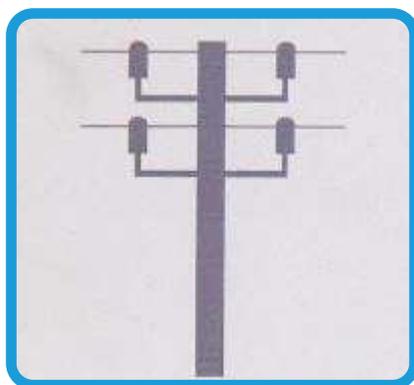
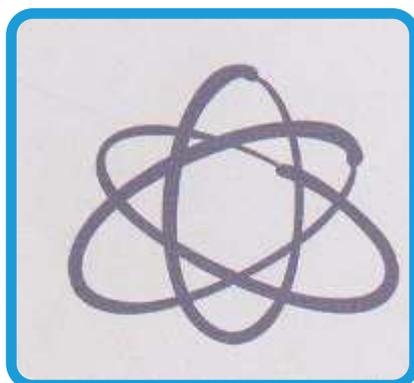
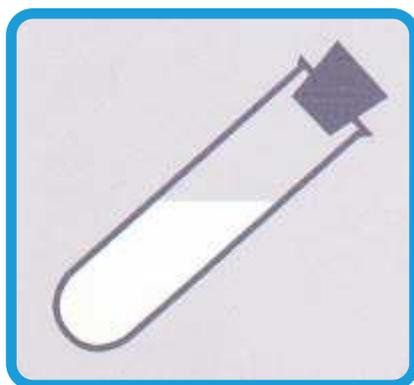
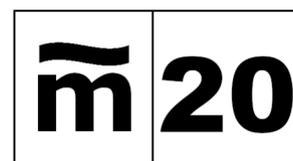


Metrología



PROCEDIMIENTO TH-006 PARA LA CALIBRACIÓN
DE TERMÓMETROS DE RESISTENCIA DE PLATINO



PATRONES EN CÉLULAS DEL PUNTO TRIPLE DEL AGUA

PROCEDIMIENTO TH-006

CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE RESISTENCIA DE PLATINO PATRONES EN CÉLULAS DEL PUNTO TRIPLE DEL AGUA

La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web (www.cem.es).

Los procedimientos editados por el CEM presentan modelos de calibración, en línea con documentos clave universales como son el Sistema Internacional de unidades (SI), el Vocabulario internacional de metrología (VIM) o la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Como modelos que son, los usuarios de los mismos pueden, bajo su responsabilidad, modificarlos para adecuarlos a sus necesidades específicas (instrumentación, condiciones ambientales, etc.). En tal caso, siempre deberá primar el sentido crítico y la ética profesional.

El CEM no acepta ninguna responsabilidad derivada de la interpretación y/o uso de este procedimiento.

El CEM no mantiene correspondencia sobre el contenido de los procedimientos.

ÍNDICE

1. OBJETO	3
2. ALCANCE]	3
3. DEFINICIONES	3
4. GENERALIDADES	6
5. DESCRIPCIÓN	8
5.1. Equipos y materiales	8
5.2. Operaciones previas	9
5.2.1. Comprobación de la célula del Punto Triple del Agua	9
5.2.2. Realización del Punto Triple del Agua con nieve carbónica.	9
5.2.3. Realización del Punto Triple del Agua con nitrógeno líquido.	11
5.2.4. Identificación e inspección inicial del termómetro.	11
5.2.5. Estabilización previa	11
5.2.6. Condiciones ambientales	12
5.3. Proceso de calibración	12
5.4. Toma y tratamiento de datos	13
6. RESULTADOS	15
6.1. Cálculo de incertidumbres	15
6.2. Interpretación de resultados	18
7. REFERENCIAS	18
8. ANEXOS	18
ANEXO I PREPARACIÓN DEL BAÑO DE HIELO PARA MANTENIMIENTO DEL PUNTO TRIPLE DEL AGUA	19
ANEXO II EJEMPLO DE CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES	20

1. OBJETO

Este procedimiento tiene por finalidad establecer y definir la sistemática a seguir en las calibraciones de termómetros de resistencia de platino patrones en células del punto triple del agua.

2. ALCANCE]

Este procedimiento afecta a termómetros de resistencia de platino patrón y de forma excepcional a resistencias termométricas de platino industriales.

La calibración en el punto triple del agua, al no ser una calibración en un rango de temperatura sino en un solo punto fijo, puede ser empleada sólo como control de la estabilidad del termómetro. La estabilidad de un termómetro se debe comprobar entre calibraciones, para estimar las posibles derivas del termómetro y establecer los periodos de calibración.

NOTA 1 Los termómetros de resistencia de platino patrón (TRPP) son también llamados resistencias termométricas de platino.

3. DEFINICIONES

Autocalentamiento

Calentamiento producido en un termómetro de resistencia debido al paso de una intensidad de corriente eléctrica, necesaria para la realización de la medida. Puede calcularse su valor en resistencia mediante la diferencia entre las lecturas del termómetro a una intensidad de corriente I y a $\sqrt{2} \cdot I$. La diferencia entre esas dos medidas es el valor de autocalentamiento del termómetro en ohmios, pero es habitual expresarlo en milikelvin, para lo que se utiliza el coeficiente de sensibilidad del termómetro. Ese valor es particular de cada termómetro y se puede calcular mediante su ecuación de calibración, variando según la temperatura y el tipo de medio isoterma donde se haya determinado (punto fijo, horno, tipo de líquido del baño, etc.); en la tabla 1 aparecen los valores típicos a 0,01 °C.

Calibración [1] (2.39)

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

NOTA 1 Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

NOTA 2 Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente “autocalibración”, ni con una verificación de la calibración.

NOTA 3 Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración

Célula de un punto fijo

Contenedor de un elemento de los indicados por la Escala Internacional de Temperatura de 1990 [2] y utilizado para materializar el punto fijo correspondiente. Poseen un entrante llamado pozo termométrico donde se inserta el termómetro (ver figura 2).

