla 1. Si ésta condición no se cumple, se tienen que determinar correcciones por el EFT para las indicaciones de los termómetros de radiación, tanto para el patrón como para los que se calibran.

Con los valores de t_λ obtenidos con el termómetro de radiación patrón, o sus valores corregidos por ETF cuando no se cumple la condición $\sigma=1$, se obtienen los valores de la temperatura de referencia contra los cuales se comparan las indicaciones de los termómetros que se calibran.

En este esquema, la trazabilidad proviene de la calibración del termómetro de radiación patrón y no es necesario que la **fuentes** radiante esté calibrada. La emisividad efectiva de la **fuentes** debe ser

mayor que 0.9 y que el arreglo experimental montado para realizar las calibraciones debe evitar la radiación extraviada proveniente de fuentes de temperatura desconocida.

3.3 Con trazabilidad a una fuente calibrada con un termómetro de radiación de referencia

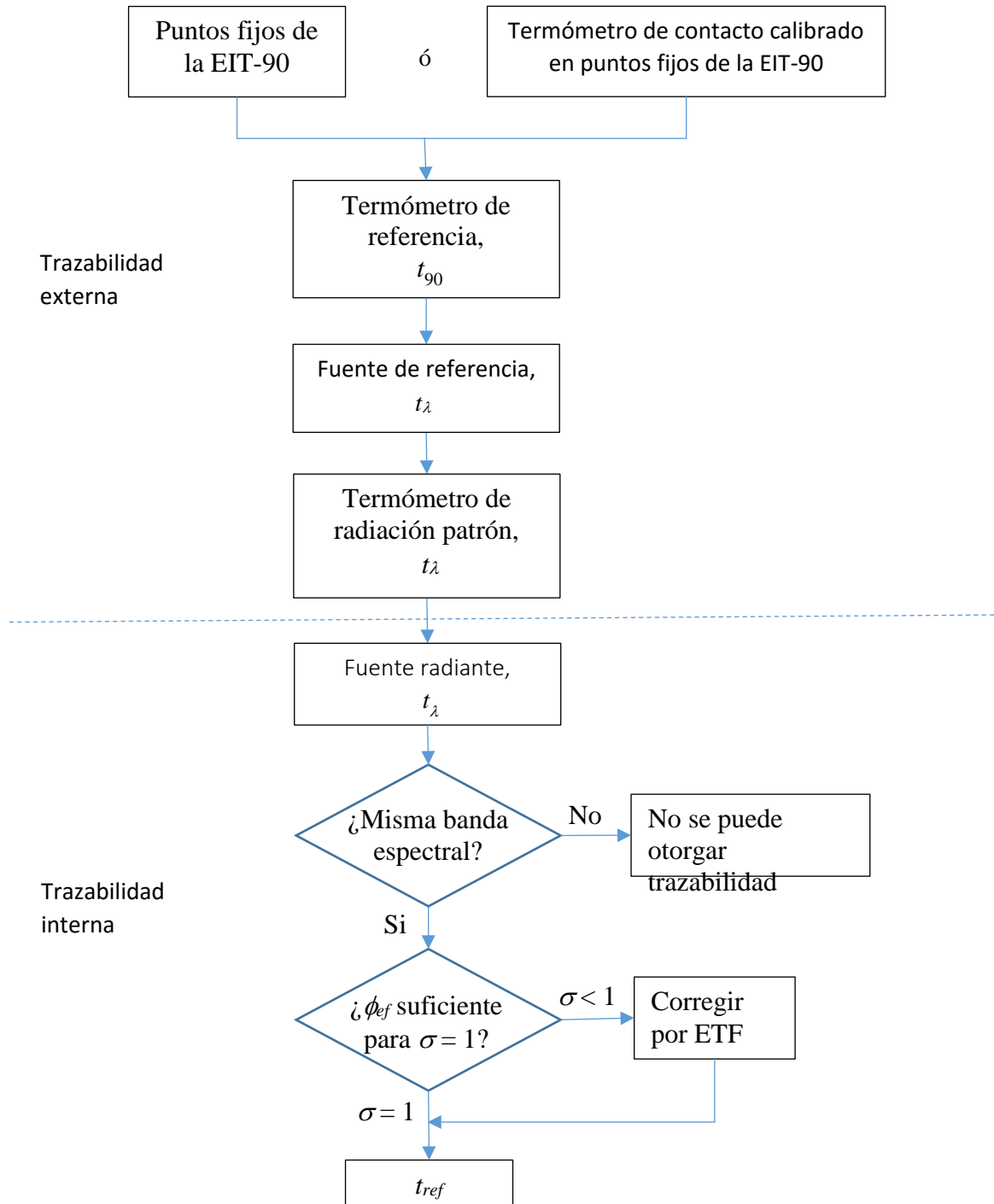


Fig. 3.3. Diagrama de flujo para obtener el valor de la temperatura de referencia cuando el patrón es una fuente calibrada con un termómetro de radiación.

Para el esquema de calibración del diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.3, la trazabilidad interna del laboratorio que realiza las calibraciones proviene de la calibración de la **fuente**. El termómetro de radiación patrón con el cual se calibra la **fuente** puede calibrarse de acuerdo con los esquemas descritos en 3.2 ó 3.3. La calibración de la fuente radiante del laboratorio dará trazabilidad a mediciones de calibraciones de termómetros de radiación que operen con la misma banda de respuesta espectral del termómetro de radiación patrón con el cual se calibró la **fuente**. Esto equivale a decir, que si los termómetros que se van a calibrar operan con la banda espectral de 8 μm a 14 μm , entonces la calibración de la **fuente** debe haberse realizado con un termómetro de radiación patrón que también opera con la banda de 8 μm a 14 μm .

En este esquema el termómetro de radiación patrón no pertenece al laboratorio que realiza las calibraciones sino al que realiza la calibración de la **fuente**. Opcionalmente, el laboratorio puede calibrar a la **fuente** si cuenta con un termómetro de radiación patrón calibrado que opere con la banda de respuesta espectral con que operan los termómetros que calibrará el laboratorio.

