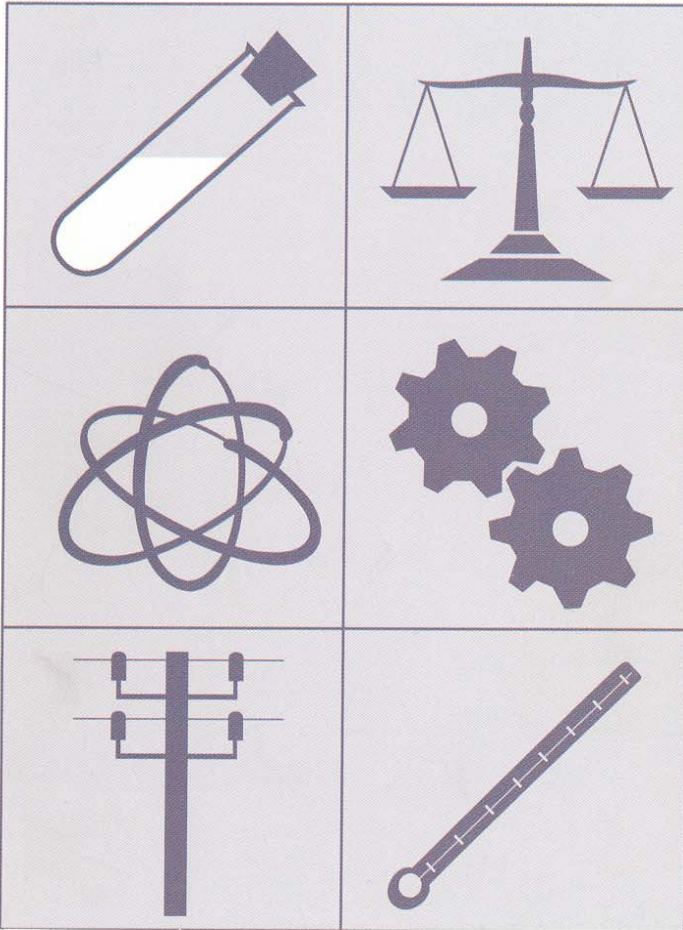


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO TH-006 PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE RESISTENCIA DE PLATINO PATRONES EN CÉLULAS DEL PUNTO TRIPLE DEL AGUA

m 08



MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



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

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

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

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

Correo electrónico
cem@cem.es



ÍNDICE

	Página
1. OBJETO.....	4
2. ALCANCE	4
3. DEFINICIONES	4
4. GENERALIDADES	9
5. DESCRIPCIÓN	12
5.1. Equipos y materiales	12
5.2. Operaciones previas	13
5.3. Proceso de calibración.....	18
5.4. Toma y tratamiento de datos	19
6. RESULTADOS.....	22
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	22
6.2. Interpretación de resultados.....	28
7. REFERENCIAS	28
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración	28
7.2. Otras referencias.....	28
8. ANEXOS	29
Anexo I: Preparación del baño de hielo.....	30
Anexo II: Ejemplo de cálculo de incertidumbres.....	31



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 (ver [4], código 01.03).

2. ALCANCE

Este procedimiento afecta a termómetros de resistencia de platino patrón (ver [4], códigos 02.01, 02.02 y 02.03) y de forma excepcional a resistencias termométricas de platino industriales (ver [3], código 05.01).

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 isotermo 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 [3] (6.11):

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

NOTAS:

1. El resultado de una calibración permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando o bien determinar las correcciones a aplicar en las indicaciones.
2. Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metrológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.
3. Los resultados de una calibración puede consignarse en un documento denominado, a veces, certificado de calibración o informe de calibración.

Célula de un punto fijo

Contenedor de un elemento de los indicados por la Escala Internacional de Temperatura de 1990 [1] y utilizado para materializar el punto fijo correspondiente. Poseen un entrante llamado pozo termométrico donde se inserta el termómetro (ver figura 2).

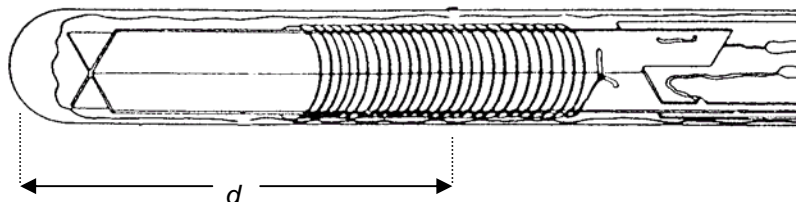
Conducción térmica:

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.

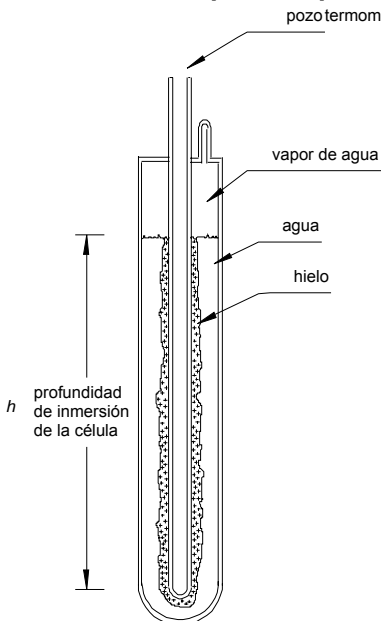
Figura 1. Elemento sensible de un termómetro de resistencia



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. La temperatura de los puntos fijos de la EIT-90 [1] 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 de elemento que está sobre el punto medio del elemento sensible. La EIT-90 [1] 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 [1].

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, ó, lo que es equivalente: 0,01 °C (para más información ver [2]).



