

Cálculo de incertidumbres en un sistema de calibración de termopares

Nota de aplicación

Serie de folletos informativos sobre las aplicaciones de los termopares

Este es el tercer folleto informativo de los cuatro que abordan las aplicaciones de los termopares:

1. Nociones básicas de los termopares
2. Cómo elegir un equipo de calibración de termopares
3. Cálculo de incertidumbres en un sistema de calibración de termopares
4. Cómo calibrar un termopar



Escáner de temperatura de precisión Super-DAQ 1586A con multiplexor DAQ-STAQ

Muestra de informe de incertidumbres

Varias incertidumbres de calibración deben evaluarse para determinar la incertidumbre total de un sistema de calibración de termopares. Esta sección presenta un ejemplo de cómo preparar un informe de incertidumbres para un sistema que se conforma del siguiente equipo, al momento de calibrar un termopar a 1000 °C:

- Sonda de referencia: Termopar 5650 tipo S sin unión de referencia
- Indicador de temperatura: Escáner de temperatura de precisión Super-DAQ 1586A con multiplexor DAQ-STAQ
- Fuente de temperatura: Horno de calibración del termopar 9118A
- Unidad bajo prueba (UUT): Termopar tipo S sin unión de referencia

La Figura 1 presenta la muestra de un informe de incertidumbres. Ofrece un método para agregar algunos de los factores colaboradores más importantes a la incertidumbre del sistema. Cada incertidumbre contiene un código. Se provee, además, el análisis correspondiente. Este análisis es integral, pero está simplificado para el público con conocimientos técnicos generales, de manera que, para conocer más detalles, es importante la consulta con el INM (Instituto Nacional de Metrología) o con el organismo de homologación (en el caso de laboratorios de calibración acreditados) de su país.

El siguiente análisis de incertidumbres enumera cada una de ellas, tanto en su forma estándar como expandida. La diferencia entre ambas es que la incertidumbre estándar se multiplica por un factor de cobertura, el cual se indica normalmente bajo la forma de valor de k , para convertirse en una incertidumbre expandida. O bien, la incertidumbre se divide por el divisor de conversión para calcular su valor de incertidumbre estándar ($k=1$). El valor de k corresponde a un intervalo de confianza.



Horno de calibración del termopar 9118A

Figura 1. Evaluación de la incertidumbre del sistema de calibración del termopar a 1000 °C

Incertidumbres estándares del tipo B	Código	Incertidumbre estándar (en °C)	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida (en °C)
Ruido de medición/estabilidad de referencia (n≥30)	A1	0,01	2	0,02
Ruido de medición/estabilidad de la UUT (n≥30)	A2	0,01	2	0,02
Estadística estándar de verificación	A3	0,01	2	0,02
Precisión de la lectura de 1586A (para la sonda de referencia)	B1	0,19	2	0,38
Precisión de la unión de referencia (para la sonda de referencia)	B2	0,01	√3	0,01
Precisión de la lectura de 1586A (para la UUT tipo S)	B3	0,28	2	0,56
Precisión de la unión de referencia (para la UUT tipo S)	B4	0,07	2	0,13
Incertidumbre de la calibración de la sonda de referencia	B5	0,13	2	0,26
Límite de desviación a largo plazo de la sonda de referencia	B6	0,06	√3	0,10
Uniformidad axial del horno 9118A	B7	0,10	2	0,20
Uniformidad radial del horno 9118A	B8	0,12	2	0,23
Incertidumbre estándar total (k=1)				0,52
Incertidumbre expandida total (k=2)				1,04

Nota: Cada incertidumbre se redondea a dos lugares decimales después de aplicarse los cálculos.

Por ejemplo, en la mayoría de los casos, $k = 2$ corresponde a un intervalo de confianza de 2 sigma o del 95 %. En la sección “Combinación de incertidumbres” de este documento se explica más sobre este tema.

A1 y A2. Ruido de las mediciones

Ruido de las mediciones es la incertidumbre provocada por el ruido o la inestabilidad de las lecturas de mediciones. Cada punto de medición se basa en un promedio o una media de 30 o más lecturas o muestras. La incertidumbre del ruido o la inestabilidad de 30 lecturas se calcula con la división de la desviación estándar de 30 muestras por la raíz cuadrada de n ($n=30$). A menudo, se denomina este cálculo como Error estándar de la media.

