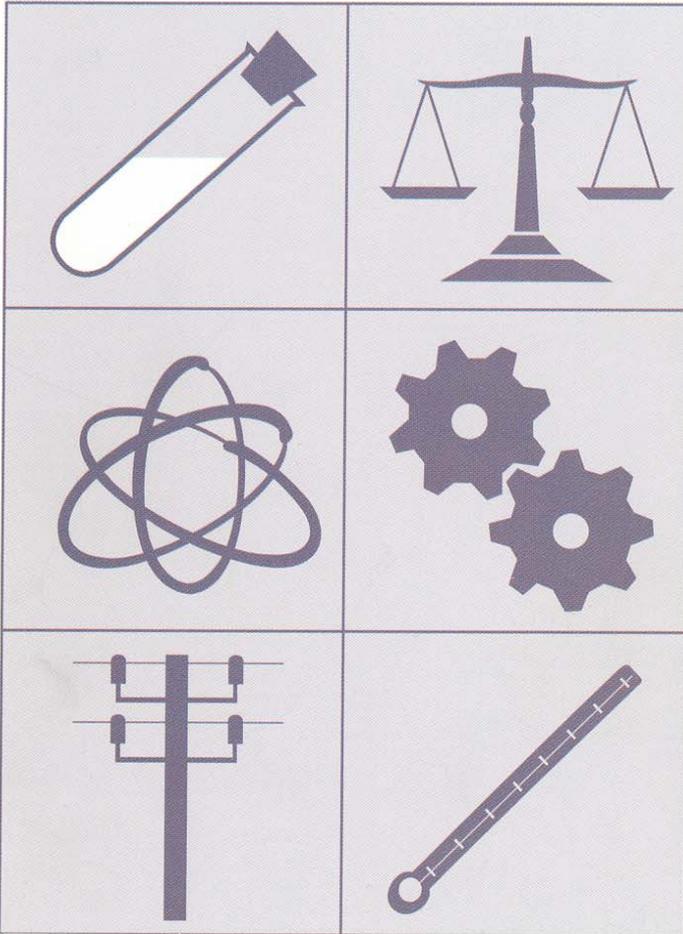


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO TH- 003 PARA LA CALIBRACIÓN POR COMPARACIÓN DE TERMOPARES

m 08



GOBIERNO
DE ESPAÑA

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	7
5. DESCRIPCIÓN.....	11
5.1. Equipos y materiales	11
5.2. Operaciones previas.....	12
5.3. Proceso de calibración	15
5.4. Toma y tratamiento de datos	18
6. RESULTADOS	21
6.1. Cálculo de incertidumbres	21
6.2. Interpretación de resultados	29
7. REFERENCIAS	29
7.1. Documentos necesarios para realizar la	29
7.2. Otras referencias	30
8. ANEXOS.....	31



1. OBJETO

Este procedimiento tiene por finalidad establecer y definir la sistemática a seguir en las calibraciones de termopares (ver [3], códigos 05.06 y 05.07) por comparación en medios isotermos de temperatura controlada.

2. ALCANCE

Este procedimiento afecta a todo tipo de termopar con o sin cables de compensación o extensión, que se calibrarán en medios isotermos de temperatura controlada, baños u hornos, por comparación a termómetros patrón calibrados con referencia a la Escala Internacional de Temperatura de 1990, EIT-90 [1]; sin limitación en el rango de temperatura, siempre que se dispongan de los medios adecuados.

3. DEFINICIONES

Termómetro digital (o de lectura directa):

Dispositivo destinado a utilizarse para hacer mediciones de temperatura que muestra una indicación digital en unidades de temperatura (kelvin o grados Celsius). Normalmente está constituido por uno o varios sensores y un equipo de lectura.

Sensor de Resistencia de Platino:

Elemento sensible a las variaciones de temperatura constituido por una resistencia termométrica dentro de una vaina protectora, hilos de conexión internos y terminales externos que permiten su conexión a equipos de medida eléctricos o electrónicos.



Termopar:

Pareja de dos conductores de distinto material unidos en uno de los extremos con objeto de formar una unidad utilizable en la medida de temperatura por efecto termoeléctrico (ver [3], códigos 05.06 y 05.07).

Junta de medida o junta caliente:

Unión del termopar que se coloca en el lugar en el que se desea medir la temperatura y se mantendrá en equilibrio térmico con el cuerpo cuya temperatura se desea medir.

Junta de referencia o junta fría:

Unión del termopar que está a una temperatura conocida, normalmente 0 °C, y que sirve como referencia de temperatura.

Falta de uniformidad (u homogeneidad) del termopar:

Cambios en la composición y condiciones de los materiales de los hilos de un termopar, causados por contaminación, tensiones mecánicas, etc., que modifican la fuerza electromotriz. Estos cambios, que pueden ser significativos, sólo influyen si están situados en una región con gradientes de temperatura.

Tratamiento térmico:

Proceso al que se someten los termopares antes de su calibración para mejorar la homogeneidad de los hilos y eliminar posibles tensiones mecánicas, consiguiendo una estabilidad aceptable para su calibración.

Cables de prolongación (o extensión):

Cables formados por conductores del mismo material que los termopares y que se utilizan para aumentar la longitud de los mismos (ver [3], código 07.02).



Cables de compensación:

Tienen la misma utilidad que los cables de extensión pero la composición es distinta que la de los materiales del termopar (ver [3], código 07.01).

Repetibilidad (de los resultados de las mediciones) [2] (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.

Calibración [2] (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 metroológicas 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.

Incertidumbre [2] (3.9):

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

NOTAS

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

4. GENERALIDADES

Un termopar consiste en dos hilos metálicos distintos, conectados por uno de sus extremos formando la junta de medida o junta caliente; el otro extremo forma la junta de referencia o junta fría que se conecta, directamente o usando los medios adecuados, a un instrumento capaz de medir las fuerzas electromotrices que se generan en el circuito.



La fuerza electromotriz generada en un termopar es función de la diferencia de temperaturas entre la junta de referencia y la de medida, siempre que los hilos del termopar sean de composición uniforme en toda su longitud. Medidas efectivas y calibraciones son posibles sólo si la junta de medida y la de referencia están mantenidas en zonas isotermas y a una profundidad de inmersión suficiente para evitar flujos térmicos, consiguiendo de este modo que ambas juntas alcancen la temperatura de su entorno.

La magnitud de las fuerzas electromotrices depende de los materiales de los conductores usados en el termopar y de su estado. Cambios en la composición y condiciones de los materiales causados por contaminación, tensiones mecánicas, etc., también influyen y modifican la fuerza electromotriz y la calibración asociada. De cualquier forma, estos cambios influyen sólo si están localizados en una región con gradientes de temperatura y no son detectados en una recalibración si, por ejemplo, la zona del conductor alterada, está localizada en una zona isoterma.

Con el tiempo y el uso, la degradación del termopar y su calibración son inevitables y, a largo plazo debería establecerse y mantenerse un plan de comprobaciones periódicas y sustituciones ocasionales.

Si, por razones prácticas, la longitud de un termopar ha de ser aumentada, deben utilizarse los cables de compensación o extensión adecuados. Lo mejor, es que estos cables estén conectados permanentemente al termopar. Es importante asegurarse de que estas uniones secundarias no se colocan en lugares donde puedan existir gradientes de temperatura, y deben ser apantalladas o aisladas contra humedades, radiación y cambios bruscos de la temperatura ambiente.

