

Cómo calibrar un termopar

Nota de aplicación

Serie de folletos informativos sobre las aplicaciones de los termopares

Este es el cuarto 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

Organización de la calibración de un termopar

Conexión al indicador

La conexión del termopar con el indicador depende del uso de la unión de referencia interna o externa. Por lo general, las uniones de referencia interna se usan en las aplicaciones de alto rendimiento y de precisión baja a media. La probabilidad de error es menor y el proceso es más simple. La limitación en la precisión se debe a la incertidumbre adicional (generalmente, de 0,05 °C a 0,25 °C) en el mismo circuito de compensación de la unión de referencia.

Conexión con la unión de referencia interna

Conecte el termopar de dos cables de manera directa con el indicador o mediante un cable de extensión. Tenga en cuenta la polaridad. No use cobre para la extensión, dado que esto ocasionará errores. Asegúrese de que todas las conexiones estén ajustadas y limpias. Si las conexiones están flojas o sucias, se producirán voltajes falsos y errores en la medición. El uso de interruptores y multiplexores también originará errores, ya que estos dispositivos se fabrican comúnmente en cobre. Se pueden usar interruptores fabricados en materiales para termopares, si se debe calibrar una gran cantidad de termopares del mismo tipo. No obstante, dichos interruptores contribuirán a la aparición de errores extremadamente difíciles de calificar. Para calibrar un gran número de termopares, se recomienda el empleo de un indicador multicanal o de la técnica de unión de referencia externa.

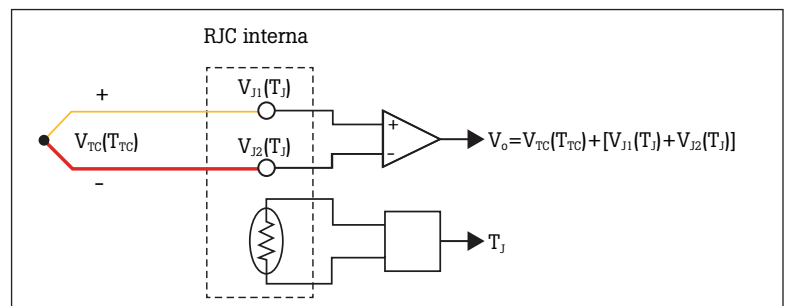


Figura 1. Conexión con la unión de referencia interna.

Conexión con la unión de referencia externa

Las uniones de referencia externa brindan la mayor precisión y se usan casi siempre para calibrar los termopares de metales nobles (tipos R y S). Generalmente, no son necesarias para los requisitos de precisión de los termopares de base metálica. Este tipo de uniones se debe usar cuando se necesita una gran precisión o cuando el indicador no cuenta con compensación de la unión de referencia interna (como el DMM común). La conexión de la unión de referencia externa está un poco más relacionada con una unidad bajo prueba (UUT) simple, pero se puede complicar más cuando se calibran varias UUT, y las incertidumbres deben mantenerse al mínimo.

El termopar se conecta con el indicador mediante alambres de cobre de alta calidad. Por consiguiente, las conexiones del termopar con el cobre se sumergen en un baño de hielo para formar la unión de referencia. Las conexiones deben ser físicamente secas y estar eléctricamente aisladas una de otra. Por lo general, los alambres se sueldan o se tuercen firmemente y cuentan con una protección de tubería termocontraíble. Los grupos de alambres se insertan en un tubo metálico de pared delgada o en uno de vidrio y extremo cerrado. A su vez, el tubo se introduce en el baño de hielo. La profundidad de la inmersión es importante y depende del diámetro del alambre. Normalmente, alcanza con seis a doce pulgadas. El cobre que conecta a los alambres se fija al indicador de manera directa o mediante un interruptor. Cada UUT requiere de una unión de referencia individual.