Por lo general, el ruido de una medición abarca tanto el ruido de la lectura como la inestabilidad de la fuente de calor. Es probable que la especificación del fabricante para la estabilidad de la fuente de calor sea similar, pero es mejor tomar las mediciones y monitorear la desviación estándar real para asegurarse de que se cumplan los requisitos del análisis de incertidumbres.

Tanto la desviación estándar de la medición como el correspondiente Error estándar de la media se pueden ingresar en el análisis de incertidumbres cada vez que se realiza una medición, o se puede asignar el límite del ruido de la medición a cada uno de los puntos de mediciones. En el caso de un límite, las mediciones se monitorean para verificar que la estabilidad

(la desviación estándar) cumpla con el límite indicado en el análisis de incertidumbres. En este ejemplo, usaremos un límite de desviación estándar.

La siguiente ecuación demuestra cómo se efectúa este cálculo:

$$U_{A1} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{\pm 0,050 \text{ °C}}{\sqrt{30}} = \pm 0,009 \text{ °C}$$

- U_{A1} : incertidumbre por el ruido de la medición (en °C)
- s : desviación estándar de la medición (en °C)
- n : cantidad de muestras (30 o más)

Consejo: Si las lecturas se presentan en unidades de voltaje (mV), divida U_{A1} por la sensibilidad del termopar para convertir a temperatura (en °C).

A3. Estadística estándar de verificación

La estadística estándar de verificación es una indicación de la estabilidad del proceso de calibración. Una buena idea es medir la sonda estándar de verificación junto con las UUT. Los resultados de la medición estándar de verificación se trazan en un diagrama de control y se analizan para asegurarse de que no ocurran errores inesperados.

La verificación estándar debe ser similar a la UUT, de manera tal que los cambios en el proceso afecten a ambas de la misma forma. Es probable que la verificación estándar que se realice en metales no nobles no sea lo suficientemente repetitiva para indicar la estabilidad a largo plazo

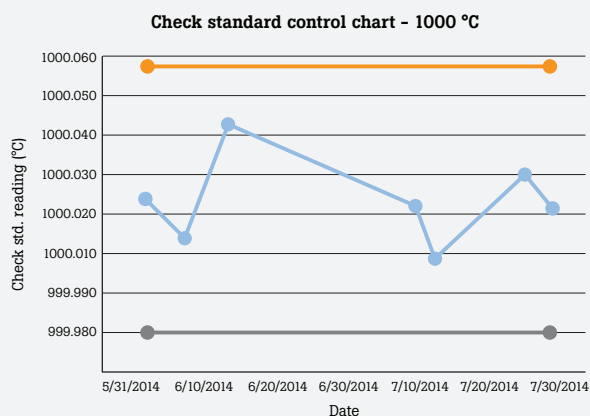
del proceso de calibración. Se recomienda el uso de termopares de alta calidad, tipo S o R, como estándares de verificación.

El valor que se ingresa al análisis de incertidumbres es la desviación estándar de las mediciones estándares de verificación realizadas en el tiempo. Por ejemplo, la tabla de la Figura 2 muestra las lecturas que se toman de distintas ejecuciones en un proceso de calibración. La desviación estándar de las siete lecturas estándares de verificación se calcula en 0,011 °C. Esto se puede ingresar en el análisis de incertidumbres, pero es mejor continuar agregando lecturas y actualizar el componente de la estadística estándar de verificación hasta que el conteo llegue a 30 o más. Este número se usa también para establecer las líneas de control del diagrama de control estándar de verificación. El valor de desviación estándar (σ) se multiplica por dos o tres para establecer las líneas de control 2- σ o 3- σ , según cuáles sean sus requisitos. La muestra del diagrama de control de la Figura 3 tiene líneas de control 3- σ .

Figura 2: Muestra de las lecturas de control

	Lectura estándar de verificación (°C)
Ejecución 1	1000,025
Ejecución 2	1000,014
Ejecución 3	1000,042
Ejecución 4	1000,022
Ejecución 5	1000,008
Ejecución 6	1000,031
Ejecución 7	1000,021
	Desviación estándar = ± 0,011 °C

Figura 3: Muestra del diagrama de control



B1 y B3. Cálculo de precisión de la lectura de 1586A (para la sonda de referencia y la UUT)

La precisión de la lectura corresponde tanto a la sonda de referencia como a la UUT. Los siguientes cálculos demuestran cómo convertir las especificaciones típicas del termopar a los valores que pueden ingresarse al análisis de incertidumbres.