En el caso de utilizar cables de compensación o extensión, deberá introducirse una causa de incertidumbre adicional, que dependerá de las diferencias en fuerza electromotriz entre los cables de compensación/extensión y el termopar (ver [10]). En este caso, los cables de extensión o compensación forman parte del termopar y nunca deben ser sustituidos por otros.



Símbolos y abreviaturas

- EIT-90: Escala Internacional de Temperatura de 1990.
- c_0 : coeficiente de sensibilidad de un termopar en 0°C , se calcula a partir de las tablas de referencia de [4], dependiendo del tipo de termopar.
- c_t : coeficiente de sensibilidad de un termopar a una temperatura t se calcula a partir de las tablas de referencia de [4], dependiendo del tipo de termopar.
- d_i : deriva del patrón i , intervalo máximo de variación de la temperatura indicada por ese patrón entre calibraciones (previamente corregida o interpolada según el certificado).
- d_v : deriva del voltímetro, intervalo máximo de variación de la fuerza electromotriz indicada por él entre calibraciones (previamente corregida o interpolada según el certificado).
- e_b : estabilidad del medio isoterma; intervalo máximo de variación de la temperatura del medio isoterma en los puntos de calibración durante el tiempo que dura ésta.
- E_x : fuerza electromotriz leída por el termopar en calibración.
- δE_c : corrección a la lectura de fuerza electromotriz debida a la calibración del voltímetro.
- δE_d : corrección a la lectura de fuerza electromotriz debida a la deriva del voltímetro entre calibraciones.
- δE_0 : corrección a la lectura de fuerza electromotriz debida a fuerzas electromotrices residuales en los terminales de conexión del voltímetro.
- δE_h : corrección a la lectura de fuerza electromotriz debida a la falta de homogeneidad del termopar.
- δE_i : corrección a la lectura de fuerza electromotriz debida a fuerzas electromotrices residuales en el conmutador usado para invertir la polaridad.
- δE_{mi} : corrección a la lectura de fuerza electromotriz debida a factores de influencia adicionales.
- h : valor estimado para las posibles variaciones de temperatura de la junta fría.



- hom : diferencia máxima entre las lecturas del termopar obtenida en la prueba de homogeneidad.
- k : factor de cobertura.
- R_i : resolución del termómetro patrón i .
- R_v : resolución del voltímetro.
- t : temperatura del punto de calibración elegido.
- t_x : temperatura media a la que se encuentran los patrones.
- t_1, t_2 : temperatura indicada por el primer y segundo patrón corregida o interpolada según el certificado.
- u_b : uniformidad del medio isoterma; intervalo máximo de variación de la temperatura del medio isoterma entre distintos puntos de la zona de calibración.
- U_i : incertidumbre expandida de calibración del patrón i .
- U_v : incertidumbre expandida de calibración del voltímetro.
- v_i : valor estimado para las fuerzas electromotrices residuales en los terminales del voltímetro.
- v_i : valor estimado para las fuerzas electromotrices residuales el conmutador usado para invertir la polaridad de los termopares.
- Δt : Desviación de la temperatura del punto de calibración con respecto a la temperatura del horno.
- $\delta t_{c1}, \delta t_{c2}$: corrección a la temperatura indicada por el primer y segundo patrón debido a sus incertidumbres de calibración.
- $\delta t_{d1}, \delta t_{d2}$: corrección a la temperatura indicada por el primer y segundo patrón debido a la deriva entre calibraciones.
- $\delta t_{mi1}, \delta t_{mi2}$: corrección a la temperatura indicada por el primer y segundo patrón debido a factores de influencia adicionales.
- δt_u : corrección a la temperatura indicada por los patrones debido a la falta de uniformidad del medio isoterma de calibración.
- δt_e : corrección a la temperatura indicada por los patrones debido a la falta de estabilidad del medio isoterma de calibración.
- δt_f : corrección a la lectura de fuerza electromotriz debida a posibles variaciones de temperatura en la junta fría.



5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

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

- Dos termómetros patrón con incertidumbre de calibración de, al menos, un orden de magnitud inferior a la esperada para los termopares a calibrar y rango similar a los mismos. (Es recomendable disponer de otro patrón adicional; p. e., en el caso de que las diferencias encontradas entre las lecturas de los dos patrones usados durante la calibración sea mayor que la uniformidad del medio isoterma es útil para verificar cuál de los patrones está midiendo mal).
- Baños de temperatura controlada y/u hornos con funcionamiento en el margen de calibración del termopar, caracterizados en estabilidad y uniformidad, que deben ser coherentes con la incertidumbre de calibración prevista. También puede ser necesario un baño de hielo preparado según el Anexo I.
- Equipos de lectura adecuados para los termómetros utilizados como patrones y para los termopares a calibrar, con resolución e incertidumbres de calibración adecuadas al nivel de la calibración.
- Cables de cobre de baja fuerza electromotriz.
- Conmutador de baja fuerza electromotriz, si se considera necesario.
- 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.



5.2. Operaciones previas

5.2.1. Identificación e inspección inicial del termopar

El termopar a calibrar deberá estar identificado con al menos un número de serie. 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 termopar que se considere más apropiado, un número identificativo de la forma que determine el laboratorio.

Los termopares pueden tener diversas formas de aislamiento y de fundas protectoras; también pueden presentarse con los hilos desnudos. Los signos evidentes de tensiones mecánicas, contaminación, etc., deben ser anotados y el cliente avisado de que la incertidumbre de calibración puede verse afectada. Cualquier presencia de humedad, especialmente alrededor de las conexiones de los cables de compensación/extensión debe analizarse, pues podrían producirse fuerzas electromotrices parásitas por efecto electrolítico.

5.2.2. Tratamientos térmicos

Cualquier termopar que vaya a calibrarse, debe ser homogéneo en su composición y en las condiciones de los hilos que lo forman. Termopares inhomogéneos usados en condiciones diferentes de las de calibración, ofrecerán resultados erróneos, con unas desviaciones que pueden llegar a varios grados Celsius.

A los termopares de metales nobles, se les suele someter a tratamientos térmicos de estabilización. Éstos, son una forma de intentar mejorar las condiciones de los termopares en las recalibraciones, sólo deben realizarse previa autorización del cliente.



El tratamiento, en su caso, debe ser previo a la calibración y se llevará a cabo sometiendo al termopar a la máxima profundidad de inmersión y a la máxima temperatura de utilización durante un mínimo de una hora.

5.2.3. Junta de referencia

Las tablas que relacionan temperatura con fuerza electromotriz en los termopares [4], tienen el punto del hielo, 0 °C, como temperatura de referencia para la junta fría. Para la preparación del punto del hielo consultar Anexo I.

Si fuera necesario realizar el montaje de la junta fría (cuando no esté hecha y no se utilicen juntas eléctricas ni electrónicas), este se haría soldando o retorciendo cada uno de los dos hilos del termopar a sendos cables de cobre. Cada cable ha debido de ser previamente lijado y tras el montaje, las uniones formadas deben aislarse, p.e. con un tubo de ensayo de longitud adecuada o similar, antes de su inserción en el punto del hielo.

En el caso de utilizar la junta fría sumergida en baño de hielo, antes de comenzar las medidas debe asegurarse una profundidad de inmersión adecuada para ésta, de forma que se eviten problemas de conducción térmica. Se determinará introduciendo la junta fría en el baño de hielo lo máximo posible y sacándola paulatinamente hasta observar variaciones significativas de las medidas del termopar. La profundidad de inmersión adecuada estará en el margen en el que las lecturas del termopar no varíen. Si incluso con la junta sumergida en su totalidad se observan variaciones de fuerza electromotriz al sacarla, se aumentará la incertidumbre de calibración del termopar en función de éstas⁽¹⁾. Esta prueba se puede realizar a cualquier temperatura para la junta caliente, incluso introduciéndola en el mismo baño de hielo.