Repetibilidad (de los resultados de las mediciones) [3] (3.6):

Grado de concordancia entre los resultados de sucesivas mediciones del mismo mensurando, mediciones efectuadas con aplicación de la totalidad de las mismas condiciones de medida.

NOTAS:

1. Estas condiciones se denominan condiciones de repetibilidad.
2. Las condiciones de repetibilidad comprenden:
 - El mismo procedimiento de medida
 - El mismo observador
 - El mismo instrumento utilizado en las mismas condiciones
 - El mismo lugar
 - Repetición de las medidas en un corto periodo de tiempo
3. La repetibilidad puede expresarse cuantitativamente por medio de las características de dispersión de los resultados.

Resistencias termométricas de platino patrón.

Son los instrumentos de interpolación de la EIT-90, y deben cumplir algunas especificaciones impuestas por ella (ver [4], códigos 02.01, 02.02 y 02.03). 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 [3] (3.9):

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



NOTAS:

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

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 [1]. 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 resulta útil para establecer sus periodos de calibración y su comprobación entre calibraciones. En cuanto a los termómetros de resistencia de platino industriales (ver [4], código 05.01), 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 : 2º 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 $1 \cdot \sqrt{2}$ 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 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.
- 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.

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 alcohol 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 alcohol 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 vuelve a llenar con agua 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 preenfriada 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 alcohol.
- 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 aun 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. Estas 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 entorno al 60% o 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 preenfriado 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:



- 1°- 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 .
- 2°- 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.
- 3°- Lectura del TRPP a corriente de $1 \cdot \sqrt{2}$ mA (o 10 $\sqrt{2}$ mA para TRPP de 0,25 Ω): L_2 .
- 4°- Cambio de corriente a 1 mA (o 10 mA para TRPP de 0,25 Ω).
- 5°- Con ayuda de un pie y una pinza, se levanta el TRPP 2 cm, se espera 5 min para estabilización.
- 6°- 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).
- 7°- Se retira el termómetro de pozo termométrico y se vuelve a introducir en el baño de preenfriamiento.
- 8°- Espera de 5 min.
- 9°- Se introduce el termómetro por segunda vez en la célula.
- 10°- Espera de 5 min.
- 11°- 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 2°, 3° y 4°, pasando directamente del 1° al 5°.

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:

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

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: $s_t = \frac{\partial R(t)}{\partial t} = R(0,01^\circ\text{C}) \frac{\partial W(t)}{\partial t}$. En la

tabla 1 aparecen los valores típicos para distintos tipos de termómetros a $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Tabla 1. Coeficiente de sensibilidad a $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$ 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 [5] y [6].

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, 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 (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 históricos del patrón o de datos suministrados 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 el 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 históricos del patrón o de datos suministrados 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).

- 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 a continuación tabla 2). En el Anexo II se expone un ejemplo numérico del cálculo de incertidumbres.



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	$L \cdot R_s + (C + C_c)/s_t$			$u(R_x)$
				$u(t) = s_t \cdot u(R_x)$



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

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

Manuales de los equipos utilizados en la calibración.

7.2. Otras referencias

- [1] “Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90)”. Ed. CEM, 1990.
- [2] ASTM E 1502, “Supplementary information for the international temperature scale of 1990”. Ed. BIPM, 1990.
- [3] “Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de Metrología (VIM)”. Ed. CEM, 2000.
- [4] “Clasificación de instrumentos de Metrología de Temperatura”. 1ª Ed. SCI-MINER.



- [5] “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida”. Versión española. 2ª Ed., 2000, publicada por el CEM.
- [6] Documento ENAC, EA-4/02. “Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones”; Dec. 1999.
- [7] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración; MINER-CEM; Ed. 2º; 2000.

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 EL 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 adquiera 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 25Ω 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 $4 \cdot 10^{-6} \Omega/\Omega$ 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 100Ω , mantenida en una caja termostática a $36 \text{ }^\circ\text{C}$ con indicador de temperatura de resolución de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. La resistencia está calibrada a $36 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

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 $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ como cota superior, y una incertidumbre de medida del indicador de temperatura de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

Se observa una deriva entre periodos de calibración de $0,05 \text{ mK}$ 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:

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

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

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

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

- 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:

$$R_s = 100,000 \text{ } 1 \Omega$$
$$u(R_s) = 2 \times 10^{-5} \Omega / 2 = 1 \times 10^{-5} \Omega$$

$u(\delta R_{st})$: El certificado de calibración de la resistencia eléctrica patrón da el valor para una temperatura de $36 \text{ }^\circ\text{C}$. El día de la calibración del TRPP leemos en el indicador $35,7 \text{ }^\circ\text{C}$. La variación de temperatura será la composición cuadrática de la variación real observada ($0,3 \text{ }^\circ\text{C}$) más las resolución del indicador :

$$\Delta t = \sqrt{(0,3^2 + 0,1^2)} = 0,32 \text{ }^\circ\text{C}$$
$$u(\delta R_{st}) = 10 \Omega \cdot 0,32 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (1,75 \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C}) / \sqrt{3} = 32,33 \times 10^{-6} \Omega$$

$u(\delta R_{sd})$: 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 $u(x_i)$	Coefficiente 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	$1 \cdot 10^{-5} \Omega$	$0,255 \Omega/\Omega$	0,0025 m Ω
δR_{st}	0	$32,33 \times 10^{-6} \Omega$	$0,255 \Omega/\Omega$	0,0082 m Ω
δR_{sd}	0	$0,58 \times 10^{-5} \Omega$	$0,255 \Omega/\Omega$	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 mK