Dado que la mayoría de las lecturas del termopar se especifican en términos de precisión del voltaje, la siguiente ecuación convierte la incertidumbre de la tensión en temperatura:

$$U_{T(°C)} = \frac{U_V}{S_{MJ}}$$

- $U_{T(°C)}$: incertidumbre equivalente de la temperatura
- U_V : incertidumbre de la medición del voltaje
- S_{MJ} : sensibilidad del termopar a la temperatura de unión de la medición

Consejo: Calcule S_{MJ} con la tabla de voltajes del termopar. Es el cambio en el voltaje (mV) por el cambio de 1 °C ($\Delta V/\Delta T$).

La precisión de la lectura de 1586A para la sonda de referencia es:

- La especificación de la precisión de voltaje de 1586A es de 0,004 % + 4 μ V (porcentaje de lectura, k=2). Nota: agregue 2 μ V adicionales para la UUT que se mide en uno de los canales del escáner DAQ-STAQ.
- El termopar es de tipo S
- La temperatura es de 1000 °C
- El voltaje del termopar tipo S a 1000 °C es de 9,6 mV
- La precisión especificada del voltaje en este rango es de ± 0,0022 mV (k=1).
Vea la siguiente ecuación:

$$U_{V(k=1)} = \frac{0,004 \times 100 + 0,004mV}{2} = \pm 0,0022mV$$

- El termopar tipo S tiene una sensibilidad de ± 0,0115 mV/°C a 1000 °C
- La precisión de la lectura se convierte en unidades de temperatura con lo siguiente:

$$U_{T(°C)} = \frac{\pm 0,0022 mV}{\pm 0,0115 mV/°C} = \pm 0,191 °C$$

B2. Precisión de la unión de referencia (para la sonda de referencia)

La unión de referencia puede ser tanto interna como externa. En este ejemplo, se usa la unión de referencia externa. La incertidumbre de la unión de referencia externa depende del tipo de equipo que se utilice. La mayoría de los laboratorios usan una fuente de temperatura de 0 °C, como el baño

de hielo o un pozo seco, como en el caso del horno seco de punto cero 9101 de Fluke. Las incertidumbres que se relacionan con un baño de hielo pueden ser de pocos mK, pero esto requiere de una técnica minuciosa y es probable que sea un proceso complicado. El laboratorio de Fluke para la calibración de temperatura principal emplea un enfoque simplificado mediante la producción de un baño de hielo con hielo raspado y agua corriente, a la vez que se monitorea la temperatura con una sonda y un indicador de temperatura con termistor. La incertidumbre de este enfoque se basa en el rango de temperatura aceptable del baño de hielo, que es de $0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,025\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para generar un baño de hielo de incertidumbre baja, consulte el documento ASTM E563-11, "Práctica estándar para la preparación y el uso de baños de hielo como temperatura de referencia".

Se emplea la siguiente ecuación para calcular la incertidumbre efectiva de la temperatura de la unión de referencia. Cuando se realiza la medición de un termopar, ambas uniones contribuyen a la medición. Por lo tanto, la incertidumbre de la unión de referencia se multiplica por la razón de los valores de sensibilidad del termopar (Seebeck) a la temperatura de la unión de referencia y la unión de medición, para calcular la incertidumbre efectiva de la unión de referencia.

$$U_{RJ_Effective} = \frac{U_{RJ} \times S_{RJ}}{S_{MJ}}$$

- $U_{RJ_Effective}$: incertidumbre efectiva de la temperatura de la unión de referencia
- U_{RJ} : incertidumbre de la unión de referencia
- S_{MJ} : sensibilidad del termopar a la temperatura de unión de la medición
- S_{RJ} : sensibilidad del termopar a la temperatura de la unión de referencia

En este ejemplo, la incertidumbre de la temperatura de la unión de referencia sería de:

- El termopar es de tipo S
- La temperatura es de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- La precisión de la unión de referencia es de $0,025\text{ }^{\circ}\text{C}$
- El termopar tiene una sensibilidad de $0,0115\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- El termopar tiene una sensibilidad de $0,006\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
- La incertidumbre equivalente de la temperatura es de $0,013\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$U_{RJ_Effective} = \frac{0,025\text{ }^{\circ}\text{C} \times 0,006\text{ mV}/^{\circ}\text{C}}{0,0115\text{ mV}/^{\circ}\text{C}} = 0,013\text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Lo siguiente convierte la incertidumbre en una incertidumbre estándar:

$$U_{B2\ (k=1)} = \frac{0,013\text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,007\text{ }^{\circ}\text{C}$$