NOTA



(1) Una posible forma de ver el error cometido por conducción térmica es ajustar los datos de temperatura, t , tomados con el sensor sumergido a distintas profundidades, x , con una ecuación de la forma $t = t_0 \cdot (1 - e^{-\frac{x}{x_0}})$. La temperatura a la que el termómetro no conduce es t_0 , lo que nos permitirá corregir la temperatura, t , medida con el sensor sumergido una longitud x .

Son muy utilizadas las juntas frías eléctricas y electrónicas cuando se utilizan gran número de termopares o las medidas se hacen durante un largo período de tiempo. En estos casos, hay que comprobar que los resultados de las medidas son los mismos cuando la junta tiene todos los termopares conectados. Si esta junta fuese una caja termostatizada, debe ser verificada mediante un termómetro patrón. En general, todas las juntas frías deben comprobarse periódicamente, las eléctricas y electrónicas utilizando un voltímetro calibrado y si se realizan con baño de hielo, mediante un termómetro patrón.

Cuando se trabaje con un termopar calibrado con su junta fría a 0 °C y ésta no se mantenga a esa temperatura, la fuerza electromotriz correspondiente a la nueva temperatura de referencia debe ser sumada a la fuerza electromotriz medida por dicho termopar.

5.2.4. Junta de medida

En lo posible, los termopares deben ser calibrados a la misma profundidad de inmersión a la que se usen normalmente. De cualquier forma, sus juntas de medida deben estar introducidas hasta una profundidad suficiente que impida las pérdidas o ganancias de calor a temperaturas altas y a temperaturas bajas respectivamente. Para asegurar la profundidad adecuada, se procede igual que en el párrafo tercero del punto 5.2.3 con la junta de referencia.



La profundidad de inmersión adecuada se evidencia cuando al extraer el termopar uno o dos centímetros, las variaciones de fuerza electromotriz que presente, sean pequeñas comparadas con la incertidumbre de medida de la calibración.

Cuando se utilicen baños como medio de calibración, las juntas de medida deben ser colocadas en ellos con una separación mínima de 1 cm. No deben estar en contacto con las paredes ni el fondo de los baños pues estos pueden estar a una temperatura ligeramente distinta de la del líquido.

En baños, los termopares desnudos deben protegerse de contaminación introduciéndolos en tubos de alúmina con uno de sus extremos cerrados. En este caso, será necesaria una mayor profundidad de inmersión para compensar el pobre contacto térmico. Cuando se utilicen hornos, si se considera necesario, pueden tomarse las mismas precauciones.

5.2.5. Estabilización previa

Antes de comenzar la calibración, se conectarán los equipos que se vayan a utilizar, incluido el termopar a calibrar, 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.

5.3. Proceso de calibración



- 1) En general, durante la calibración, las medidas de la temperatura se harán cuando el medio isotermo se encuentre estable y uniforme, lo que debe comprobarse en cada punto de calibración. El laboratorio debe tener previamente caracterizados sus medios isotermos que tendrán valores asignados de estabilidad y uniformidad, a los que se va a hacer referencia en este procedimiento (la forma particular de caracterización de un medio isoterma no es objeto de este procedimiento). Para comprobar si el medio isoterma está lo suficientemente estable, es conveniente anotar o registrar la lectura de uno de los patrones. Para comprobar si el medio está uniforme, se utilizarán los dos patrones.
- 2) El circuito de medida de los termopares debe ser comprobado y corregido de cualquier tipo de fuerza electromotriz residual, obteniendo un valor de lectura (δE_0) con el circuito cerrado mediante un corto en los terminales donde se conecten los termopares. Este valor deberá introducirse como corrección en las lecturas del termopar si su valor es significativo frente a la incertidumbre de calibración esperada para el termopar. En cualquier caso, estará incluido en el cálculo de incertidumbres.
- 3) Debe realizarse un estudio de homogeneidad (o uniformidad) del termopar en calibración para determinar la posible falta de homogeneidad de los hilos de termopar a lo largo del termopar, la mayor causa de incertidumbre de este tipo de sensores. Para ello debe usarse un método que conlleve cambios locales del perfil térmico a lo largo de la longitud del termopar, por calentamiento o enfriamiento, mientras que las juntas de medida y de referencia se mantienen a una temperatura estable, p.e. 0 °C. La zona de calentamiento o enfriamiento se va desplazando lentamente a lo largo de la longitud del termopar, lo que permite detectar inhomogeneidades locales a partir de variaciones en las lecturas del termopar.

Otra posibilidad es mover la junta de medida en un medio isoterma que posea una distribución lo más homogénea posible de temperatura (p.e. un baño de líquido agitado o una célula de



punto fijo). Con este método, distintas zonas del termopar irán posicionándose en la zona con mayor gradiente de temperatura (superficie del baño u horno), lo que ocasionará cambios en las lecturas si éste no fuese homogéneo en las zonas sometidas a gradiente. Las profundidades a las que se realizan estas pruebas deben ser mayores que la profundidad de inmersión determinada al comienzo del proceso de calibración, para evitar errores por conducción térmica. Es aconsejable tomar la precaución de determinar la temperatura a la que se realizan las pruebas con los patrones. Si el valor obtenido de uniformidad del termómetro es del orden de la estabilidad y uniformidad del baño en las condiciones y tiempo de la calibración, no se considerará el valor obtenido de uniformidad en el cálculo de incertidumbres: las variaciones de las medidas del termómetro se deben al baño, lo que ya se ha tenido en cuenta en el cálculo.

Es recomendable estimar la contribución de incertidumbre debida a la falta de homogeneidad como una distribución rectangular, cuya amplitud sería equivalente a la mayor diferencia encontrada entre dos medidas durante la prueba de uniformidad. Si la prueba se realiza en una pequeña porción del termopar, la máxima diferencia encontrada deberá tomarse como la semiamplitud del intervalo de la distribución. Cuando no se puedan realizar estas medidas se recomienda tomar al menos el 20 % de la tolerancia para la clase 2 del tipo de termopar correspondiente, según [5], como contribución de incertidumbre.

Si se realiza la prueba de uniformidad a otra temperatura distinta de la de calibración, puede expresarse la falta de homogeneidad como un porcentaje de la fuerza electromotriz total.

- 4) La calibración se realizará en un mínimo de 5 ó 6 puntos que cubran al menos el 80% del rango de calibración y distribuidos de manera uniforme. Los puntos de calibración irán en orden de temperaturas decrecientes, ya que los gradientes térmicos



producidos en los hornos a altas temperaturas, pueden inducir inhomogeneidades en los termopares. En el caso de los termopares tipo K, la calibración debe hacerse a temperaturas crecientes, pues estos, sufren cambios entorno a los 500 °C y debe repetirse el primer punto de calibración al finalizar como comprobación.

El proceso de lectura que se repetirá para cada punto de calibración, consiste en:

- 1° Lectura del primer patrón corregida o interpolada según su certificado t_{11} .
- 2° Lectura del termopar a calibrar E_{x1} .
- 3° Lectura del segundo patrón corregida o interpolada según su certificado t_2 .
- 4° Lectura del termopar a calibrar E_{x2} .
- 5° Lectura del primer patrón corregida o interpolada según su certificado t_{12} .

NOTA

En el caso de que se calibren simultáneamente varios termopares, en el paso 4° se leerán en orden inverso al que fueron leídos en el paso 2°.