Algunas de ellas terminan en conectores de termopares y no se pueden conectar de forma conveniente, como se describe. En estos casos, las "sondas de unión de referencia" se pueden fabricar a partir del cobre y del alambre del termopar del tipo que se requiera. El extremo del termopar termina con los conectores que encajarán con los conectores de las UUT. Estas sondas deben ser calibradas si se requiere una alta precisión. De manera alternativa, se puede usar la compensación de la unión de referencia interna. A menudo, los indicadores que cuentan con este tipo de compensación llevan incorporados los conectores del termopar.

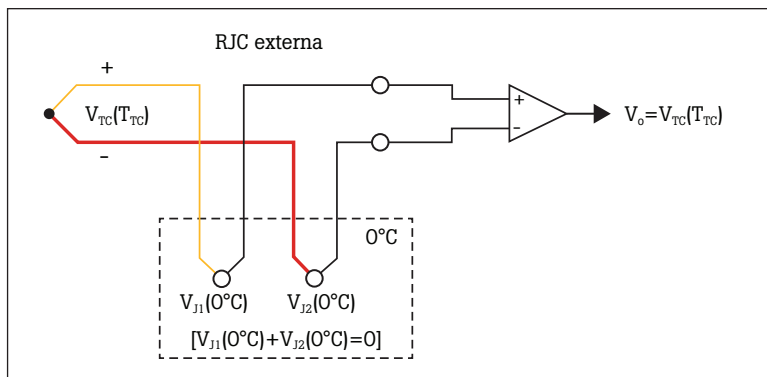


Figura 2. Conexión con la unión de referencia externa.

Colocación de la sonda

Todas las fuentes de temperatura tienen inestabilidades y gradientes. Estos generan errores o incertidumbres en la calibración. Las sondas deben colocarse lo más cerca posible una de otra, de manera que se minimicen los efectos mencionados. En las fuentes de temperatura de pozo seco, los puntos de inmersión de la sonda están fijos. Los baños y los hornos de tubo abierto ofrecen flexibilidad en la colocación de las sondas. Las sondas que serán calibradas deberán colocarse bajo un patrón radial. La sonda de referencia estará ubicada en el centro del círculo. Cuando se usa un horno de tubo, los termopares se envuelven alrededor de un termómetro de referencia unido con un cable o cinta de fibra de vidrio, y se insertan en un horno de tubo. Esta colocación garantiza una distancia igual desde la sonda de referencia a cada una de las UUT.

Los elementos de detección deben estar también en el mismo plano. Las uniones de los termopares, por lo general, se encuentran en la punta de la sonda. Se debe lograr la inmersión suficiente para que no se produzcan pérdidas en la varilla. Por lo general, se logra la inmersión suficiente cuando las sondas se sumergen a una profundidad igual a 15 veces su diámetro, más la longitud del elemento de detección. Por ejemplo, tenemos una sonda cuyo diámetro es de 0,25 pulgadas con un elemento de detección de 1,25 pulgadas de longitud. Dicha sonda debería sumergirse a un mínimo de 5 pulgadas ($[15 \times 0,25 \text{ pulg.}] + 1,25 \text{ pulg.} = 5 \text{ pulg.}$). Esta regla general suele aplicar correctamente para las sondas hechas de paredes delgadas y cuando se produce una buena transmisión del calor. Se requiere de mayor inmersión si la sonda está hecha de una pared más gruesa o cuando se produce una mala transmisión del calor (como en el pozo seco con orificios de tamaños inadecuados).

Recopilación de datos

Las normas y pautas de la industria exigen la calibración del termopar en todo el rango de temperatura en que se lo usa. La calibración puede llevar bastante tiempo, en especial si se deben calibrar varios termopares. En el proceso, se eleva gradualmente la fuente de temperatura hasta un valor de consigna y se registra la lectura del termopar cuando dicho valor está estable. En cada valor de consigna, se debe permitir el tiempo suficiente para que la fuente de temperatura logre estabilidad y uniformidad antes del registro. El proceso se repite en cada valor de consigna, en una serie que abarca el rango de temperatura de trabajo del termopar.