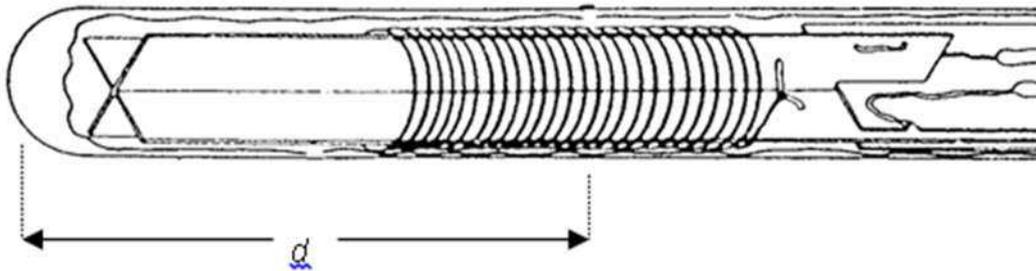
Conducción térmica

Transporte de calor a través de la vaina del TRPP que puede, en ciertas condiciones, perturbar la medida del punto fijo. Por ello los puntos fijos están estudiados y diseñados con una profundidad tal que la conducción térmica no influya a la temperatura medida.

Elemento sensible del termómetro de resistencia de platino (fig. 1)

Bobinado de platino sobre un soporte de uno o varios centímetros de longitud situado en el extremo final de la vaina del termómetro. El valor de resistencia de este bobinado es el que cambia con la temperatura por lo que se le denomina “elemento sensible”. Su diseño varía según el modelo de TRPP; en la figura 1 puede verse un ejemplo.

Figura 1. Elemento sensible de un termómetro de resistencia

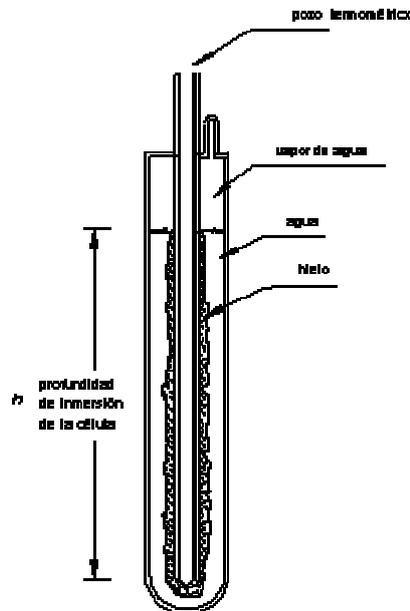


Profundidad de inmersión (fig. 2)

La profundidad de inmersión de un TRPP es la distancia entre el punto medio del elemento sensible del termómetro a calibrar y la superficie libre del elemento del punto fijo considerado. Las temperaturas de los puntos fijos de la EIT-90 [2] están definidas para una profundidad de inmersión igual a cero pero, en una célula de un punto fijo, el elemento sensible está situado a una distancia distinta de cero de la superficie del elemento (ver figura 2). Por tanto, como la temperatura varía con la presión, hay que aplicar una corrección a la lectura registrada por el termómetro debida a la variación de temperatura provocada por la presión de la columna del elemento que está sobre el punto medio del elemento sensible. La EIT-

90 [2] ofrece unos valores para los coeficientes de variación de la temperatura con la profundidad de inmersión del termómetro en los puntos fijos; para el caso del punto triple del agua, tiene un valor de $-0,73 \text{ mK m}^{-1}$.

Figura 2. Célula del punto triple del agua



Puntos Fijos

Equilibrios termodinámicos de cambio de estado bien definidos y reproducibles (puntos triples, puntos de fusión o puntos de solidificación), de elementos o sustancias muy puras, con valores de temperatura asignados por la Escala Internacional de Temperatura de 1990 [2].

Punto Triple del Agua

La temperatura Punto Triple del Agua, asignada en la definición de la unidad de temperatura, el kelvin, en la 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas de 1967, resolución 4, es de 273,16 K, o, lo que es equivalente: $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ (para más información ver [2]).

Repetibilidad (de medida) [1]: (2.21)

Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad.

Condición de repetibilidad (de una medición) [1]: (2.20)

Condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el

mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo.

NOTA 1 Una condición de medición es una condición de repetibilidad únicamente respecto a un conjunto dado de condiciones de repetibilidad

NOTA 2 En química, el término “condición de precisión intra-serie” se utiliza algunas veces para referirse a este concepto.

Resistencias termométricas de platino patrón

Son los instrumentos de interpolación de la EIT-90, y deben cumplir algunas especificaciones impuestas por ella. Se caracterizan por su reproducibilidad y estabilidad. El elemento sensible es hilo de platino de alta pureza. Se montan a cuatro terminales para eliminar el efecto de resistencia de los cables de conexión en las medidas. Son encapsulados en vainas de cuarzo o metálicas con terminales externos que permiten su conexión a equipos de medida eléctricos o electrónicos.

Incertidumbre de medida [1] (2.26)

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

NOTA 1 La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

NOTA 2 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semiamplitud de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada.

NOTA 3 En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

NOTA 4 En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada

4. GENERALIDADES

Es conveniente resaltar que este procedimiento se aplica, especialmente, a termómetros de resistencia de platino patrón. Un TRPP se calibra en un rango de temperatura, cubierto por varios puntos fijos obteniéndose su ecuación de interpolación particular. Este tipo de termómetros son instrumentos de

interpolación debido a sus características de repetibilidad y estabilidad, siempre y cuando cumplan las condiciones impuestas por la EIT-90 [2]. La calibración de los TRPP exclusivamente en el punto triple del agua, sólo es útil para comprobar su estabilidad y su deriva en el tiempo, lo que puede servir para establecer sus periodos de calibración y su comprobación entre calibraciones. En cuanto a los termómetros de resistencia de platino industriales, se podrán calibrar también en el punto triple del agua para controlar su estabilidad y deriva, pero estudiando detalladamente su comportamiento en el punto fijo (conducción, histéresis y autocalentamiento). La incertidumbre final de calibración de éstos será superior a la de un TRPP, puesto que los efectos de la conducción y del autocalentamiento son mayores que en los TRPP. Además es habitual que sufran histéresis, por lo que habría que considerarlo también en el cálculo de incertidumbre.

La medida periódica de los TRPP en el punto triple del agua, permite aumentar la fiabilidad de las medidas y garantizar la incertidumbre entre calibraciones en todo el rango. Es una práctica necesaria cuando se desea mantener la mínima incertidumbre en el sistema.