Cuando se quiere conseguir una mayor exactitud, las medidas en los termopares deben hacerse también invirtiendo la polaridad. Utilizando la media de estos dos valores, se minimizan las posibles fuerzas electromotrices parásitas. Los voltímetros digitales, pueden ofrecer resultados distintos entre los modos positivo y negativo, por lo que para ello, ambas polaridades deben estar calibradas. Por tanto en los pasos 2°y 4° se tomarían dos lecturas del termopar a calibrar en cada uno, una con polaridad directa y otra inversa.

5.4. Toma y tratamiento de datos

Para cada punto de calibración se anotará:



- 1) Posibles anomalías y descripción de los tratamientos térmicos si se dan.
- 2) Si el termopar fue calibrado con cables de extensión o compensación.
- 3) Las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa.
- 4) El tipo de junta de referencia utilizada y el resultado de su comprobación.
- 5) La temperatura de la junta de referencia si ésta fuese distinta de 0°C.
- 6) Las profundidades de inmersión de la junta de medida y de la de referencia.
- 7) El valor de δE_0 , en el caso de que sea necesario hacer correcciones.
- 8) Los valores en temperatura que indican los patrones: t_1 , t_2 y t_2 .
- 9) La temperatura asignada a cada punto de calibración que será la media de las temperaturas obtenidas con los patrones. Esta media se obtiene primero para las temperaturas determinadas por el primer patrón y después se vuelve a hacer la media para los dos patrones:

$$t_x = \frac{\frac{t_{11} + t_{12}}{2} + t_2}{2} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (1)$$

- 10) Los valores de fuerza electromotriz del termopar en calibración: E_{x1} y E_{x2} .
- 11) El valor de fuerza electromotriz del termopar en calibración E_x que será la media de las lecturas E_{x1} y E_{x2} .

$$E_x = (E_{x1} + E_{x2})/2 \quad (2)$$

En este proceso, si se observan diferencias (en valor absoluto) entre las dos lecturas del primer patrón mayores que la estabilidad asignada al medio isoterma de calibración, se repetirán las medidas por falta de estabilidad:



$$|t_{11} - t_{12}| > e_b \quad (3)$$

NOTA

Se considera que la diferencia entre la primera y la segunda medida del primer patrón puede ser debida a la falta de estabilidad del medio isoterma. Se permite una variación dentro de los límites de estabilidad del medio isoterma utilizado, para asegurarse de que las medidas se han tomado en el medio isoterma suficientemente estable (sistema bajo control estadístico).

También se repetirán las medidas del punto de calibración, si la diferencia (en valor absoluto) entre las temperaturas de los dos patrones es mayor que la uniformidad asignada al medio isoterma de calibración, por falta de uniformidad:

$$|t_1 - t_2| > u_b \quad (4)$$

Si la diferencia persiste se sustituirá uno de los patrones para identificar el origen del problema.

NOTA

Se considera que la diferencia entre las lecturas de los dos patrones puede ser debida a la falta de uniformidad del medio isoterma. Se permite una variación dentro de los límites de uniformidad del medio isoterma utilizado, para asegurarse de que las medidas se han tomado en el medio suficientemente estable y uniforme (sistema bajo control estadístico).

Los termopares se suelen usar para medir la temperatura en un rango, no a un único punto, para lo cual es necesaria una ecuación de interpolación de forma que relacione la fuerza electromotriz con la temperatura ($V=f(t)$). Las funciones de referencia de los termopares más comunes aparecen en [4], los comportamientos individuales no suelen alejarse mucho de las mismas, a pesar de lo cual es necesario calcular una ecuación de desviación de la función de referencia de forma que el comportamiento particular del termopar en calibración quedaría descrito como $V=f_{\text{referencia}}(t)+f_{\text{desviación}}(t)$.



Para el cálculo de esta función, basta con ajustar un polinomio de bajo grado (de segundo a cuarto orden) a las diferencias entre la fuerza electromotriz leída por el termopar y la fuerza electromotriz de referencia [4] correspondiente a la temperatura indicada por los patrones en el punto de calibración. Así, los primeros coeficientes de la función de referencia quedarían modificados, según el grado del polinomio, mientras que los de mayor orden permanecerían invariables. Para calcular los coeficientes de este ajuste es aconsejable emplear el método de mínimos cuadrados.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

En el desarrollo del cálculo de incertidumbres, se han seguido las pautas recomendadas en las referencias [6], [7], [8], [11], y [12].

- 1) Para poder establecer un modelo matemático que describa el proceso de medición y permita el cálculo de la incertidumbre asociada, debemos distinguir dos pasos (ver [8] y [12]). El primero consiste en expresar la temperatura, t_x , a la que se somete la junta de medida del termopar en calibración, en función de todas las magnitudes de entrada. El segundo será expresar la fuerza electromotriz, $E(t_x)$, medida por el termopar en calibración en función de sus magnitudes de entrada.

Para t_x podemos escribir:

$$t_x \cong \frac{1}{2} \left[t_1 + \delta t_{c1} + \delta t_{d1} + \sum_i \delta t_{mi1} + t_2 + \delta t_{c2} + \delta t_{d2} + \sum_i \delta t_{mi2} \right] + \delta t_u + \delta t_e \quad (5)$$

Donde se ha considerado que las lecturas de los patrones están corregidas, o interpoladas, según sus certificados, por ser lo más conveniente. Si no se hiciera, deberá añadirse una causa más de incertidumbre para cada patrón por la corrección no realizada. No se introduce ningún factor debido

a repetibilidad de los patrones ya que no se hacen medidas estadísticamente significativas en los puntos de calibración (ver descripción del proceso de lectura en 5.3).

Aplicando a (5) la ley de propagación de incertidumbres y suponiendo que no existe correlación entre las magnitudes de entrada (ver desarrollo completo en el Anexo II):

$$u^2(t_x) = \frac{1}{4} \left[u^2(t_1) + u^2(\delta t_{c1}) + u^2(\delta t_{d1}) + \sum_i u^2(\delta t_{mi1}) + u^2(t_2) + u^2(\delta t_{c2}) + \right. \\ \left. + u^2(\delta t_{d2}) + \sum_i u^2(\delta t_{mi2}) \right] + u^2(\delta t_e) + u^2(\delta t_u) \quad (6)$$

La fuerza electromotriz generada a lo largo de los hilos del termopar durante la calibración, con la junta fría a 0 °C, puede expresarse, teniendo en cuenta los principales factores de influencia, como:

$$E(t_x) \cong E_x + \delta E_c + \delta E_d + \delta E_0 + \delta E_i + \delta E_h + \sum_i \delta E_{mi} + c_0 \cdot \delta t_{fr} + c_t \cdot \Delta t$$

Para calcular la incertidumbre total en fuerza electromotriz del termopar, se debe aplicar a (7) la ley de propagación de incertidumbres (ver desarrollo completo en Anexo II):

$$u^2(E(t_x)) = u^2(E_x) + u^2(\delta E_c) + u^2(\delta E_d) + u^2(\delta E_0) + u^2(\delta E_i) + \\ + u^2(\delta E_h) + \sum_i u^2(\delta E_{mi}) + c_0^2 \cdot u^2(\delta t_{fr}) + c_t^2 \cdot u^2(t_x) \quad (8)$$

Donde $u^2(t_x)$ aparece calculada en (6). No se introduce ningún factor debido a repetibilidad del termopar ya que no se hacen medidas estadísticamente significativas en los puntos de calibración (ver descripción del proceso de lectura en 5.3).