Calibración automatizada del termopar con Super-DAQ 1586A

El escáner Super-DAQ 1586A incluye una función de "calibración automatizada del sensor" que automatiza el proceso de calibración del termopar. Cuando el escáner Super-DAQ 1586A se conecta a un horno de calibración de termopares 9118A, controla y monitorea la temperatura del valor de consigna del 9118A, lee hasta 40 termopares y recopila automáticamente los datos cuando el horno está estable, dentro de los parámetros que define el usuario. Super-DAQ controla desde el valor de consigna de 9118A a las temperaturas de los valores programados restantes y recopila los datos de cada uno de ellos en el proceso. Una vez que se haya configurado e iniciado la prueba, el técnico puede retirarse a trabajar en otras actividades. Esta función única, disponible solo desde Fluke Calibration, mejora ampliamente la productividad del laboratorio y la precisión de la medición.

Para obtener más información, visite el Centro de información de 1586A en www.flukecal.com.

Dos opciones de calibración

Existen dos tipos de calibración del termopar: caracterización y prueba de tolerancia. La mayoría de los termopares no son lo suficientemente estables para la calibración de caracterización. Normalmente, se prueba la tolerancia de las sondas o los alambres de las sondas de los termopares, para comprobar su cumplimiento con las clasificaciones de error de la ASTM (Sociedad americana para pruebas y materiales). La prueba de tolerancia abarca la medición de la salida del voltaje en las distintas temperaturas y el cálculo del error a partir de las tablas estándares.

Prueba de tolerancia

Para la mayoría de las aplicaciones, se prueba la tolerancia de los termopares para verificar que se comporten como lo establece el modelo estándar, dentro de ciertos límites. La ASTM establece dos conjuntos de límites denominados "límites estándares de error" y "límites especiales de error". Los límites especiales de error emplean las tolerancias más ajustadas y se fijaron para abarcar el rendimiento perfeccionado de los alambres de mejor clasificación, que se usan en los termopares más costosos. Al calibrar un termopar acorde a las especificaciones de la ASTM, se determina que este cumple con el modelo estándar. En algunos casos, se calibran las sondas individuales de los termopares; en otros, los rollos enteros de cables deben obtener la certificación. El método es sencillo, no requiere de ajustes de datos ni de cálculos complejos.

Pasos para comprobar la tolerancia

1. Los valores de voltaje y temperatura de los termopares que se prueban se comparan con las mismas mediciones obtenidas de un termopar estándar de referencia. Por su parte, los valores de voltaje se pueden leer directamente desde un voltímetro digital que tenga la precisión adecuada, o desde otro indicador apropiado para la tarea.
2. Se advierte la diferencia en "°C" de cada termopar sometido a prueba con la temperatura del termopar estándar de referencia. La conversión se realiza con una tabla de voltajes frente a los valores correspondientes de temperatura (en °C) para el tipo específico del termopar. Las tablas aceptables deben contener los mismos datos y valores que se encuentran en NIST Monograph 175 (1993) o en ASTM E230-03 (2011).
3. Las tolerancias de los termopares, como las que se describen en el Apéndice A, "Tabla resumen de las tolerancias de los termopares" se usan para determinar si los termopares cumplen con las "tolerancias de límites especiales o estándares" con respecto a las mediciones que se obtienen del termopar de referencia.

Caracterización de los termopares

Cuando la prueba de tolerancia no suministra la información necesaria en cuanto a la respuesta del voltaje del termopar a una temperatura aplicada, la caracterización del rendimiento del termopar en todo su rango proporciona un análisis más completo. Normalmente, este proceso se reserva para las aplicaciones de alta precisión que se relacionan con los termopares de metales nobles. En la mayoría de los casos, los termopares de base metálica no son estables y no reproducen el comportamiento que se observa durante la caracterización.