B4. Precisión de la unión de referencia (para la UUT)

En este ejemplo, la incertidumbre correspondiente para la unión de referencia interna se calcula con la siguiente ecuación.

$$U_{RJ_Effective} = \frac{U_{RJ} \times S_{RJ}}{S_{MJ}}$$

- $U_{RJ_Effective}$: incertidumbre efectiva de la temperatura de la unión de referencia
- U_{RJ} : incertidumbre de la unión de referencia
- S_{MJ} : sensibilidad del termopar a la temperatura de unión de la medición
- S_{RJ} : sensibilidad del termopar a la temperatura de la unión de referencia

En este ejemplo, la incertidumbre de la temperatura de la unión de referencia interna sería de:

- El termopar es de tipo S
- La temperatura es de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- La precisión de la unión de referencia interna de 1586A es de $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k=2$) o de $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k=1$)
- El termopar tiene una sensibilidad de $0,0115\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- El termopar tiene una sensibilidad de $0,006\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
- La incertidumbre de la temperatura equivalente se calcula con lo siguiente:

$$U_{RJ_Effective} = \frac{0,25\text{ }^{\circ}\text{C} \times 0,006\text{ mV}/^{\circ}\text{C}}{0,0115\text{ mV}/^{\circ}\text{C}} = 0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Lo siguiente convierte la incertidumbre en una incertidumbre estándar:

$$U_{B4\ (k=1)} = \frac{0,13\text{ }^{\circ}\text{C}}{2} = 0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$$

B5. Incertidumbre de la calibración de la sonda de referencia

Esta incertidumbre se transfiere de manera directa desde el certificado de calibración de la sonda de referencia. Si la incertidumbre de un punto de temperatura en particular no se indica en el certificado, deberá ser calculada. Consulte con el proveedor del dispositivo de calibración para conocer la manera de efectuar este cálculo. Una aproximación segura, pero por lo general sobrestimada, es elegir la incertidumbre más alta de los dos puntos cercanos de temperatura que se informen.

Si la sonda de referencia es un termopar, asegúrese de justificar la falta de homogeneidad. Si la incertidumbre de calibración no se aplica a la falta de homogeneidad, será importante incluir un componente adicional de incertidumbre que dé cuenta de ella. Consulte con un laboratorio reconocido de calibración o con el INM para obtener más información sobre el tema.

B6. Desviación a largo plazo de la sonda de referencia

La desviación a largo plazo de la sonda de referencia puede ser difícil de determinar. Los fabricantes pueden especificar la desviación a largo plazo con el valor basado en una cierta cantidad de horas de uso a máxima temperatura. Esto solo abarca los materiales caducos y no cubre otras fuentes de desviación, como la manipulación, el impacto mecánico y el ciclo de la temperatura. Es apta para comenzar con la especificación de la desviación a largo plazo del fabricante, pero es importante monitorear la sonda para la desviación.

- La desviación a largo plazo permitida es de $\pm 0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (divida por la raíz cuadrada de 3 para convertir a $\pm 0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$, $k=1$)

B7 y B8. Uniformidad axial y radial del horno

Los principales factores que colaboran con el análisis de incertidumbres del horno son la estabilidad y la uniformidad. En el ruido de las mediciones A1 y A2 se da cuenta de la estabilidad, ya que esta incertidumbre describe el ruido general del sistema de calibración, incluida la estabilidad del horno. Por su parte, la uniformidad se especifica en dos partes: radial (de orificio a orificio) y axial (el gradiente en distintas profundidades dentro del bloque de equilibrado). Ambas son especificadas por el fabricante y se mencionan en la Figura 4. Usted puede confiar en los números expresados para realizar un informe de incertidumbres preliminar, pero para una buena práctica se deben verificar las cifras. En algunos casos, la incertidumbre puede reducirse, dado que la unidad funciona mejor que lo que especifica el fabricante. Para estimar los valores de uniformidad a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, emplee los valores que se indican para $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e interpóleos de manera lineal.