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



$u(t_1)$, $u(t_2)$: Incertidumbres de lectura del primer y segundo patrón. Si la resolución del patrón i es R_i , suponiendo distribución de probabilidad rectangular:

$$u(t_i) = R_i / \sqrt{12}$$

$u(\delta t_{c1})$ y $u(\delta t_{c2})$: Incertidumbres de calibración de los patrones, obtenidas a partir de los datos de sus certificados de calibración. Si la incertidumbre expandida de calibración del termómetro patrón i es U_i para un factor de cobertura k :

$$u(\delta t_{ci}) = U_i / k$$

$u(\delta t_{d1})$ y $u(\delta t_{d2})$: Incertidumbre por deriva de los patrones en el periodo de calibración elegido, que se estimará a través de los históricos de los patrones o de datos suministrados por el fabricante. Si la deriva máxima del patrón i es $\pm d_i$, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta t_{di}) = d_i / \sqrt{3}$$

$\sum_i u^2(\delta t_{mi1})$ y $\sum_i u^2(\delta t_{mi2})$: Incertidumbres debidas a

magnitudes de influencia adicionales sobre los patrones. Se estimarán en caso de que existan. Por ejemplo, si los patrones son también termopares, se deberán considerar como magnitudes de influencia, entre otras, la calibración del voltímetro utilizado, el uso de un conmutador, la variación de temperatura de la junta fría, etc. Otro ejemplo es el caso en que los patrones estuviesen calibrados por separado el sensor del equipo de lectura, entonces, una magnitud de influencia sería la calibración del equipo de lectura.

$u(\delta t_e)$: Incertidumbre del medio de calibración debida a su falta de estabilidad. Lo más adecuado, es realizar estudios previos de estabilidad con un termómetro patrón. Si la estabilidad está dentro de los límites de $\pm e_b$, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta t_e) = e_b / \sqrt{3}$$



$u(\delta t_i)$: Incertidumbre del medio de calibración debida a su falta de uniformidad. Lo más adecuado, es realizar estudios previos de uniformidad con un termómetro patrón. Si la uniformidad está dentro de los límites de $\pm u_b$, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta t_i) = u_b / \sqrt{3}$$

$u(E_x)$: Incertidumbre de lectura del termopar. Si la resolución del voltímetro utilizado para leer los termopares es R_v , suponiendo distribución de probabilidad rectangular:

$$u(E_x) = R_v / \sqrt{12}$$

$u(\delta E_c)$: Incertidumbre debida a la calibración del voltímetro, se obtiene de su certificado de calibración. Si la incertidumbre expandida de calibración del voltímetro es U_v para un factor de cobertura k :

$$u(\delta E_c) = U_v / k$$

$u(\delta E_d)$: Incertidumbre por deriva del voltímetro en el periodo de calibración elegido, que se estimará a través del histórico del mismo o de datos suministrados por el fabricante. Si la deriva máxima es $\pm d_v$, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta E_d) = d_v / \sqrt{3}$$

$u(\delta E_0)$: Incertidumbre debida a posibles fuerzas electromotrices residuales en los terminales de conexión de los termopares, calculada tomando un valor de lectura cuando el circuito esta cerrado mediante un corto en estos terminales. Si este valor no fuese despreciable frente a la incertidumbre de calibración del termopar, la lectura del termopar E , debería ser corregida. Como ya se comentó en el apartado 5.3. Si estas fuerzas electromotrices residuales están dentro de los límites de $\pm v_r$, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta E_0) = v_r / \sqrt{3}$$

$u(\delta E_i)$: Incertidumbre debida a posibles fuerzas electromotrices residuales en el conmutador utilizado para las inversiones de polaridad, en su caso, estimada tomando



valores de lectura, cuando el circuito esta cerrado mediante un corto en estos terminales, en los valores de polaridad directa e inversa. Si estas fuerzas electromotrices residuales están dentro de los límites de $\pm v_c$, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta E_i) = v_c / \sqrt{3}$$

$u(\delta E_h)$: Incertidumbre debida a la falta de homogeneidad del termopar. Si en la prueba descrita en el punto 3) del epígrafe 5.3 se obtuvo una diferencia máxima *hom* en las lecturas del termopar, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta E_h) = hom / \sqrt{3} \text{ ó } \sqrt{12}$$

Se dividirá por $\sqrt{3}$ ó $\sqrt{12}$ dependiendo de si se ha estudiado el termopar completo o sólo una porción del mismo.

$\sum_i u^2(\delta E_{mi})$ Incertidumbres debidas a magnitudes de influencia adicionales sobre el termopar en calibración. Se estimarán en caso de que existan. Por ejemplo, si se detectase algún factor de influencia puntual en las medidas del termopar, durante el proceso de calibración, como la imposibilidad de inmersión adecuada para eliminar errores de conducción térmica, uso de cables de compensación y/o extensión, etc., se añadiría al cálculo de incertidumbres. En general se calcularán estimando unos límites de variación máxima y aplicando una distribución de probabilidad rectangular.

$u(\delta t_{fr})$: Incertidumbre debida a las posibles variaciones de temperatura en la junta fría del termopar. Si las variaciones de temperatura de la junta de referencia están dentro de los límites de $\pm h$, suponiendo distribución rectangular:

$$u(\delta t_{fr}) = h / \sqrt{3}$$

$u(t_x)$: Incertidumbre de la temperatura de la junta de medida. Su valor viene dado en la expresión (6) que debe ser calculado previamente.



Los valores de los coeficientes de sensibilidad c_0 y c_t (en $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) se obtienen de las tablas de referencia [4] según el tipo de termopar.

- 3) La incertidumbre combinada obtenida de la ecuación (8), se multiplicará por un factor $k = 2$, para obtener la incertidumbre expandida (se considera que la incertidumbre combinada corresponde a una distribución normal, por lo que este factor supone una probabilidad de cobertura del 95,45 %).

NOTA

Esto será cierto en general, ya que todas las contribuciones a la incertidumbre combinada son de tipo B y se puede asumir que se cumplen las condiciones del Teorema Central del Límite, y que, por lo tanto, la incertidumbre combinada sigue una distribución normal.

La incertidumbre expandida puede darse también en temperatura multiplicando la incertidumbre expandida en fuerza electromotriz por $1/c_t$ donde c_t es el coeficiente de sensibilidad a la temperatura t del termopar (en $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), que se obtiene de las tablas de referencia [4].

Es conveniente recoger todas las contribuciones del cálculo de incertidumbre en una tabla (ver [7] y [11]). En este caso se recomienda hacer dos (ver [8] y [12]), una para calcular $u(t_x)$ y otra para $u(E(t_x))$ (ver a continuación tablas 1 y 2). En el Anexo III se ofrece un ejemplo numérico del cálculo de incertidumbres.