Para la correcta aplicación de este esquema, es necesario que la calibración de la **fuente** se haya realizado con mediciones de las **temperaturas de radiancia** de su cavidad o su superficie, es decir, con el termómetro de radiación patrón ajustado a un valor de emisividad igual a 1, que los termómetros de radiación que se calibran se ajusten a un valor de emisividad igual a 1 y los diámetros de los **campos visuales** a $\sigma = 1$ deben ser menores que el diámetro del **área efectiva** de la **fuente**, o se determine una corrección por ETF si esta condición no se cumple, tal como se solicita en el párrafo titulado “Consideraciones sobre el diámetro del área efectiva de la fuente” en la Sección 4.1.5.

4. DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN

4.1 Sobre el sistema de referencia

4.1.1 Al usar un termómetro de contacto patrón

4.1.1.1 Calibración del patrón

Como se indica para el esquema descrito en 3.1, la calibración del termómetro de contacto patrón puede hacerse en puntos fijos de la EIT-90 o “por comparación”. El intervalo de temperaturas cubierto en la calibración del termómetro de contacto patrón debe cubrir totalmente los intervalos de temperaturas de los servicios que el laboratorio ofrece.

4.1.1.2 Tipos de termómetros de contacto

Pueden ser termopares, termistores o tipo RTD con capacidad de lograr la exactitud requerida como se señala en la sección 5.5.2 de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006.

Se debe asegurar que los diámetros y longitudes de sus tallos son adecuados a los diámetros de los pozos que permiten insertarlos en las paredes de las **fuentes**, para minimizar las fugas de calor.

4.1.1.3 Emisividad efectiva de la **fuentes**

Es conveniente que la emisividad efectiva de la fuente utilizada para las calibraciones tenga una emisividad efectiva mayor que 0.9. El valor de emisividad requerido para la determinación de la temperatura de referencia en las calibraciones, puede obtenerse de las maneras siguientes:

- (a) Para una fuente plana se le debe calcular con la ecuación 2.3 de esta Guía, en función de la emisividad espectral medida a su superficie.
- (b) Para una fuente con cavidad se le debe calcular con base en sus dimensiones, el perfil de temperaturas de sus paredes internas y en la emisividad espectral del recubrimiento de sus paredes, u obtenerse como el resultado de una medición.