Símbolos y abreviaturas

- C : Corrección por profundidad de inmersión, expresada en mK.
- C_c : Corrección de temperatura a aplicar a la célula del punto triple del agua según su certificado.
- d : Distancia entre el extremo del termómetro y el punto medio del elemento sensible del mismo.
- d_c : Deriva de la célula del punto triple del agua entre periodos de calibración.
- d_i : Deriva de la resistencia eléctrica patrón entre periodos de calibración.
- EIT-90: Escala Internacional de Temperatura de 1990.
- h : Distancia entre el fondo del pozo termométrico de la célula y la superficie libre del agua de la célula.
- h' : Profundidad de inmersión del TRPP.
- J : Cota máxima de error debida a la conducción, expresada en mK.
- k : Factor de cobertura.
- L_1 : Lectura de la relación de resistencia del TRPP y la resistencia eléctrica patrón a corriente 1 mA.
- L_2 : Lectura de la relación de resistencia del TRPP y la resistencia eléctrica patrón a corriente $1 \cdot \sqrt{2}$ mA.
- L' : Lectura de la relación de resistencia del TRPP y la resistencia eléctrica patrón a corriente 1 mA y a 2 cm del fondo de la célula.
- L_3 : 2ª lectura de la relación de resistencia del TRPP y la resistencia eléctrica patrón a corriente 1 mA.
- R_s : Valor de la resistencia eléctrica patrón, dado en su certificado.
- s_t : Coeficiente de sensibilidad del TRPP, $\frac{\partial R(t)}{\partial t} = R(0,01^\circ \text{C}) \frac{\partial W(t)}{\partial t}$.
- Δt : Diferencia de temperatura máxima tolerada entre la temperatura de calibración de la resistencia eléctrica patrón y la temperatura de utilización.
- t : Temperatura del punto triple del agua.
- t_m : Temperatura medida en el punto triple del agua.
- TRPP: Termómetro de Resistencia de Platino Patrón.
- U : Incertidumbre expandida de calibración del TRPP en el punto triple del agua.

- U_C : Incertidumbre expandida de calibración de la célula del punto triple del agua.
- $U(L)$: Incertidumbre de lectura, debida a la precisión del puente.
- U_{RS} : Incertidumbre expandida de calibración de la resistencia eléctrica patrón en alterna.
- $-W(t)$: Resistencia reducida, resistencia de un TRPP a la temperatura t , dividida por la resistencia en el punto triple del agua.
- $-W_r$: Resistencia reducida de la función de referencia.
- $-W_d$: Resistencia reducida de la función de desviación de un TRPP
- α : Coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica patrón, dado en el certificado de calibración.
- δL : Corrección de lectura debida a la resolución del puente.
- δR_a : Corrección de debida a la falta de estabilidad de la intensidad de corriente empleada en el puente de medida.
- δR_{mi} : Corrección debida a factores de influencia adicionales.
- δR_{st} : Corrección debida a la falta de estabilidad de la temperatura de la resistencia eléctrica patrón.
- δR_{sd} : Corrección debida a la deriva de la resistencia eléctrica patrón en el periodo de calibración.
- δt_{co} : Corrección debida a la conducción.
- δt_{mi} : Corrección debida a factores de influencia adicionales.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración contemplada en este procedimiento, serían necesarios los siguientes equipos y materiales:

- Baño de agua de temperatura controlada entre 3 mK y 4 mK por debajo de la temperatura del punto triple de agua, estable y uniforme de forma que se mantenga el punto triple del agua en condiciones adecuadas para calibraciones, durante varias semanas. En su defecto, puede ser sustituido por un dewar de profundidad mayor al de la célula en, al menos, 10 cm, en el que se realiza un baño de hielo (ver anexo I), pudiéndose mantener el punto triple del agua de forma adecuada durante varios días.
- Puente de comparación de resistencias eléctricas, adecuado para los TRPP a calibrar, tal que permita conectar los cuatro terminales del TRPP y poder regular la intensidad de corriente de medida a, p.e., 1 mA y $1/\sqrt{2}$ mA. Además el puente debería tener una incertidumbre de calibración de al menos un orden de magnitud inferior a la incertidumbre de la calibración que estemos realizando.
- Resistencia eléctrica patrón, es conveniente, pero no necesario, que su valor nominal sea tal que se obtenga un valor cercano a 1 para la relación de resistencia con el TRPP en el punto triple del agua. Deberá tener una incertidumbre de calibración al menos un orden de magnitud inferior a la incertidumbre de la calibración que estemos realizando.
- Registradores de las condiciones ambientales del laboratorio (temperatura y humedad), adecuados para el margen de temperatura y humedad a las que habitualmente se encuentra el laboratorio.

- Hielo picado para la realización del baño de hielo, en caso de no disponer de baño de agua para el mantenimiento de la célula.
- Nieve carbónica granulada.
- Alcohol etílico (etanol)
- Un metro de alambre fino y flexible.
- Una cuchara de acero.
- Pie y pinza, para la sujeción de la célula
- Una regla graduada en centímetros y milímetros.
- Agua destilada

Para el segundo método de realización del punto triple del agua, descrito, hará falta además:

- Nitrógeno líquido.
- Una varilla de acero de diámetro inferior al del pozo termométrico de la célula y al menos el doble de larga que la célula.

5.2. Operaciones previas

5.2.1. Comprobación de la célula del Punto Triple del Agua

Se comprueba que en la célula se mantiene el vacío. Para ello, se inclina ésta con precaución, hasta oír un ruido característico, “clic”, que significa que la célula está en buenas condiciones. De no ser así, es posible que el vacío se haya perdido, por lo que la célula ya no reproduciría la temperatura del punto triple del agua según su último certificado de calibración.

5.2.2. Realización del Punto Triple del Agua con nieve carbónica.

La célula debe ser pre-enfriada a una temperatura cercana a la del punto triple varias horas antes de su realización, para ello puede usarse el mismo medio en que posteriormente se mantendrá (baño de agua o dewar con baño de hielo picado). Una vez pre-enfriada, se procederá como sigue:

- 1) Vaciar el agua del pozo termométrico, rellenarlo de etanol y volverlo a vaciar.
- 2) Sujetar la célula encima de una superficie de trabajo con un pie y una pinza.
- 3) Rellenar aproximadamente 1 cm del pozo termométrico con nieve carbónica, y mantener ese nivel de nieve hasta conseguir que se forme una primera capa de hielo alrededor del fondo del pozo. Si tardara más de cinco minutos en formarse, se debe golpear con cuidado la célula con una cucharilla o varilla metálica o agitarla muy ligeramente para favorecer la formación de los primeros núcleos sólidos. De lo contrario, cabe la posibilidad de que todo el agua de la célula se sub-enfríe a una temperatura muy inferior a la del punto triple, lo que podría provocar una congelación total y repentina de la célula, con el consiguiente peligro de rotura.
- 4) Una vez formados los primeros cristales de hielo, se añade un poco de etanol y nieve

carbónica hasta la altura del nivel superior de agua de la célula. Se mantendrán estas condiciones, añadiendo nieve carbónica en las cantidades necesarias, hasta que se consiga una capa de hielo uniforme y de unos milímetros de grosor hasta la altura del nivel superior de agua en la célula. En algunos casos, para mejorar la uniformidad de la capa, puede ser necesario el uso de un alambre flexible para mantener la nieve carbónica a la altura deseada del pozo termométrico con objeto de formar o mejorar la capa. El alambre deberá tener una longitud superior a la de la célula, con un extremo enrollado sobre sí mismo, en forma de espiral, de diámetro no superior al del pozo termométrico.