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

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coficiente de Sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre típica $u(y)$
t_1	$(t_{11} + t_{12})/2$	$u(t_1)$	1/2	$u(t_1)/2$
t_2	t_2	$u(t_1)$	1/2	$u(t_2)/2$
δt_{c1}	0	$u(\delta t_{c1})$	1/2	$u(\delta t_{c1})/2$
δt_{c2}	0	$u(\delta t_{c2})$	1/2	$u(\delta t_{c2})/2$
δt_{d1}	0	$u(\delta t_{d1})$	1/2	$u(\delta t_{d1})/2$
δt_{d2}	0	$u(\delta t_{d2})$	1/2	$u(\delta t_{d2})/2$
δt_{m11}	0	$u(\delta t_{m11})$	1/2	$u(\delta t_{m11})/2$
...
δt_{mi1}	0	$u(\delta t_{mi1})$	1/2	$u(\delta t_{mi1})/2$
δt_{m12}	0	$u(\delta t_{m12})$	1/2	$u(\delta t_{m12})/2$
...
δt_{mi2}	0	$u(\delta t_{mi2})$	1/2	$u(\delta t_{mi2})/2$
δt_e	0	$u(\delta t_e)$	1	$u(\delta t_e)$
δt_u	0	$u(\delta t_u)$	1	$u(\delta t_u)$
t_x	$(t_1 + t_2)/2$			$u(t_x)$



Tabla 2. Resumen del cálculo de $u(E(t_x))$

Magnitud	Estimación	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coficiente de Sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$
E_x	$(E_{x1} + E_{x2})/2$	$u(E_x)$	1	$u(E_x)$
δE_c	0	$u(\delta E_c)$	1	$u(\delta E_c)$
δE_d	0	$u(\delta E_d)$	1	$u(\delta E_d)$
δE_0	0	$u(\delta E_0)$	1	$u(\delta E_0)$
δE_i	0	$u(\delta E_i)$	1	$u(\delta E_i)$
δE_h	0	$u(\delta E_h)$	1	$u(\delta E_h)$
δE_{m1}	0	$u(\delta E_{m1})$	1	$u(\delta E_{m1})$
...
δE_{mi}	0	$u(\delta E_{mi})$	1	$u(\delta E_{mi})$
δt_{fr}	0	$u(\delta t_{fr})$	c_0	$u(\delta t_{fr})$
Δt	0	$u(t_x)$	$-c_t$	$u(t_x)$
$E(t_x)$	E_x			$u(E(t_x))$

NOTA

Si se desea dar como resultado de la calibración la fuerza electromotriz del termopar no para t_x (temperatura real del horno indicada por los patrones) sino para t (temperatura del punto de calibración elegido), como estimación de la magnitud Δt , se debe tomar $c_t \cdot \Delta t$ en lugar de 0.

- 4) Como se comentó en el punto 5.4., para puntos intermedios a los de calibración debe utilizarse una ecuación de interpolación que se calcula a partir de la función de desviación del termopar con respecto a la de referencia [4]. La utilización de esta ecuación conlleva nuevas fuentes de incertidumbre (ver [14]):



- a) Incertidumbre debida a la falta de ajuste de los puntos experimentales a la función de desviación:
Se puede considerar la máxima diferencia obtenida entre los valores de la temperatura medidas con los TRP patrones y los valores de la temperatura calculados con la función de interpolación obtenida en el ajuste.
- b) Incertidumbre debida a la propagación de la incertidumbre de los puntos de calibración a la ecuación de ajuste:
Este valor dependerá de la incertidumbre de los puntos de calibración y debe calcularse aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación de ajuste (ver [14]).

La combinación cuadrática de estas dos incertidumbres dará una buena estimación para la incertidumbre típica combinada de la ecuación de interpolación del termopar calibrado.

6.2. Interpretación de resultados

Los periodos de recalibración de los termopares, no están normalizados debido a su diversidad de tipos, rangos de temperatura, construcción, aplicación, intensidad de uso, etc. El usuario del termopar debe establecer su propio programa de comprobaciones y calibraciones adaptado a sus equipos y sistemas de medida, según su experiencia. En principio, se podría comenzar con un período inicial de calibración de un año, para posteriormente dependiendo del comportamiento del termopar aumentarlo o disminuirlo.

7. REFERENCIAS

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración



Manual de funcionamiento de los patrones (si son termómetros digitales o resistencias unidas a puentes de medida, etc.) y resto de manuales de los equipos utilizados durante la calibración.

7.2. Otras referencias

- [1] “Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90)”. Ed. CEM, 1990.
- [2] “Vocabulario internacional de términos básicos y generales de Metrología (VIM)”. Ed. CEM, 1994.
- [3] “Clasificación de instrumentos de Metrología de Temperatura”. 1ª Ed. SCI-MINER.
- [4] Norma UNE-EN 60584-1:1997 Termopares. Parte 1: Tablas de referencia. (versión oficial EN 60584-1:1995) y su Erratum de 2001.
- [5] Norma UNE-EN 60584-2:1996 Termopares. Parte 2: Tolerancias. (versión oficial EN 60584-1:1995)
- [6] “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida”. Versión española. 1ª Ed., 1998, publicada por el CEM.
- [7] Documento ENAC CEA-ENAC-LC/02 Rev. 1. “Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones”; 1998.
- [8] “Calibration of thermocouples”, guía EURAMET/cg-08/v.01 (2007).
- [9] “Principles and Methods of Temperature Measurement”. T. D. McGee. Ed. J. Wiley & Sons.
- [10] Norma IEC-584-3:1989 Thermocouples, part 3, extension and compensation cables. Tolerances and identification system.



- [11] EA Publication reference EA-4/02 “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration”; 1997.
- [12] EA Publication reference EA-4/02-S1 “Supplement 1 to EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration”; 1997.
- [13] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración; MINER-CEM; Ed. 1; 1997.
- [14] “Propagación de incertidumbres en ecuaciones de interpolación”. D. del Campo, C. García, V. Climenti. Actas del III Congreso Español de Metrología (Zaragoza 2005).

8. ANEXOS

ANEXO I: Preparación del baño de hielo

ANEXO II: Cálculo de incertidumbres

ANEXO III: Ejemplo de cálculo de incertidumbres



ANEXO I PREPARACIÓN DEL BAÑO DE HIELO

El baño de hielo 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 adecuada. Este deberá lavarse repetidas veces con agua destilada y no utilizarse para otros líquidos.

El hielo se preparará con agua destilada y a ser posible 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, para lo que puede utilizarse una cuchara de plástico o de acero inoxidable. Posteriormente se añadirá la mínima cantidad de agua destilada suficiente para que el hielo adquiera un aspecto traslúcido. A continuación se agitará el baño del hielo con objeto de uniformizarlo, usando una varilla de vidrio o una cuchara de acero inoxidable. Idealmente, debería haber en el vaso tanto hielo como fuera posible, con los espacios intermedios entre los gránulos de hielo llenos de agua destilada y el agua destilada debería estar saturada con aire.

Debido a que el hielo flota en el agua, se producirá una acumulación de agua en el fondo del dewar. Para evitarlo, debe retirarse esta y añadir hielo para mantener la uniformidad, procurando siempre no contaminar el baño.

Antes de utilizar el baño de hielo es conveniente esperar de 15 a 30 minutos para que toda la mezcla alcance una temperatura constante.

Se recomienda la comprobación periódica del baño de hielo con un termómetro de resistencia de platino, lo que suministraría información sobre ambos instrumentos, estabilidad del termómetro de resistencia de platino y que el procedimiento de realización del baño de hielo está bajo control.