La caracterización de un termopar incluye la determinación de la diferencia entre el voltaje medido y el estándar y la corrección de dicha diferencia mediante su ajuste con un polinomio de segundo orden. El ajuste de los datos es simple en teoría, pero puede resultar complicado en la práctica. En esencia, mediante este proceso se trata de resolver un conjunto de ecuaciones simultáneas que contienen los datos de calibración, para llegar a un conjunto de coeficientes únicos del termopar y la calibración. La “caracterización” aceptada se basa en los principios establecidos en NIST Special Publication 250-35, y se usa del mismo modo en Fluke Calibration para la recertificación de los termopares tipo S y R⁽¹⁾.

Pasos para la caracterización

1. Los termopares se colocan de manera secuencial en cuatro celdas de puntos fijos (PF). Consulte la figura 3 para conocer la información básica sobre las celdas de puntos fijos. Los voltajes de los termopares bajo prueba se miden en relación a las cuatro temperaturas de referencia de las celdas de PF. Mientras que la unión de medición del termopar se encuentra en la celda de PF, la unión de referencia se controla en un baño de agua a punto de congelación con un termistor estándar independiente. Nota: Para facilitar el ambiente requerido para la prueba de temperatura, se puede usar un horno y un termopar de referencia en lugar de las celdas de PF. Para ello, el horno debe ser configurado a varias temperaturas de referencia, de manera que se comparen los termopares bajo prueba ubicados radialmente con las lecturas medidas por el termopar estándar de referencia, colocado en el centro del horno.

2. Una vez que los termopares bajo prueba y la celda de PF llegaron al equilibrio térmico, se registra el voltaje del termopar. Se realiza lo mismo para las cuatro temperaturas de las celdas de PF. Cada valor de voltaje del termopar incluye un registro correspondiente de la temperatura del punto de congelación en un recipiente aislado, donde se coloca la unión de referencia del termopar.
3. Las mediciones de voltaje únicas que se obtienen del termopar bajo prueba en cada PF proporcionan los componentes necesarios para formular una “función de desviación”. Esta función se agrega a la “función de referencia” estándar del tipo de termopar. El resultado final es la “caracterización” del termopar bajo prueba.

Para formular la “función de desviación”, se llevan a cabo varias operaciones de álgebra lineal para determinar la “solución de mínimos cuadrados” para el sistema sobredeterminado por las “temperaturas de los PF y sus valores cuadrados” y “las diferencias de voltaje entre los valores medidos por el termopar bajo prueba a las temperaturas de los PF” y los correspondientes valores de voltaje de la “función de referencia” bajo las mismas temperaturas de los PF. La solución de mínimos cuadrados proporciona dos coeficientes agregados de manera algebraica a los términos correspondientes en la “función de referencia”, para producir la función de “caracterización del termopar”. Consulte el Apéndice B para conocer el resumen de las operaciones de álgebra lineal.

Elemento o compuesto del punto de congelación	Símbolo del elemento químico	Temperatura del punto de congelación según la ITS-90 (en °C)
Plata	Ag	961,78
Aluminio	Al	660,323
Zinc	Zn	419,527
Estaño	Sn	231,928
Agua	H ₂ O	0,010

⁽²⁾NIST Monograph 175, (1993), pág. 4.

Figura 3. Resumen de las celdas del punto fijo.

Apéndice A: Tabla resumen de las tolerancias de los termopares^(3, 4)

TIPO B				
Pt - 30 % Rh vs. Pt - 6 % Rh			Color de clasificación de la extensión = Gris	
Temperaturas de prueba	Sensibilidad tipo B	FEM nominal	Tolerancia de límites estándares (± °C)	Tolerancia de límites especiales (± °C)
± 1250,00 °C	10,622 uV/°C	7,311 mV	6,25	3,13
1000,00 °C	9,123 uV/°C	4,834 mV	5,00	2,50

Rango: Tolerancias de 870 °C a 1700 °C: Estándar: ± 0,5 % de la lectura; especiales: ± 0,25 % de lectura.