4.1.2 Al usar un termómetro de radiación patrón

4.1.2.1 Calibración del patrón

Puede llevarse a cabo bajo los esquemas descritos en 3.1 o 3.2. El intervalo de temperaturas cubierto en la calibración del termómetro de radiación patrón debe cubrir totalmente los intervalos de temperaturas de los servicios que el laboratorio ofrece.

4.1.2.2 Distancia focal

El termómetro de radiación que funja como patrón debe tener una distancia focal definida.

4.1.2.3 Tiempo de estabilización de las lecturas

Se debe conocer el tiempo de respuesta del termómetro de radiación patrón para evitar que se tomen lecturas antes de transcurrido ese tiempo.

4.1.2.4 ETF

La calibración del termómetro de radiación patrón debe estar acompañada del estudio del ETF a una distancia de medición igual a su distancia focal y cuando menos a la temperatura más alta del intervalo de los servicios que el laboratorio ofrece a sus clientes.

4.1.2.5 Ajuste de emisividad

El termómetro de radiación que funja como patrón debe permitir un ajuste de emisividad a 1.0.

4.1.2.6 Banda de respuesta espectral

La validez de las calibraciones dependerá de la similitud de la respuesta espectral del termómetro de radiación patrón con la de los termómetros de radiación que se calibran. Como mínimo, los termómetros de radiación (el patrón y los que se calibran) deben tener especificadas las mismas longitudes de onda como límites de las bandas de respuesta espectral.

4.1.3 Al usar una fuente patrón

4.1.3.1 Calibración de la **fuentes**

La calibración de la **fuentes** debe hacerse midiendo las temperaturas de radiancia de su superficie o su cavidad, con un termómetro de radiación que opere con la misma banda de respuesta que la que usan los termómetros de radiación que se calibrarán usando la fuente.

4.1.4 Consideraciones sobre la deriva del patrón

El laboratorio debe contar con una política de calidad que establezca los periodos de calibración de sus patrones y un procedimiento para el manejo que se dará a la deriva a la que pueda estar sujeto el patrón entre calibraciones subsecuentes y el tratamiento que se da a la deriva en la estimación de la incertidumbre de los servicios que ofrece.

4.1.5 Consideraciones sobre el diámetro del área efectiva de la fuente

El **área efectiva** de la **fuentes** se considera insuficiente para llevar a cabo la calibración cuando a la **distancia de medición** se recorre el **campo visual** de un termómetro de radiación a lo largo del diámetro del **área efectiva** de la **fuentes**, y en ella no se observa una región donde las indicaciones de los termómetros de radiación permanecen aparentemente invariables, sólo se obtiene un valor máximo en el centro de ese diámetro.

La especificación del cociente “**campo visual / distancia de medición**” por sí sola no es suficiente para determinar si el diámetro del **área efectiva** de la fuente es adecuado para llevar a cabo la calibración con un efecto mínimo del EFT, por lo cual se debe realizar la prueba que se describe en el párrafo anterior. El ETF en las indicaciones de los termómetros de radiación (los que se calibran y el termómetro patrón cuando es de radiación), se minimiza cuando el diámetro del **área efectiva** de la **fuentes** es mayor a cierto número de veces el diámetro del **campo visual** especificado en función del parámetro σ que caracteriza al ETF (véase la Sección 2.9).

En la Tabla 1 se indica el número de veces N que el diámetro del **área efectiva** de la fuente debiera ser mayor al diámetro del **campo visual** del termómetro en función de σ , con el objeto de minimizar el ETF. Los valores de la tabla se calcularon con base en el modelo presentado en [2]:

| Tabla 1. Número de veces que debe ser el diámetro del área efectiva de la fuentes en función del parámetro σ del campo visual del termómetro de radiación. | |
|---|-----|
| σ | N |
| 0.9000 | 5 |
| 0.9159 | 4 |
| 0.9370 | 3 |
| 0.9646 | 2 |
| 0.9938 | 1 |

4.1.6 Consideraciones sobre la uniformidad de la temperatura en la fuente

La contribución a la incertidumbre combinada de la calibración, debida a la falta de uniformidad de temperaturas de radiancia dentro de su **área efectiva**, no debe ser mayor al 10 %. La falta de uniformidad puede deberse a gradientes de temperatura en las paredes de la **fuentes** o a falta de uniformidad de la emisividad del recubrimiento que le es aplicado para elevar su **emisividad efectiva** o un efecto combinado de ellos.