ANEXO II CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

Para calcular la incertidumbre de determinación de la temperatura de la junta de medida, se aplica la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación (5) según lo indicado en las referencias [6] y [11], obteniéndose:

$$\begin{aligned}
 u^2(t_x) = & \frac{1}{4} \left[u^2(t_1) + u^2(\delta t_{c1}) + u^2(\delta t_{d1}) + \sum_i u^2(\delta t_{mi1}) + u^2(t_2) + u^2(\delta t_{c2}) + \right. \\
 & \left. + u^2(\delta t_{d2}) + \sum_i u^2(\delta t_{mi2}) \right] + u^2(\delta t_e) + u^2(\delta t_u) + \\
 & + \frac{1}{2} \left[r(t_1, t_2) \cdot u(t_1) \cdot u(t_2) + r(\delta t_{c1}, \delta t_{c2}) \cdot u(\delta t_{c1}) \cdot u(\delta t_{c2}) \right. \\
 & \left. + \sum_i r(\delta t_{mi1}, \delta t_{mi2}) \cdot u(\delta t_{mi1}) \cdot u(\delta t_{mi2}) \right]
 \end{aligned} \tag{9}$$

En la ecuación (9) se han incluido los términos de correlación que pudieran ser distintos de cero: si las lecturas de los patrones (t_1 y t_2) se realizan con el mismo equipo de lectura, si sus calibraciones se hicieron con equipos o procedimientos similares (δt_{c1} y δt_{c2}) o en general que exista alguna magnitud de influencia correlacionada en ambos patrones. El resto de variables se pueden considerar independientes. Lo normal es que no existan correlaciones, es decir, que $r(t_1, t_2) = r(\delta t_{c1}, \delta t_{c2}) = r(\delta t_{mi1}, \delta t_{mi2}) = 0$, con lo que la expresión (9) para $u^2(t_x)$ queda como en (6).

Un caso particular sería la correlación total (de incertidumbre más alta o cota superior a la incertidumbre), cuando todos los coeficientes de correlación toman el valor 1. En este caso la ecuación (9) quedaría:

$$\begin{aligned}
 u^2(t_x) = & \frac{1}{4} \left[(u(t_1) + u(t_2))^2 + (u(\delta t_{c1}) + u(\delta t_{c2}))^2 + \sum_i (u(\delta t_{mi1}) + u(\delta t_{mi2}))^2 + (10) \right. \\
 & \left. + u^2(\delta t_{d1}) + u^2(\delta t_{d2}) \right] + u^2(\delta t_e) + u^2(\delta t_u)
 \end{aligned}$$

Para calcular la incertidumbre total en fuerza electromotriz del termopar, se debe aplicar a (7) la ley de propagación de incertidumbres. Ya que Δt se



define como la desviación de la temperatura del punto de calibración elegido t con respecto a la temperatura real del horno t_x , podremos escribir:

$$E(t_x) \cong E_x + \delta E_c + \delta E_d + \delta E_0 + \delta E_i + \delta E_h + \sum_i \delta E_{mi} + c_0 \cdot \delta t_f + c_t \cdot (t - t_x) \quad (11)$$

Como t es una constante cuyo valor es el punto de calibración elegido, tendremos que $u(t) = 0$, con lo que si aplicamos la ley de propagación a (11) quedará la expresión (8) suponiendo las magnitudes independientes.

Las magnitudes E_x , δE_c , δE_d , δE_0 , δE_i , δE_h y las posibles δE_{mi} son, en general independientes entre sí. Las posibles correlaciones se darán entre estas variables y las que aparecen en t_x a través de la ecuación (5). Esto sucederá si se van a utilizar también como patrones termopares y se utilice el mismo sistema de lectura, es decir el mismo voltímetro, el mismo conmutador, etc. En este caso la correlación sería positiva (todos los coeficientes de correlación serían mayores o iguales a 1) y como el coeficiente de sensibilidad de t_x es negativo (ver tabla 2) las contribuciones de las correlaciones serían negativas. Por tanto, y sin peligro de minorar la incertidumbre, podemos quedarnos con la ecuación (8) como expresión del cálculo de incertidumbres del termopar en calibración.



ANEXO III EJEMPLO DE CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

El ejemplo que aparece descrito a continuación, es la calibración por comparación a dos termopares de tipo S, de un termopar tipo N a 962 °C., en un horno horizontal.

Datos para el cálculo de incertidumbre

El sistema de calibración utilizado consta de:

- 1) Dos termopares tipo S conectados a un conmutador que permite la inversión de la polaridad de los termopares y éste a un voltímetro. Sus coeficientes de sensibilidad a 0 °C y a 962 °C son respectivamente (ver[4]):

$$c_0 = 5,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

$$c_t = 11,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

- 2) Un voltímetro de 4½ dígitos, que en su rango de 10 mV tiene una resolución de 1 μV para cada indicación. El voltímetro fue calibrado en ambas polaridades, su certificado de calibración, para lecturas por debajo de 50 mV, da una incertidumbre expandida 2,0 μV para un factor de cobertura $k = 2$. De su histórico, se estima una deriva máxima entre calibraciones de $\pm 0,5 \mu\text{V}$.
- 3) Un conmutador usado para invertir la polaridad de los termopares patrón. Las fuerzas electromotrices residuales producidas tanto en los terminales del voltímetro donde se conecta el termopar y en el conmutador, se han estimado ambas como nulas dentro de unos límites de $\pm 1 \mu\text{V}$.
- 4) Un dewar donde se realiza un baño de hielo para sumergir la junta fría de los termopares, tanto los patrones como la del termopar en calibración. se estima un error máximo en la realización del baño de hielo de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$



- 5) La incertidumbre expandida de calibración de los termopares es de 1 °C para un factor de cobertura $k = 2$.
- 6) Del histórico de las calibraciones de los termopares, se cuantifica la deriva máxima como $\pm 1 \mu\text{V}$ para los dos.
- 7) Horno previamente caracterizado, con una estabilidad y uniformidad del orden de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ para 962 °C.
- 8) El termopar que se va a calibrar es un termopar tipo N, sin cables de extensión ni compensación, con su junta fría sumergida en un baño de hielo. La fuerza electromotriz generada por el termopar es leída por el mismo voltímetro digital de 4½ dígitos a través del mismo conmutador. También se utiliza el mismo dewar para mantener la junta fría. Sus coeficientes de sensibilidad a 0 °C y a 962 °C son respectivamente (ver [4]):

$$c_0 = 25,9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

$$c_t = 38,8 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

- 9) La prueba de homogeneidad se realizó en un baño de aceite a 230 °C obteniéndose una diferencia máxima entre las lecturas de la porción de termopar estudiado de 15 μV . Como la calibración es a 962 °C , este valor equivaldría a 17 μV , teniendo en cuenta los coeficientes de sensibilidad del termopar.

Incertidumbre en la temperatura de la junta de medida t_x

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

$u(t_1)$, $u(t_2)$: Incertidumbres de lectura del primer y segundo patrón. Del punto 2) anterior $R_1 = R_2 = 1 \mu\text{V}$, utilizando el coeficiente de sensibilidad a 962 °C para obtener el resultado en temperatura:



$$u(t_1) = u(t_2) = \frac{1 \mu\text{V}}{(11,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot \sqrt{12}} = 0,025 \text{ }^\circ\text{C}$$

$u(\delta t_{c1})$ y $u(\delta t_{c2})$: Incertidumbres de calibración de los patrones. Del punto 3) anterior $U_1 = U_2 = 1 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$u(\delta t_{c1}) = u(\delta t_{c2}) = 1 \text{ }^\circ\text{C} / 2 = 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$u(\delta t_{d1})$ y $u(\delta t_{d2})$: Incertidumbre por deriva de los patrones. del punto 4) anterior: $d_1 = d_2 = 1 \mu\text{V}$, utilizando el coeficiente de sensibilidad a $962 \text{ }^\circ\text{C}$ para obtener el resultado en temperatura:

$$u(\delta t_{d1}) = u(\delta t_{d2}) = \frac{1 \mu\text{V}}{(11,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot \sqrt{3}} = 0,051 \text{ }^\circ\text{C}$$