Debe tenerse la precaución de no engrosar demasiado el hielo en el fondo de la célula ya que si el hielo toca las paredes exteriores y las deforma podría romperse la célula.

NOTA Para apreciar mejor el grosor de la capa de hielo que se está haciendo crecer, puede realizarse la célula con ella introducida en un vaso de vidrio transparente, de altura lo más cercana posible a la de la célula, y lleno de agua a una temperatura cercana a la del punto triple.

También es importante vigilar que no se hiele la superficie de agua de la célula, si ocurriera, se puede fundir esa capa de hielo calentando la célula con la mano.

- 5) Cuando se ha obtenido una capa de hielo uniforme de entre 4 mm y 8 mm de espesor alrededor del pozo termométrico, se vacía y se llena con etanol para limpiar cualquier resto de impurezas, se vuelve a vaciar y se llena de nuevo con agua destilada a temperatura ambiente con objeto de fundir una pequeña capa de hielo alrededor del pozo termométrico de la célula; de esta forma el elemento sensible del TRPP estará en contacto con la interfase líquido-sólido. Para verificar la formación de esta capa, se gira la célula comprobando que el hielo gira libremente alrededor del pozo. Se vacía nuevamente el pozo para introducir la célula en el baño de agua, llenando el pozo con agua del baño; si se utilizase un baño de hielo para su mantenimiento, debe tomarse la precaución de que no entren lascas de hielo en el pozo. La célula tiene que quedar protegida de la luz por lo que el dewar deberá tener tapa.
- 6) Se medirá la columna de líquido entre el fondo del pozo termométrico y la superficie del agua (h en figura 2), para el posterior cálculo de la corrección por profundidad de inmersión.
- 7) Las células del punto triple del agua alcanzan su máxima estabilidad entre 7 y 11 días después de su realización. Si se van a utilizar las células antes de que estén totalmente estables, deberá tenerse en cuenta este hecho en el cálculo de incertidumbres.

5.2.3. Realización del Punto Triple del Agua con nitrógeno líquido.

- 1) Se debe tener la célula del punto triple del agua pre-enfriada del día anterior, ver [2].
- 2) Se prepara en un dewar una cantidad de nitrógeno líquido, suficiente para enfriar una longitud de varilla metálica al menos igual a la del pozo termométrico de la célula del punto triple del agua.
- 3) Se saca la célula del baño, se vacía el pozo termométrico de agua y se rellena de etanol.
- 4) Se enfría una varilla de acero en el baño de nitrógeno durante un minuto. A continuación se inserta en el pozo de la célula la varilla, durante un minuto, sujetando la célula con la mano y agitándola levemente. Hay que evitar que la varilla fría toque tanto los bordes como el fondo del pozo termométrico de la célula para no producir choque térmico, el cual podría provocar la rotura de la célula.
- 5) Se continúa como en los puntos 5), 6) y 7) de 5.2.2.

5.2.4. Identificación e inspección inicial del termómetro.

El termómetro a calibrar deberá estar identificado con al menos un número de serie o código único. Si no lo estuviera, y antes de iniciar la calibración, se procederá a la identificación por el laboratorio, marcando (p.e. con una etiqueta adhesiva) en el lugar del termómetro que se considere más apropiado, un número identificativo de la forma que determine el laboratorio.

Para aceptar o rechazar el TRPP, se comprueba que el TRPP no tenga ninguna rotura en su vaina protectora. Si la tuviera no se puede calibrar, puesto que entraría agua.

Se medirá la longitud de la vaina de termómetro y la distancia del extremo de la vaina al punto medio del elemento sensible (d en figura 1). Se anotarán estos datos, para posteriormente hacer la corrección de profundidad de inmersión.

5.2.5. Estabilización previa

Antes de comenzar la calibración, se verificará que aún existe la capa fundida alrededor del pozo termométrico. Para ello se retira la célula del baño y se rota, comprobando visualmente el giro del hielo. De no ser así, se vuelve a introducir la célula en el baño y se introduce, durante 1 minuto, en el pozo, una varilla de acero (puede ser también de vidrio o cuarzo) o un TRPP a temperatura ambiente, con objeto de fundir una capa de hielo a lo largo del pozo termométrico. A continuación se retira y se vuelve a comprobar el giro del hielo. Esta operación deberá repetirse todas las veces necesarias. Por haber perturbado la célula al sacarla del baño es conveniente esperar a que se estabilice su temperatura de nuevo durante, al menos de 20 a 30 minutos, antes de realizar cualquier medida.

Se conectarán los equipos que se vayan a utilizar:

- Puente de resistencia eléctrica a la red eléctrica.

- Resistencia eléctrica patrón, si está en una caja termostática deberá conectarse a la red eléctrica al menos el día anterior, para que su temperatura sea estable el día de la calibración.
- Resistencia eléctrica patrón al puente de medida.
- TRPP a calibrar al puente de medida.

Siguiendo las instrucciones de los manuales técnicos y esperando los tiempos de calentamiento y estabilización adecuados.

5.2.6. Condiciones ambientales

Se anotarán las condiciones ambientales durante la calibración: temperatura y humedad. Éstas deben mantenerse dentro de unos límites tales que no afecten a los instrumentos de medida y equipos que vayan a ser utilizados en la calibración, según se indica en las especificaciones técnicas de los instrumentos. Lo usual es calibrar en un laboratorio a temperatura 20°C o 23°C y con humedad relativa comprendida en el intervalo (20,70) % condiciones que no afectan a los instrumentos de medida.

5.3. Proceso de calibración

El termómetro de resistencia de platino a calibrar debe ser pre-enfriado durante 5 min, en el baño donde se mantiene la célula. A continuación, con precaución para no dar golpes ni al termómetro ni a la célula, se introduce el TRPP hasta el fondo del pozo termométrico y se espera de 5 a 10 minutos de estabilización. Se deberá tomar la precaución de que no entre luz en el pozo, ni trozos de hielo, si enfriamos el termómetro en un baño de hielo. El TRPP se sujetará con un pie y una pinza de forma que podamos variar, y medir, su profundidad de inmersión.