- La uniformidad especificada por el fabricante a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ es de: Axial: $\pm 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k=2$) o $\pm 0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k=1$); radial: $0,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k=2$) o $\pm 0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k=1$)

Figura 4: Especificaciones del fabricante para 9118A

Uniformidad radial		
Temperatura	9118A (14 mm (0,6 pulg.) desde el punto central geométrico)	9118A-ITB de orificio a orificio
300 °C	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
700 °C	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$
1200 °C	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Uniformidad axial		
Temperatura	9118A ($\pm 30\text{ mm}$ (1,2 pulg.) longitud axial desde el punto central geométrico)	9118A-ITB (a 60 mm (2,4 pulg.) de la inmersión total)
Rango completo	$\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Estabilidad de la temperatura		
Especificación	9118A	9118A-ITB
Estabilidad	$\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tiempo de estabilización	2 horas, rango completo	3 horas a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ o debajo de este valor; 2 horas por encima de los $700\text{ }^{\circ}\text{C}$

Nota: Estabilidad de la temperatura medida en 2 sigma durante 30 minutos

Combinación de incertidumbres

Para combinar todos los componentes de las incertidumbres, estas deben convertirse, en primer lugar, en incertidumbres estándares. Para ello, es importante entender el tipo (la distribución) de cada incertidumbre para poder efectuar el cálculo apropiado de conversión. En este análisis de incertidumbres, hay dos tipos en la tabla: distribución normal y rectangular.

La incertidumbre de distribución normal es aquella que tiende a contener la mayoría de los resultados en el centro, de manera que la distribución toma la forma de una curva de campana. Por su parte, la distribución rectangular tiene las mismas probabilidades de que el resultado resida en cualquier lugar dentro del límite, por lo que la distribución tiene la forma de un rectángulo. Muy a menudo, se les asigna a los límites de proceso, como la desviación permitida a largo plazo, una distribución rectangular. Si no se conoce el tipo de distribución, lo más seguro es asumir que se trata de una distribución rectangular.

Para convertir una distribución normal expandida ($k=2$ o $k=3$) en la forma de incertidumbre estándar ($k=1$), simplemente divida por el valor de k . Para convertir una incertidumbre rectangular en su forma estándar, divídala por la raíz cuadrada de 3. Para convertir otros tipos de distribuciones de incertidumbres, consulte la GUM (Guía para las mediciones de incertidumbres) o alguna otra fuente confiable de información y conozca la manera de calcular las incertidumbres.

Finalmente, para combinar las incertidumbres estándares y calcular la incertidumbre total, es fundamental saber si cada una de ellas es independiente o está correlacionada. Una incertidumbre independiente es aquella que no tiene nada en común con otras. Todas las incertidumbres de este tipo se pueden combinar o agregar juntas con el método de suma de raíces cuadradas (RSS, por sus siglas en inglés). A continuación, se muestra un ejemplo de RSS. Una incertidumbre correlacionada implica que

tiene algún tipo de correlación o relación con una o más incertidumbres. Estas se puede agregar juntas con una simple suma, que a la vez se adiciona con el método RSS a otras incertidumbres. A veces, se emplean otras técnicas más sofisticadas para calcular las correlaciones, pero no son necesarias para este análisis de incertidumbres.

En este análisis, las incertidumbres de precisión del indicador 1586A se correlacionan debido a que se emplea el mismo instrumento, tanto para la sonda de referencia como para la UUT. Por lo tanto, se agregan primero con una suma simple; luego, se combinan con otras con el método RSS. Después de calcular la incertidumbre estándar total, se multiplica por el factor de cobertura deseado. En este caso, 2 por $k=2$ (95 %). Así, se llega a la incertidumbre expandida total.

Suma de raíces cuadradas

$$U = \sqrt{B1^2 + B2^2 + B3^2 + B4^2 + B5^2 + B6^2...}$$

Fluke Calibration. Precisión, rendimiento, confianza.™

Electricidad	RF	Temperatura	Presión	Caudal	Software
--------------	----	-------------	---------	--------	----------

Fluke Calibration
PO Box 9090, Everett, WA 98206 U.S.A.

Fluke Europe B.V.
PO Box 1186, 5602 BD
Eindhoven, Países Bajos

Para más información, llame a:
En los EE. UU. (877) 355-3225 o Fax (425) 446-5116
En Europa/Medio Oriente/África +31 (0) 40 2675 200 o Fax +31 (0) 40 2675 222
En Canadá (800)-36-FLUKE o Fax (905) 890-6866
Desde otros países +1 (425) 446-5500 o Fax +1 (425) 446-5116
Página web: <http://www.flukecal.com>

©2015 Fluke Calibration.
Las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso.
Impreso en los EE. UU. 11/2015 6004551B_LAES

No se permite modificar este documento sin el permiso por escrito de Fluke Calibration.