$\sum_i u^2(\delta t_{mi1})$ y $\sum_i u^2(\delta t_{mi2})$: Incertidumbres debidas a magnitudes de influencia adicionales sobre los patrones. En este caso, por ser los patrones termopares, se deben considerar como magnitudes de influencia:

- Calibración del voltímetro, del punto 2) anterior $U_v = 2,0 \mu\text{V}$ y utilizando el coeficiente de sensibilidad a $962 \text{ }^\circ\text{C}$ para obtener el resultado en temperatura:

$$u(\delta t_{m11}) = u(\delta t_{m12}) = \frac{1 \mu\text{V}}{(11,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot 2} = 0,044 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Deriva del voltímetro del punto 2) anterior $d_v = 0,5 \mu\text{V}$ y utilizando el coeficiente de sensibilidad a $962 \text{ }^\circ\text{C}$ para obtener el resultado en temperatura:

$$u(\delta t_{m21}) = u(\delta t_{m22}) = \frac{0,5 \mu\text{V}}{(11,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot \sqrt{3}} = 0,025 \text{ }^\circ\text{C}$$



- Posibles fuerzas electromotrices residuales en los terminales de conexión de los termopares, del punto 2) anterior $v_f = 1 \mu\text{V}$ y utilizando el coeficiente de sensibilidad a $962 \text{ }^\circ\text{C}$ para obtener el resultado en temperatura:

$$u(\delta t_{m31}) = u(\delta t_{m32}) = \frac{1 \mu\text{V}}{(11,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot \sqrt{3}} = 0,051 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Posibles fuerzas electromotrices residuales en el conmutador utilizado para las inversiones de polaridad, del punto 2) anterior $v_c = 1 \text{ C}$ y utilizando el coeficiente de sensibilidad a $962 \text{ }^\circ\text{C}$ para obtener el resultado en temperatura:

$$u(\delta t_{m41}) = u(\delta t_{m42}) = \frac{1 \mu\text{V}}{(11,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot \sqrt{3}} = 0,051 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Variaciones de temperatura en la junta fría del termopar. del punto 4) anterior $h = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$u(\delta t_{m51}) = u(\delta t_{m52}) = 0,1 \text{ }^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0,058 \text{ }^\circ\text{C}$$

$u(\delta t_e)$: Incertidumbre del medio de calibración debida a su falta de estabilidad. Del punto 5) anterior, $e_b = 1 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$u(\delta t_e) = 1 \text{ }^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0,577 \text{ }^\circ\text{C}$$

$u(\delta t_u)$: Incertidumbre del medio de calibración debida a su falta de uniformidad. Del punto 5) anterior, $u_b = 1 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$u(\delta t_u) = 1 \text{ }^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0,577 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con estos datos podemos hacer la siguiente tabla resumen:



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

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coefficiente de Sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$
t_1	$(t_{11} + t_{12})/2$	0,025 °C	1/2	0,013 °C
t_2	t_2	0,025 °C	1/2	0,013 °C
δt_{c1}	0	0,500 °C	1/2	0,250 °C
δt_{c2}	0	0,500 °C	1/2	0,250 °C
δt_{d1}	0	0,051 °C	1/2	0,026 °C
δt_{d2}	0	0,051 °C	1/2	0,026 °C
δt_{m11}	0	0,044 °C	1/2	0,022 °C
δt_{m21}	0	0,025 °C	1/2	0,013 °C
δt_{m31}	0	0,051 °C	1/2	0,026 °C
δt_{m41}	0	0,051 °C	1/2	0,026 °C
δt_{m51}	0	0,058 °C	1/2	0,029 °C
δt_{m12}	0	0,044 °C	1/2	0,022 °C
δt_{m22}	0	0,025 °C	1/2	0,013 °C
δt_{m32}	0	0,051 °C	1/2	0,026 °C
δt_{m42}	0	0,051 °C	1/2	0,026 °C
δt_{m52}	0	0,058 °C	1/2	0,029 °C
δt_e	0	0,577 °C	1	0,577 °C
δt_u	0	0,577 °C	1	0,577 °C
t_x	$(t_1 + t_2)/2$			$u(t_x) = 0,89$ °C



Incertidumbre del termopar en calibración

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

$u(E_x)$: Incertidumbre de lectura del termopar. Del punto 2) anterior $R_v = 1 \mu V$:

$$u(E_x) = 1 \mu V / \sqrt{12} = 0,29 \mu V$$

$u(\delta E_c)$: Incertidumbre debida a la calibración del voltímetro, del punto 2) anterior $U_v = 2,0 \mu V$

$$u(\delta E_c) = 2,0 \mu V / 2 = 1 \mu V$$

$u(\delta E_d)$: Incertidumbre por deriva del voltímetro del punto 2) anterior $d_v = 0,5 \mu V$

$$u(\delta E_d) = 0,5 \mu V / \sqrt{3} = 0,29 \mu V$$

$u(\delta E_0)$: Incertidumbre debida a posibles fuerzas electromotrices residuales en los terminales de conexión de los termopares del punto 2) anterior $v_r = 1 \mu V$

$$u(\delta E_0) = 1 \mu V / \sqrt{3} = 0,58 \mu V$$

$u(\delta E_i)$: Incertidumbre debida a posibles fuerzas electromotrices residuales en el conmutador utilizado para las inversiones de polaridad, del punto 2) anterior $v_c = 1 \mu V$:

$$u(\delta E_i) = 1 \mu V / \sqrt{3} = 0,58 \mu V$$

$u(\delta E_h)$: Incertidumbre debida a la falta de homogeneidad del termopar, del punto 2) anterior $hom = 17 \mu V$:



$$u(\delta E_h) = 17 \mu\text{V} / \sqrt{3} = 9,81 \mu\text{V}$$

$u(\delta t_{fr})$: Incertidumbre debida a las posibles variaciones de temperatura en la junta fría del termopar del punto 4) anterior $h = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$u(\delta t_{fr}) = 0,1 \text{ }^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0,058 \text{ }^\circ\text{C}$$

$u(t_x)$: Incertidumbre de la temperatura de la junta de medida. Calculada en la tabla 3:

$$u(t_x) = 0,89 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con estos datos, la tabla resumen final quedará:

Tabla 4. Resumen del cálculo de $u(E(t_x))$

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coefficiente de Sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$
E_x	$(E_{x1} + E_{x2})/2$	0,29 μV	1	0,29 μV
δE_c	0	1,00 μV	1	1,00 μV
δE_d	0	0,29 μV	1	0,29 μV
δE_0	0	0,58 μV	1	0,58 μV
δE_i	0	0,58 μV	1	0,58 μV
δE_h	0	9,81 μV	1	9,81 μV
δt_{fr}	0	0,058 $^\circ\text{C}$	25,9 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	1,50 μV
Δt	0	0,89 $^\circ\text{C}$	-38,8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	34,5 μV
$E(t_x)$	E_x			$u(E(t_x)) = 35,9 \mu\text{V}$



La incertidumbre expandida:

$$U = k \cdot u(E(t_x)) = 2 \cdot 35,9 \mu\text{V} = 71,8 \mu\text{V}$$

Si se quiere expresar en temperatura:

$$U = 71,8 \mu\text{V} / c_t = \frac{71,8 \mu\text{V}}{c_t} = \frac{71,8 \mu\text{V}}{38,8 \mu\text{V}/^\circ\text{C}} = 1,9 \text{ }^\circ\text{C}$$



MINISTERIO
DE INDUSTRIA TURISMO
Y COMERCIO



NIPO: 706-08-007-9