El proceso de calibración consiste en:

- 1º- Lectura del TRPP, a corriente de 1 mA y con el puente en medida a cuatro hilos (o 10 mA para TRPP de 0.25 Ω): L_1 .
- 2º- Cambio de corriente a $1 \cdot \sqrt{2}$ mA (o $10 \sqrt{2}$ mA para TRPP de 0,25 Ω), se espera 5 min para estabilización.
- 3º- Lectura del TRPP a corriente de $1 \cdot \sqrt{2}$ mA (o $10 \sqrt{2}$ mA para TRPP de 0,25 Ω): L_2 .
- 4º- Cambio de corriente a 1 mA (o 10 mA para TRPP de 0,25 Ω).
- 5º- Con ayuda de un pie y una pinza, se levanta el TRPP 2 cm, se espera 5 min para estabilización.
- 6º- Lectura del TRPP y de la resistencia eléctrica patrón, L' , a esa distinta profundidad de inmersión y con corriente de 1 mA (o 10 mA para TRPP de 0,25 Ω).
- 7º- Se retira el termómetro de pozo termométrico y se vuelve a introducir en el baño de pre-enfriamiento.

8º- Espera de 5 min.

9º- Se introduce el termómetro por segunda vez en la célula.

10º- Espera de 5 min.

11º- Lectura del termómetro a corriente de 1 mA (o 10 mA para TRPP de 0,25 Ω): L_3 .

Si el puente del que se dispone no puede multiplicar la intensidad de corriente por $\sqrt{2}$, no se realizarán los pasos 2º, 3º y 4º, pasando directamente del 1º al 5º.

Es suficiente realizar este proceso una sola vez.

5.4. Toma y tratamiento de datos

Durante la calibración se anotará:

- 1) Posibles anomalías detectadas.
- 2) Temperatura de la resistencia eléctrica patrón, si hay un indicador.
- 3) Las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa.
- 4) La distancia del punto medio del elemento sensible del termómetro hasta el extremo de la vaina del TRPP (d en figura 1) y la profundidad de inmersión de la célula (h en figura 2).
- 5) Los valores medidos L_1 , L_2 , L' y L_3 .
- 6) Se calcula la diferencia entre la lectura a máxima profundidad de inmersión y con el TRPP retirado dos centímetros:

$$s_t \cdot |L_1 - L'| \cdot R_s = J \quad (1)$$

Se multiplica por el coeficiente de sensibilidad del termómetro para obtener el valor en milikelvin. El coeficiente se obtiene, de la forma siguiente:

$$R(t) = R(0,01 \text{ °C}) \cdot [W_r(t) + W_d(t)] \cong R(0,01 \text{ °C}) \cdot W_r(t) \quad (2)$$

Siendo W_r la función de referencia y W_d la función de desviación propia de TRPP. Como la función de desviación es despreciable frente a la función de referencia obtenemos la sensibilidad del TRPP: $s_t = \frac{\partial R(t)}{\partial t} = R(0,01 \text{ °C}) \frac{\partial W(t)}{\partial t}$. En la tabla 1 aparecen los valores típicos para distintos tipos de termómetros a 0,01 °C.

Tabla 1. Coeficiente de sensibilidad a 0,01 °C para distintos tipos de termómetros de resistencia

	TRPP 0,25 Ω	TRPP 25 Ω	TRPP 100 Ω
s_t a 0,01 °C	1000 K · Ω ⁻¹	10 K · Ω ⁻¹	2,5 K · Ω ⁻¹

La comprobación de la conducción térmica del TRPP elevando tan sólo 2 cm es suficiente y, a la vez, necesaria ya que hay termómetros con elevada masa térmica, como por ejemplo los de vaina metálica, o los que tienen el soporte del elemento sensible cerámico y, aún totalmente sumergidos, podrían tener errores de lectura por conducción.

- 7) Se calcula el autocalentamiento del termómetro:

$$|L_2 - L_1| \cdot R_s = A \quad (3)$$

Si no se ha podido realizar la lectura L_2 , tomaremos como autocalentamiento el que venga en el certificado del TRPP o, en su defecto, el indicado en el manual del TRPP.

- 8) Se calcula la distancia del punto medio del elemento sensible del TRPP a la superficie libre de agua en la célula:

$$h - d = h' \quad (4)$$

con h' expresada en metros, la corrección aplicar (en milikelvin) será:

$$C = -(-0,73 \text{ mK} \cdot \text{m}^{-1}) \cdot h' \quad (5)$$

Para calcular la corrección en ohmios, basta usar el coeficiente de sensibilidad del termómetro (tabla 1 o certificado de calibración del termómetro).

- 9) Se determina la diferencia (en valor absoluto) entre las dos lecturas hechas a 1 mA:

$$|L_1 - L_3| \cdot R_s > U \quad (6)$$

Si esta diferencia es mayor que la incertidumbre asignada a la calibración deben repetirse las medidas pues puede que no se haya manipulado correctamente el termómetro (p.e. puede haber sufrido algún golpe) o no se hayan esperado los tiempos de estabilización requeridos. Si persiste la diferencia, ésta se considerará debida a falta de estabilidad del TRPP. La diferencia entre las dos lecturas se introducirá como una magnitud de influencia más en el cálculo de incertidumbres, asignándole una distribución rectangular.

- 10) La lectura asignada a la calibración será la media de las dos medidas inicial y final realizadas con el termómetro totalmente sumergido a 1 mA:

$$L = \frac{L_1 + L_3}{2} \quad (7)$$

No se realizan dos lecturas para disminuir la incertidumbre sino para asegurarse de que se han realizado correctamente y que ninguna ha sido afectada por un error grosero.

- 11) El resultado final de lectura del termómetro en el punto triple del agua, expresado en ohmios y corregido por profundidad de inmersión y por el valor de calibración de la célula será:

$$R_x = L \cdot R_s + \frac{1}{s_t} \cdot C + \frac{1}{s_t} \cdot C_c \quad (8)$$

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

En el desarrollo del cálculo de incertidumbres, se han seguido las pautas recomendadas en las referencias [3] y [4].