4.2 Termómetros de radiación que se calibran

4.2.1 Sobre el ajuste de emisividad,

Los esquemas de calibración presentados en esta Guía son aplicables a termómetros de radiación que permiten un ajuste de emisividad a 1.00.

4.2.2 Sobre la distancia focal y campo visual

Debe conocerse la distancia focal de los termómetros de radiación que se calibran, los diámetros de sus **campos visuales** a esa distancia y los valores del parámetro σ del EFT asociado a esos diámetros. Esto tiene el propósito de poder determinar si el diámetro efectivo que se utilizará en las calibraciones es suficientemente grande para realizarlas con una influencia mínima del ETF, de acuerdo con la Tabla 1 (Sección 4.1.5).

4.3 Sobre los accesorios para el montaje

4.3.1 Soportes para los termómetros

El laboratorio deberá contar con accesorios que permitan sujetar a los termómetros de radiación con firmeza y reproducir el montaje en cualquier momento distinto al de la calibración. La sujeción debe permitir que no se pierda la posición ajustada, orientada hacia la **fuer**te.

4.3.2 Sistema de desplazamiento

Para ubicar el centro del dispositivo de centrado con que cuentan los termómetros de radiación que se calibran (apuntador láser, mirilla, etc.), se debe disponer de un sistema que permita desplazar su **dirección de medición** a lo largo del **diámetro físico** horizontal de la **fuer**te y permitir también un giro de 90° de los termómetros que se calibran, para hacer la misma prueba, pero en una dirección que corresponda al desplazamiento vertical del **campo visual** a lo largo del mismo **diámetro físico** de la **fuer**te, de manera que se pueda inferir el sitio apuntado con respecto al centro del campo medido por el termómetro de radiación donde se obtienen indicaciones invariables.

El sistema de desplazamiento debe permitir realizar la prueba que se indica en 4.1.5 para confirmar si el diámetro del **área efectiva** de la fuente es adecuado para la realización de las calibraciones.

Cuando el termómetro patrón es uno de radiación, el sistema de desplazamiento se usa también para **intercambiar alternadamente** la posición de ese termómetro de radiación por la de los termómetros de radiación que se calibran, enfrente del centro de la **fuer**te.

4.4 Método

El método de calibración contemplado en esta Guía es por comparación de los valores indicados por el termómetro de radiación que se calibra y los valores de **temperatura de radiancia** de la **fuer**te que se determinan con las temperaturas medidas por el termómetro patrón.

El modelo de medición debe estar basado en la ley de radiación de Planck tal como se establece en la EIT-90.

Para termómetros de radiación monocromáticos, la radiancia que mide un termómetro de radiación es la radiancia espectral:

$$L_{\lambda}(T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (3.1)$$

Para termómetros de radiación de banda finita, con respuesta espectral en el intervalo de λ_1 a λ_2 , la radiancia medida es:

$$L_{\lambda_1, \lambda_2}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_{1L}}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (3.2)$$

Para termómetros de radiación total, respuesta espectral $\lambda \in [0, \infty)$, la radiancia medida es:

$$L(T) = \int_0^{\infty} \frac{c_{1L}}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda = \frac{\pi^4 c_{1L}}{15c_2^4} T^4 \quad (3.3)$$

Cualquier modelo utilizado debe obtenerse a partir de alguna de las expresiones anteriores, dependiendo del tipo de termómetro de radiación (monocromático, de banda finita, o de radiación total) y en el caso de que contenga parámetros ajustables estos deben tener un significado físico. *Nota. En general, el tipo de termómetro de radiación es el de banda finita por lo que se debe tener cuidado en la justificación si se desea utilizar como fundamento la ecuación relacionada con un termómetro de radiación monocromático o total.*

4.4.1 Mensurando

El mensurando en la calibración de termómetros de radiación, es el error de medición que tienen a cada una de las temperaturas de calibración:

$$\text{Error de medición} = t_{IBC} - t_{REF} \quad (3.4)$$

donde:

t_{IBC} son los valores de temperatura de radiancia indicados por el termómetro de radiación que se calibra, a cada una de las temperaturas de calibración,

t_{REF} son los valores de **temperatura de radiancia** de referencia calculados a partir de las temperaturas medidas a la **fente** con el termómetro patrón, para cada una de las temperaturas de calibración. La estimación de sus valores dependerá del esquema de calibración utilizado para la calibración.