TIPO E				
Ni - Cr vs. Constantán			Color de clasificación de la extensión = Púrpura	
Temperaturas de prueba	Sensibilidad tipo E	FEM nominal	Tolerancia de límites estándares (± °C)	Tolerancia de límites especiales (± °C)
870,00 °C	77,393 uV/°C	66,473 mV	4,35	3,48
500,00 °C	80,930 uV/°C	37,005 mV	2,50	2,00
250,00 °C	76,240 uV/°C	17,181 mV	1,70	1,00

Rango: Tolerancias de 200 °C a 870 °C: Estándar: ± 1,7 °C o ± 0,5 % de lectura (de 0 a 870 °C), el que sea superior, Especiales: ± 1 °C o ± 0,4 % de lectura (de 0 a 870 °C), el que sea superior,

TIPO J				
Hierro vs. Constantán			Color de clasificación de la extensión = Negro	
Temperaturas de prueba	Sensibilidad tipo J	FEM nominal	Tolerancia de límites estándares (± °C)	Tolerancia de límites especiales (± °C)
760,00 °C	63,699 uV/°C	42,281 mV	5,63	3,00
500,00 °C	55,987 uV/°C	27,393 mV	3,75	2,00
250,00 °C	55,512 uV/°C	13,555 mV	2,20	1,10

Rango: Tolerancias de 0 a 760 °C: Estándar: ± 2,2 °C o ± 0,75 % de lectura, el que sea superior, Especiales: ± 1,1 °C o ± 0,40 % de lectura, el que sea superior,

TIPO K				
Ni - 10 % Cr vs. Ni - 5 % (alúmina, sílice)			Color de clasificación de la extensión = Amarillo	
Temperaturas de prueba	Sensibilidad tipo K	FEM nominal	Tolerancia de límites estándares (± °C)	Tolerancia de límites especiales (± °C)
1260,00 °C	35,566 uV/°C	51,000 mV	9,45	5,04
900,00 °C	40,005 uV/°C	37,326 mV	6,75	3,60
600,00 °C	42,505 uV/°C	24,905 mV	4,50	2,40
300,00 °C	41,446 uV/°C	12,209 mV	2,25	1,20

Rango: Tolerancias de 200 °C a 1260 °C: Estándar: ± 2,2 °C o ± 0,75 % de lectura (de 0 a 1260 °C), el que sea superior, Especiales: ± 1,1 °C o ± 0,40 % de lectura (de 0 a 1260 °C), el que sea superior,

TIPO N				
TIPO N	Ni - 14 % Cr - 1,5 % Si vs. Ni - 4,5 % Si - 0,1 % Mg		Color de clasificación de la extensión = Naranja	
Temperaturas de prueba	Sensibilidad tipo N	FEM nominal	Tolerancia de límites estándares (± °C)	Tolerancia de límites especiales (± °C)
1260,00 °C	36,580 uV/°C	46,060 mV	9,45	5,04
900,000 °C	39,040 uV/°C	32,371 mV	6,75	3,60
600,000 °C	38,959 uV/°C	20,613 mV	4,50	2,40
300,000 °C	35,422 uV/°C	9,341 mV	2,25	1,20

Rango: Tolerancias de 0 a 1260 °C: Estándar: ± 2,2 °C o ± 0,75% de lectura, el que sea superior,
Especiales: ± 1,1 °C o ± 0,40% de lectura, el que sea superior,

TIPO R				
TIPO R	Pt vs. Pt - 13 % Rh		Color de clasificación de la extensión = Verde	
Temperaturas de prueba	Sensibilidad tipo R	FEM nominal	Tolerancia de límites estándares (± °C)	Tolerancia de límites especiales (± °C)
1084,62 °C	13,575 uV/°C	11,640 mV	2,71	1,09
961,78 °C	13,065 uV/°C	10,003 mV	2,40	0,96
660,32 °C	11,641 uV/°C	6,277 mV	1,65	0,66
419,53 °C	10,480 uV/°C	3,611 mV	1,50	0,60
231,93 °C	9,168 uV/°C	1,756 mV	1,50	0,60