Para poder establecer un modelo matemático que describa el proceso de medición y permita el cálculo de la incertidumbre asociada, se considera que el instrumento en calibración es un termómetro de resistencia de platino, con lo cual el mensurando obtenido es un valor de resistencia, que se asocia al valor de temperatura de la célula del punto triple del agua. Teniendo en cuenta todas las variables que intervienen en la medición, se puede establecer un posible modelo matemático como el que sigue:

$$R_x = (L + \delta L) \cdot (R_s + \delta R_{st} + \delta R_{sd}) + \delta R_a + \sum_i \delta R_{mi} + \frac{1}{s_t} \cdot \left(C + C_t + \delta t_{co} + \sum_i \delta t_{mi} \right) \quad (9)$$

Aplicando a (9) la ley de propagación de incertidumbres y suponiendo que no existe correlación entre las magnitudes de entrada, la incertidumbre para la calibración del TRPP en el punto triple del agua, expresada en ohmios, será:

$$u^2(R_x) = R_s^2 \cdot (u^2(L) + u^2(\delta L)) + L^2 \cdot (u^2(R_s) + u^2(\delta R_{st}) + u^2(\delta R_{sd})) + u^2(\delta R_a) + \sum_i u^2(\delta R_{mi}) + \left(\frac{1}{s_t} \right)^2 \cdot \left(u^2(C) + u^2(C_t) + u^2(\delta t_{co}) + \sum_i u^2(\delta t_{mi}) \right) \quad (10)$$

Donde se ha considerado el valor de todas las variables identificadas con δ como nulas, pero no su incertidumbre. Para expresar el resultado (10) en unidades de temperatura, basta con multiplicar por el coeficiente de sensibilidad del TRPP:

$$u(t) = s_t \cdot u(R_x) \quad (11)$$

No se hacen medidas estadísticamente significativas en el punto triple del agua (ver descripción del proceso de lectura en 5.3), por lo que no se introduce ningún factor debido a repetibilidad del TRPP. Pero se introduce una magnitud de influencia debido a la falta de estabilidad del termómetro en δR_{mi} tomada a partir de las dos medidas obtenidas a 1 mA.

Las incertidumbres típicas asociadas a cada una de las magnitudes de entrada se explican a continuación:

$u(L)$: Incertidumbre de calibración del puente, dada en su certificado. Se le asignará una distribución de tipo normal y se dividirá por el factor de cobertura indicado en el certificado:
 $u(L) = U/k$.

$u(\delta L)$: Incertidumbre de lectura del termómetro debido a la resolución del puente de medida de resistencia eléctrica. Es una cota superior y se considera una distribución rectangular, la contribución se estima dividiendo por $\sqrt{12}$ la exactitud indicada por el fabricante o en su defecto la última cifra significativa del puente. También podría estimarse mediante el estudio del ruido eléctrico durante la medida.

$u(R_s)$: Incertidumbre de calibración de la resistencia eléctrica patrón, obtenida a partir de los datos de su certificado de calibración. Si la incertidumbre expandida de calibración de la resistencia eléctrica patrón es U_R para un factor de cobertura k : $u(R_s) = U_R / k$

$u(\delta R_{st})$: Incertidumbre por variaciones de temperatura de la resistencia eléctrica patrón. Si el coeficiente de variación por temperatura de la resistencia eléctrica patrón es $\pm \alpha \Omega/^\circ\text{C}$, y suponiendo una variación de temperatura Δt : $u(\delta R_{st}) = R_s \cdot \Delta t \cdot \alpha / \sqrt{3}$

$u(\delta R_{sd})$: Incertidumbre por deriva de la resistencia eléctrica patrón en el periodo de calibración elegido, que se estimará a través de los datos históricos o de la información suministrada por el fabricante. Si la deriva máxima del patrón es d_i , suponiendo distribución rectangular: $u(\delta R_{sd}) = d_i / \sqrt{3}$

$u(\delta R_a)$: Incertidumbre de lectura debido a la incertidumbre de la intensidad de corriente con la que se hace la lectura. Si no se dispone de información detallada, podrá tomarse como cota superior de error el 10% del autocalentamiento (expresado en ohmios): $u(R_a) = (A \cdot 0,1) / \sqrt{3}$

$\sum_i u(\delta R_{mi})$: Incertidumbres debidas a magnitudes de influencia adicionales. Por ejemplo, la falta de estabilidad del TRPP en su medida en el punto triple del agua. En este caso se toma como cota máxima la variación entre las dos últimas medidas en el punto triple del agua realizadas en el proceso de calibración y se le asigna una distribución rectangular.

$u(\delta t_{co})$: Incertidumbre debida a la conducción térmica. Se determina en el proceso de calibración, J , y se le asigna una distribución rectangular (ver descripción del proceso de lectura en 5.4): $u(\delta t_{co}) = J / \sqrt{3}$

Si no se apreciara esta variación, por falta de resolución del puente de medida empleado, se tomarán, al menos, 0,2 mK como cota superior de error.

$u(C)$: Incertidumbre de la corrección por profundidad de inmersión. Se estima que un error en la medida de la distancia del punto medio del elemento sensible del TRPP a la superficie libre del agua de la célula de p.e. $\pm x$ m (un valor típico de error suele ser de 0,5 cm a 2 cm). Suponiendo una distribución rectangular: $u(C) = x \cdot 0,73 / \sqrt{3}$

$u(C_c)$: Incertidumbre de calibración de la célula del punto triple del agua. Si la incertidumbre expandida de calibración de la célula es U_c para un factor de cobertura k : $u(C_c) = U_c / k$

$\sum_i u(\delta t_{mi})$: Incertidumbre debida a magnitudes de influencia adicionales. Por ejemplo, la posible deriva de la célula del punto triple del agua en el periodo de calibración elegido, que se estimará a través de los datos históricos del patrón o de información suministrada por el

fabricante. Si la deriva máxima del patrón es $\pm d_c$, suponiendo distribución rectangular:
 $u(\delta t_{mi}) = d_c / \sqrt{3}$

Otra posible influencia a tener en cuenta es el hecho de usar la célula antes de que haya alcanzado su máxima estabilidad (de 7 a 11 días tras su realización).