4.4.2 Ecuación de medición y magnitudes de influencia

La ecuación de medición para la calibración de un termómetro de radiación estará basada en un modelo de medición que debe ser congruente con el arreglo experimental. En general, existen magnitudes de influencia que deben evaluarse en todas las calibraciones, además de las particulares a cada laboratorio de calibración. Estas últimas deben cubrir las diferencias entre el

modelo de medición utilizado y su realización experimental. Las magnitudes de influencia que deben tomarse en cuenta para la estimación de la incertidumbre aparecen en [3].

Para un termómetro de radiación de lectura directa, la ecuación de medición mínima aceptable para la calibración utiliza el modelo de Sakuma-Hattori, donde a partir del valor de temperatura leído directamente se encuentra el valor de la señal con la aproximación de Saunders-White [4].

4.4.3 Realización de la calibración

4.4.3.1 Preparación

Los termómetros de radiación deben aclimatarse a las condiciones del laboratorio por periodos mínimos de 24 horas. La humedad relativa del laboratorio debiera estar dentro del intervalo de $50\% \pm 30\%$. La temperatura del lugar donde se realizó la calibración deberá ser declarada sin ambigüedades en el reporte de la calibración.

Los lentes debieran estar limpios a simple vista. Si fuera necesario limpiarlos, ello debiera hacerse con conocimiento y autorización del cliente y bajo las indicaciones del fabricante (si las hubiera) o de común acuerdo con el cliente.

4.4.3.2 Instalación de los instrumentos

Con los soportes disponibles para el montaje, los termómetros de radiación se instalan apuntando hacia el centro de la **fuer**te, con su **dirección de medición** coincidente con el eje de geometría de la cavidad de una fuente tipo cavidad de cuerpo negro o con la normal que emerge del centro de la superficie de un radiador plano.

Cuando el termómetro patrón es uno de radiación, se requiere además del sistema de desplazamiento que se describe en 3.2.3.2.

Cada uno de los termómetros se coloca a una **distancia de medición** igual a la distancia focal de sus sistemas ópticos.

4.4.3.3 Dirección apuntada por los termómetros de radiación

Cuando se lleva a cabo la prueba descrita en 4.3.2 para el dispositivo de centrado de los termómetros de radiación y se determina que la dirección apuntada por ese dispositivo no coincide con el centro de la región de la superficie de la fuente donde se obtienen indicaciones invariables, se debe llegar a un acuerdo con el cliente sobre cual dirección se debe usar para la calibración:

- (a) la que apunta el dispositivo del termómetro de radiación o
- (b) el centro de la región de indicaciones invariables en la abertura o sobre la superficie de la **fuer**te.

En caso de que no se obtenga una respuesta oportuna de parte del cliente, la opción elegida por el laboratorio deberá reportarse con claridad en el reporte de la calibración.

4.4.3.4 Ajuste de emisividad

El ajuste de emisividad de todos los termómetros de radiación, incluyendo al patrón cuando es de radiación, se establece en 1.

4.4.3.5 Toma de lecturas y análisis de datos

Se lleva a cabo de acuerdo a los procedimientos del laboratorio.

4.4.3.6 Correcciones a las mediciones del patrón

Se determinan las correcciones que se solicitan para el esquema utilizado para la calibración (3.1, 3.2 o 3.3) y se aplican a los promedios de las temperaturas obtenidas con el patrón, para luego obtener los valores de las temperaturas de referencia.

4.4.3.7 Resultados y estimación de la incertidumbre

Se determina el error de los termómetros de radiación calibrados con respecto a los valores de las temperaturas de referencia.

La incertidumbre del error obtenido debe estimarse de acuerdo con [3, 5], tomando en consideración las magnitudes que aparecen en dichos documentos.

4.5 Requerimientos técnicos para la calibración

En este documento no se cubren todos los requerimientos técnicos para calibrar termómetros de radiación. Los requerimientos técnicos que aplican aparecen en [6].