Rango: Tolerancias de 0 a 1480 °C: Estándar: ± 1,5 °C o ± 0,25% de lectura, el que sea superior,
Especiales: ± 0,6 °C o ± 0,10% de lectura, el que sea superior,

TIPO S				
TIPO S	Pt vs. Pt - 10 % Rh		Color de clasificación de la extensión = Verde	
Temperaturas de prueba	Sensibilidad tipo S	FEM nominal	Tolerancia de límites estándares (± °C)	Tolerancia de límites especiales (± °C)
1084,62 °C	11,798 uV/°C	10,575 mV	2,71	1,09
961,78 °C	11,418 uV/°C	9,148 mV	2,40	0,96
660,32 °C	10,398 uV/°C	5,860 mV	1,65	0,66
419,53 °C	9,638 uV/°C	3,447 mV	1,50	0,60
231,93 °C	8,711 uV/°C	1,715 mV	1,50	0,60

Rango: Tolerancias de 0 a 1480 °C: Estándar: ± 1,5 °C o ± 0,25% de lectura, el que sea superior,
Especiales: ± 0,6 °C o ± 0,10% de lectura, el que sea superior,

TIPO T				
TIPO T	Cu vs. Constantán		Color de clasificación de la extensión = Azul	
Temperaturas de prueba	Sensibilidad tipo T	FEM nominal	Tolerancia de límites estándares (± °C)	Tolerancia de límites especiales (± °C)
370,00 °C	60,928 uV/°C	19,030 mV	2,78	1,48
200,00 °C	53,150 uV/°C	9,288 mV	1,50	0,80
100,00 °C	46,785 uV/°C	4,279 mV	1,00	0,50

Rango: Tolerancias de 200 °C a 370 °C: Estándar: ± 1 °C o ± 0,5% de lectura (de 0 a 370 °C), el que sea superior,
Especiales: ± 1 °C o ± 0,4% de lectura (de 0 a 370 °C), el que sea superior,

Apéndice B: Pasos de la operación de álgebra lineal de la caracterización de termopares

1. Las temperaturas de puntos fijos y las correspondientes temperaturas cuadradas se observan en una "matriz de 5 x 2" denominada "A". Consulte la información que se encuentra al final de este apéndice para conocer los detalles de las matrices y los elementos que contienen, descritos en estos pasos.
2. Una matriz más pequeña, de "2 x 1", se ubica como factor a la derecha de la matriz "A" y se usa para especificar el vector de la solución. Esta matriz se denomina "X".
3. El producto de las dos matrices anteriores, "A" and "X", es igual a la matriz formada por las diferencias de los valores medidos de FEM de los termopares bajo prueba y los valores de FEM de la "función de referencia" en las temperatura de PF. Esta matriz de "5 x 1" se denomina "b".
4. El sistema de ecuaciones tiene la siguiente forma: $[A] [X] = [b]$ ⁽⁵⁾.
5. Con matrices traspuesta, identidad e inversa, la solución de mínimos cuadrados "x*" para la ecuación del paso 4 tiene la siguiente forma: $[x^*] = (([A^T] [A])^{-1} [A^T] [b])$ ⁽⁵⁾.

Se adaptaron las ecuaciones de matrices de los pasos 4 y 5 a partir de la información de la referencia (5), págs. 50-54.