Tabla 2. Resumen del cálculo de $u(t)$

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coefficiente de Sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre típica $u(x_i) \cdot c_i$
L	L	$u(L)$	R_s	$R_s \cdot u(L)$
δL	0	$u(\delta L)$	R_s	$R_s \cdot u(\delta L)$
R_s	R_s	$u(R_s)$	L	$L \cdot u(R_s)$
δR_{st}	0	$u(\delta R_{st})$	L	$L \cdot u(\delta R_{st})$
δR_{sd}	0	$u(\delta R_{sd})$	L	$L \cdot u(\delta R_{sd})$
R_a	0	$u(\delta R_a)$	1	$u(\delta R_a)$
δR_{m1}	0	$u(\delta R_{m1})$	1	$u(\delta R_{m1})$
...
δR_{mi}	0	$u(\delta R_{mi})$	1	$u(\delta R_{mi})$
δt_{co}	0	$u(\delta t_{co})$	$1/s_t$	$u(\delta t_{co})/s_t$
C	C	$u(C)$	$1/s_t$	$u(C)/s_t$
C_c	C_c	$u(C_c)$	$1/s_t$	$u(C_c)/s_t$
δt_{m1}	0	$u(\delta t_{m1})$	$1/s_t$	$u(\delta t_{m1})/s_t$
...	
δt_{mi}		$u(\delta t_{mi})$	$1/s_t$	$u(\delta t_{mi})/s_t$
R_x	$L \cdot R_s + (C + C_c)/s_t$			$u(R_x)$
				$u(t) = s_t \cdot u(R_x)$

3) La incertidumbre combinada obtenida de la ecuación (15), 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 dominantes 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.

Es conveniente recoger todas las contribuciones del cálculo de incertidumbre en una tabla (ver tabla 2). En el Anexo II se expone un ejemplo numérico del cálculo de incertidumbres.

6.2. Interpretación de resultados

El valor de resistencia en el punto triple del agua de un TRPP deriva con el uso, debiendo el usuario establecer el límite en el cual estima que el TRPP debe ser recalibrado en el rango de temperatura. Los periodos de comprobación de los valores de las resistencias termométricas de platino patrón, no están normalizados debido a su diversidad de tipos, rangos de temperatura de utilización, construcción, aplicación, intensidad de uso, etc. El usuario de la TRPP debe establecer su propio programa de calibraciones adaptado a sus equipos y sistemas de medida, según su experiencia. En principio, se podría comenzar con un período inicial de calibración de tres meses, para posteriormente dependiendo del comportamiento del TRPP aumentarlo o disminuirlo.

7. REFERENCIAS

- [1] “Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados”. 3ª edición en español (edición VIM 2008 con inclusión de pequeñas correcciones), publicada por el Centro Español de Metrología.
- [2] “Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90)”. Ed. CEM, 2011.
- [3] “Evaluación de datos de medición Guía para la expresión de la incertidumbre de medida”, CEM edición digital 1 en español, 2008
- [4] “Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones” EA-4/02 M:2013.

8. ANEXOS

ANEXO I: Preparación del baño de hielo para el mantenimiento del punto triple del agua.

ANEXO III: Ejemplo de cálculo de incertidumbres.

ANEXO I PREPARACIÓN DEL BAÑO DE HIELO PARA MANTENIMIENTO DEL PUNTO TRIPLE DEL AGUA

El baño de hielo, para el mantenimiento del punto triple del agua, deberá realizarse de forma que se aproxime lo más posible a su valor teórico de 0 °C. Para ello se utilizará un vaso dewar como recipiente de profundidad de 10 cm más que la longitud de la célula del punto triple del agua al menos. El dewar deberá lavarse repetidas veces con agua, antes de comenzar la preparación.

El hielo se preparará con agua, destilada o desionizada; a ser posible, el hielo se preparará en forma de escamas; en caso de no poder disponer de él en esta forma, deberá ser triturado hasta alcanzar gránulos de un tamaño inferior a 1 cm.

Se llenará el dewar procurando no tocar el hielo con las manos. Posteriormente se añadirá la mínima cantidad de agua para que el hielo adquiriera un aspecto traslúcido. A continuación se agitará el baño del hielo con objeto de uniformizarlo. Idealmente, debería haber en el vaso tanto hielo como fuera posible, con los espacios intermedios entre los gránulos de hielo llenos de agua destilada.

Debido a que el hielo flota en el agua, se producirá una acumulación de agua en el fondo del dewar. Por lo que periódicamente deberá retirarse del fondo del dewar y añadir hielo.

ANEXO II EJEMPLO DE CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

El ejemplo descrito a continuación, es la calibración de un TRPP de 25 Ω de valor nominal, en el punto triple del agua.

Datos para el cálculo de incertidumbre

El sistema de calibración utilizado consta de:

- 1) Según el certificado de calibración del puente, la incertidumbre correspondiente al valor de relación en torno al que se está midiendo es de $4 \times 10^{-6} \Omega/\Omega$ para un factor de cobertura $k=2$.

La resolución del puente es de $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ según el manual.

- 2) Una resistencia eléctrica patrón de 100 Ω , mantenida en una caja termostática a 36 $^{\circ}\text{C}$ con indicador de temperatura de resolución de 0,1 $^{\circ}\text{C}$. La resistencia está calibrada a 36 $^{\circ}\text{C}$.

$$R_s = 100,000 \pm 2 \times 10^{-5} \Omega \text{ para } k = 2.$$

La deriva es de $1 \times 10^{-5} \Omega$, según su historial.

Según sus especificaciones técnicas tiene un coeficiente de temperatura $\alpha = 1,75 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Se admite una variación de temperatura en la caja termostática de 0,3 $^{\circ}\text{C}$ como cota superior, y una incertidumbre de medida del indicador de temperatura de 0,1 $^{\circ}\text{C}$.

- 3) Célula del punto triple del agua calibrada, con una incertidumbre de 0,1 mK para $k = 2$, con corrección $C_c = 0,02$ mK.

Se observa una deriva entre periodos de calibración de 0,05 mK en el valor de la célula.

La célula se utiliza a las 48 horas de su realización; al no esperar el tiempo adecuado para su total estabilización (7 a 11 días) se considera una incertidumbre adicional por falta de estabilidad asignando una deriva máxima a la célula de 0,2 mK.

- 4) La distancia h de la célula del punto triple del agua es de 0,28 m, la distancia d del termómetro a calibrar es 3 cm; el termómetro llega al fondo del pozo termométrico. Obtenemos:

$$h' = 0,28 \text{ m} - 0,03 \text{ m} = 0,25 \text{ m}.$$

La corrección por profundidad de inmersión será:

$$C = 0,25 \text{ m} \cdot 0,73 \text{ mK m}^{-1} = 0,1825 \text{ mK}$$

- 5) El autocalentamiento del termómetro es:

$$L_1 = 0,255\ 553\ 5$$

$$L_2 = 0,255\ 555\ 5$$

$$A = (L_2 - L_1) \cdot 100,000\ 1 = 0,2\ \text{m}\Omega$$

$$A = 0,2\ \text{m}\Omega \cdot 10\ \text{mK}\ \text{m}\Omega^{-1} = 2\ \text{mK}$$

6) Las lecturas obtenidas con el termómetro totalmente sumergido son:

$$L_1 = 0,255\ 553\ 0$$

$$L_3 = 0,255\ 553\ 5$$

La diferencia entre ellas es equivalente a 0,5 mK, valor que se considera como fuente de incertidumbre adicional.