4.6 Información en el procedimiento de calibración

El procedimiento de calibración debe incluir explícitamente la información que permita reproducir la calibración. Deben incluirse al menos lo siguiente:

- Los criterios de aceptación o rechazo del IBC.
- La información que permite identificar los componentes del arreglo experimental de calibración junto con las características relevantes de los mismos: distancia a la que se coloca el termómetro de radiación patrón, emisividad efectiva de las fuentes de radiación, etc.
- Los valores mínimos y máximos permitidos de temperatura ambiente, de humedad relativa, así como la máxima variación permitida de la temperatura ambiente durante la calibración.
- Las condiciones que deben cumplirse para establecer que los equipos llegaron a la estabilidad
- Las condiciones que deben cumplirse para establecer que el arreglo experimental permite mediciones confiables (por ejemplo, cómo se establece la distancia de calibración para el IBC y cómo se garantiza el enfoque del IBC).

4.7 Desviaciones al método

El método propuesto en esta Guía facilita mantener la trazabilidad de las mediciones y sustenta su confiabilidad al medir **temperaturas de radiancia**. Cualquier desviación al método definido debe ser validada técnicamente y estar sustentada por requerimientos de uso del cliente.

Debe quedar claro que un requerimiento de uso del cliente debe estar soportado por el conocimiento técnico de la medición. Es responsabilidad del laboratorio informar al cliente de las implicaciones que se tienen al realizar la calibración con desviaciones al método aquí presentado.

También es responsabilidad del laboratorio explicar al cliente que una desviación al método puede ocasionar la pérdida de trazabilidad de las mediciones: se debe informar al usuario sobre todas las condiciones bajo las cuales se realizó la calibración y que los resultados publicados sólo tienen validez y que se preserva la trazabilidad si se reproducen las condiciones de la calibración durante el uso.

En los suplementos a esta Guía se describen metodologías para realizar calibraciones de termómetros de radiación con desviaciones al método descrito en esta Guía.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Preston-Thomas, The International Scale of 1990 (ITS-90), *Metrología* **27**, 3-10, 1990.
- [2] D. Cywiak, D. Cárdenas-García, H. Rodríguez-Arteaga, INFLUENCE OF SIZE OF SOURCE EFFECT ON ACCURACY OF LWIR RADIATION THERMOMETERS; *Metrol. Meas. Sys.*, Vol 23 (2016), No. 4, pp 661-667.
- [3] D. Cárdenas García, MAGNITUDES DE INFLUENCIA EN LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE RADIACIÓN DEBAJO DEL PUNTO FIJO DE LA PLATA, publicaciones gratuitas del CENAM, diciembre 2016.
- [4] P. Saunders, Calibration and use of low-temperature direct-reading radiation thermometers, *Meas. Sci. Technol.* **20**, (2009).
- [5] Grupo de trabajo 5 en Termometría de Radiación del CCT, Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver Point, versión final, BIPM, Abril 2008.
- [6] D. Cárdenas García, *et al*, REQUERIMIENTOS TÉCNICOS PARA LA MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN EN TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN, publicaciones gratuitas del CENAM, noviembre 2016.

ANEXO

Ecuación de Sakuma-Hattori

Los valores de la señal solicitados en la ecuación 2.1 de esta Guía, pueden obtenerse con la ecuación de Sakuma-Hattori:

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT + B}\right) - 1}, \quad (\text{A.4})$$

donde:

c_2 es la segunda constante de radiación, con valor asignado igual a 1.4388×10^{-2} m·K en [6],

A, B constantes que dependen del intervalo de longitudes de onda de trabajo del termómetro,

C constante que depende del intervalo de longitudes de onda y de la respuesta espectral del termómetro, pero que arbitrariamente puede asignársele un valor igual a 1.

Los valores de las constantes A y B , pueden determinarse con las ecuaciones siguientes (aproximación de Saunders-White), luego de hacer la suposición de que la transmitancia espectral del filtro del termómetro es rectangular contenida entre $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, donde λ_2 y λ_1 son las longitudes de onda que delimitan a la banda de respuesta del termómetro y con una longitud de onda central λ_0 [3]:

$$A = \lambda_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right)^2 \right] \quad (\text{A.5})$$

$$B = \frac{c_2}{24} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right)^2 \quad (\text{A.6})$$