6. La matriz de solución $[x^*]$ es una "matriz 2 x 1" y contiene los dos coeficientes distintos de cero para la curva cuadrática (mejor adaptada), "dc₁" y "dc₂".
7. La "función de referencia" para el termopar tipo S se puede expandir de la siguiente forma:
 $EMF_{ref} = c_0 + (c_1) \cdot t_{90} + (c_2) \cdot t_{90}^2 + (c_3) \cdot t_{90}^3 + \dots + (c_8) \cdot t_{90}^8$ (donde FEM está en μVdc , y t_{90} está en °C).
8. La "función de desviación" o la curva cuadrática mejor adaptada es
 $FEM_{dev} = 0 + (dc_1) \cdot t_{90} + (dc_2) \cdot t_{90}^2$
9. Finalmente, si la "función de desviación" del paso 8 se agrega de manera algebraica a la "función de referencia" para el tipo S en el paso 7, la ecuación de superposición resultante es la "caracterización única" para un determinado termopar tipo S que se somete a prueba.
 $EMF_{char} = c_0 + (dc_1 + c_1) \cdot t_{90} + (dc_2 + c_2) \cdot t_{90}^2 + (c_3) \cdot t_{90}^3 + \dots + (c_8) \cdot t_{90}^8$ ⁽⁶⁾

Matrices de caracterización, elementos y solución de mínimos cuadrados $[x^*]$ (temperaturas en °C, y FEM en mVdc)

Matrices del sistema de ecuaciones:

$$[A] [X] = [b]$$

$$\text{Elementos matrices: } [A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(0)}^2 \\ t_{(Sn)} & t_{(Sn)}^2 \\ t_{(Zn)} & t_{(Zn)}^2 \\ t_{(Al)} & t_{(Al)}^2 \\ t_{(Ag)} & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \quad [X] = \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix} \quad [b] = \begin{bmatrix} mv_{meas(0)} - mv_{ref(0)} \\ mv_{meas(Sn)} - mv_{ref(Sn)} \\ mv_{meas(Zn)} - mv_{ref(Zn)} \\ mv_{meas(Al)} - mv_{ref(Al)} \\ mv_{meas(Ag)} - mv_{ref(Ag)} \end{bmatrix}$$

Matrices para la solución de los mínimos cuadrados: $[x^*] = ([A^T] [A])^{-1} [A^T] [b]$ (donde $[x^*] \approx \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix}$ y $[x^*]$ se aproxima a $[X]$)

$$\text{Elementos matrices: } [A^T] [A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} \\ t_{(Sn)} \\ t_{(Zn)} \\ t_{(Al)} \\ t_{(Ag)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 \end{bmatrix}$$

$$([A^T] [A])^{-1} = \frac{1}{\left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 \right) \right] - \left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \right) \right]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 & -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \end{bmatrix}$$

La solución de mínimos cuadrados:

$[x^*]$

$$[x^*] = \frac{1}{\left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) - \left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i) \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i) \right) \right] \right]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 & -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mv_{meas(0)} - mv_{ref(0)} \\ mv_{meas(Sn)} - mv_{ref(Sn)} \\ mv_{meas(Zn)} - mv_{ref(Zn)} \\ mv_{meas(Al)} - mv_{ref(Al)} \\ mv_{meas(Ag)} - mv_{ref(Ag)} \end{bmatrix}$$

Referencias

- 1) NIST Special Publication 250-35, "The Calibration of Thermocouples and Thermocouple Materials", G.W. Burns y M.G. Scroger, Instituto Nacional de Normas y Tecnología, Gaithersburg, MD, 1989.
- 2) NIST Monograph 175, "Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90", G.W. Burns, et al, Instituto Nacional de Normas y Tecnología, Gaithersburg, MD, 1993.
- 3) ASTM E230-03, "Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples", ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 2003.
- 4) Referencia técnica de Omega Engineering, Sección Z. <http://www.omega.com/temperature/Z/zsection.asp> (usada para los códigos de color de TC)
- 5) Geometric Transformations and Image Warping, University of Utah, SCI (School of Computer Imaging) Institute, School of Computing, Presentación en MS-PowerPoint por Ross Whitaker, según modificación de Guido Gerig, Clase CS6640, Otoño, 2012, págs. 50-54.
- 6) Thermocouple Report of Calibration for Type S, última versión, Fluke Calibration, American Fork, UT, p. 2 of 14.

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 6004550B_LAES

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