7) Se comprueba la conducción térmica J:

$$L_1 = 0,255\ 553\ 0$$

$$L' = 0,255\ 553\ 4$$

$$J = 10\ \text{K} \cdot \Omega^{-1} \cdot (L' - L_1) \cdot 100,000\ 1\ \Omega / \sqrt{3} = 0,231\ \text{mK}$$

8) Lectura media:

$$L = (L_1 + L_2) / 2 = 0,255\ 553\ 25$$

Cálculo de la incertidumbre de la calibración del TRPP

A partir de los datos anteriores:

$u(L)$: Incertidumbre de lectura debido a la calibración del puente de medida:

$$u(L) = 2 \times 10^{-6} / 2 = 2 \times 10^{-6}\ \Omega / \Omega$$

$u(\delta L)$: Incertidumbre de lectura debido a la resolución del puente de resistencia eléctrica:

$$u(\delta L) = 1 \times 10^{-6} / (2 \cdot \sqrt{3}) = 0,29 \times 10^{-6}\ \Omega / \Omega$$

$u(R_s)$: Incertidumbre de calibración de la resistencia eléctrica patrón, obtenidas a partir de los datos de su certificado de calibración, $2 \times 10^{-5}\ \Omega$ en la calibración:

$$R_s = 100,000\ 1\ \Omega$$

$$u(R_s) = 2 \times 10^{-5}\ \Omega / 2 = 1 \times 10^{-5}\ \Omega$$

$u(\delta R_{st})$: El certificado de calibración de la resistencia eléctrica patrón da el valor para una temperatura de 36 °C. El día de la calibración del TRPP leemos en el indicador 35,7 °C. La variación de temperatura

será la composición cuadrática de la variación real observada (0,3 °C) más las resolución del indicador :

$$\Delta t = \sqrt{(0,3^2 + 0,1^2)} = 0,32 \text{ °C}$$

$$u(\delta R_{st}) = 10 \Omega \cdot 0,32 \text{ °C} \cdot (1,75 \times 10^{-6} / \text{°C}) / \sqrt{3} = 32,33 \times 10^{-6} \Omega$$

$u(\delta R_{sd})$: Si la deriva máxima del patrón es $1 \times 10^{-5} \Omega$, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta R_{sd}) = 1 \times 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,58 \times 10^{-5} \Omega$$

$u(R_a)$: Incertidumbre del valor de resistencia del termómetro debido a la incertidumbre de la intensidad de corriente con la que se hace la lectura. Se toma como cota superior de error el 10% del autocalentamiento:

$$u(R_a) = (0,2 \text{ m}\Omega \cdot 0,1) / \sqrt{3} = 0,012 \text{ m}\Omega$$

$u(\delta R_{m1})$: Falta de estabilidad del TRPP.

$$u(\delta R_{m1}) = (0,05 \text{ m}\Omega) / \sqrt{3} = 0,029 \text{ m}\Omega$$

$u(\delta t_{co})$: Incertidumbre debida a la conducción térmica. Se determina en el proceso de calibración, obteniendo 0,4 mK, considerando una distribución rectangular (ver descripción del proceso de lectura en 5.3):

$$u(\delta t_{co}) = 0,4 \text{ mK} / \sqrt{3} = 0,23 \text{ mK}$$

$u(C)$: Se supone que se comete un error total en la determinación de la columna de agua por encima del punto medio del elemento sensible del TRPP con cota máxima de 2 cm. Suponiendo una distribución rectangular:

$$u(\delta t_{ci}) = 0,73 \text{ mK} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 0,02 \text{ m} / \sqrt{3} = 0,008 \text{ mK}$$

$u(C_c)$: Incertidumbre de calibración de la célula del punto triple del agua:

$$u(t_{ca}) = 0,15 \text{ mK} / 2 = 0,075 \text{ mK}$$

$u(\delta t_{m1})$: La deriva de 0,05 mK para el valor del punto triple del agua entre calibraciones de la célula, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta t_{m1}) = 0,05 / \sqrt{3} = 0,029 \text{ mK}$$

$u(\delta t_{m2})$: Se considera un valor máximo de deriva por no esperar el periodo adecuado de estabilización de 0,2 mK, luego:

$$u(\delta t_{sd}) = 0,2 / \sqrt{3} = 0,116 \text{ mK}$$

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

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coficiente de Sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$
L	0,255 553 25 Ω/Ω	$2 \cdot 10^{-6} \Omega/\Omega$	100 Ω	0,2 m Ω
δL	0	$0,29 \times 10^{-6}$	100 Ω	0,029 m Ω
R_s	100,000 100 Ω	$1 \cdot 10^{-5} \Omega$	0,255 Ω/Ω	0,0025 m Ω
δR_{st}	0	$32,33 \times 10^{-6} \Omega$	0,255 Ω/Ω	0,0082 m Ω
δR_{sd}	0	$0,58 \times 10^{-5} \Omega$	0,255 Ω/Ω	0,0015 m Ω
R_a	0	0,012 m Ω	1	0,012 m Ω
δR_{m1}	0	0,029 m Ω	1	0,029 m Ω
δt_{co}	0	0,23 mK	$1/10 \text{ K } \Omega^{-1}$	0,023 m Ω
C/s_t	0,000 018 25 Ω	0,008 mK	$1/10 \text{ K } \Omega^{-1}$	0,0008 m Ω
C_c/s_t	0,000 002 Ω	0,075 mK	$1/10 \text{ K } \Omega^{-1}$	0,0075 m Ω
δt_{m1}	0	0,029 mK	$1/10 \text{ K } \Omega^{-1}$	0,0029 m Ω
δt_{m2}	0	0,116 mK	$1/10 \text{ K } \Omega^{-1}$	0,0116 m Ω
R_x	25,555 37 Ω			0,21 mΩ
				$u(t) = 2,1 \text{ mK}$
				$U(t) = 2 \cdot 2,1 \text{ mK} = 4,2 \text{ mK}$

Metrología

NIPO: 113-20-002-9