



¿Caracterización, Calibración, Comprobación o Verificación de Termopares?

Los sensores de par termoelectrónico o termopares son sensores de temperatura, de amplio uso tanto por sus límites de temperatura, costo relativamente económico, su intercambiabilidad y sencilla forma de construcción.

Sin embargo su proceso de confirmación metroológica, y el determinar su adecuación para el propósito, puede confundir a más de alguno, dado que depende de varios factores:

Tipo de material del termopar o termocupla (*TC, thermocouple*):

Metal Puro, Noble, Base o Refractario.

Aplicación:

Patrón Primario, de Referencia, de comprobación o verificación, Instrumentación industrial

Exactitud de medición requerida:

Especial, normal –*standard*–, clase 1, 2 o 3

Calibre de sus alambres

Temperatura de operación, límite máximo,

Instalación:

Portátil, unión de referencia –*RU*– fija, cable de extensión #X, o compensación #C.

Catalogados como instrumentos pasivos, de trazabilidad unidireccional, por lo que tienen un tiempo de vida que depende del tiempo y condiciones de uso.

Apasionados por la Metrología

La Guía MetAs es el boletín electrónico de difusión periódica de MetAs y Metrologos Asociados.

En La Guía MetAs se presentan noticias de metrología, artículos e información técnica; que deseamos compartir con usted, colegas, usuarios, clientes estudiantes y todos aquellos interesados en la metrología técnica e industrial.

MetAs-Matriz:
Antonio Caso # 246, Centro, 49000
Cd. Guzmán, Jalisco, México.
341 413 6123,

MetAs-Óptica:
Av. Luis Vega y Monroy # 322-6 Planta Baja.
Plazas del Sol 1a Sección, 76099
Querétaro, Querétaro, México.
442 223 4527

MetAs-Guadalajara:
Batalla de Zacatecas # 2931,
Fraccionamiento Revolución, 45589
Tlaquepaque, Jalisco, México.
333 860 7141

Servicios Metroológicos

Laboratorios acreditados

EMA	ME-15 Mediciones Especiales
A-05 Acústica	OP-05 Óptica
DEN-09 Densidad	P-44 Presión
D-159 y D-159-S1 Dimensional	T-38 Temperatura
E-67 Eléctrica	TF-22 Tiempo y Frecuencia
EM-03 Equipo Médico	V-33 Volumen
H-05 Humedad	MM-1328-127/21 Metal Mecánica
M-129 Masa	

Consultoría:
Capacitación, entrenamiento, asesoría, auditorías, ensayos de aptitud, sistemas de calidad.

Gestión Metroológica:
Subcontratación de servicios, selección de proveedores, confirmación metroológica.

Ingeniería:
Selección de equipos, desarrollo de sistemas de medición y software, reparación y mantenimiento.

PROCESO DE CONFIRMACIÓN METROLÓGICA

La confirmación metrológica de instrumentos de medición es un requisito técnico fundamental de la certificación de procesos encabezados por ISO 9001, IATF 16949... y acreditación tipo ISO 17000, siguiendo las pautas y cumpliendo los requisitos generales de ISO 10012 y UNE 66180, MSA de AIAG, VDA 5, GAMP de ISPE, ..., así como aplicaciones específicas y especiales de auditoría a procesos de tratamiento térmico y pirometría: CQI-9 de AIAG y AMS 2750 G de SAE, VDA 6.3 de *Verband Der Automobilindustrie*, AS-AC7102/8 del programa NADCAP del PRI (*National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program*) (*Performance Review Institute*)

Este proceso a nivel industrial suele ser realizado por el laboratorio de primera parte dentro de la organización. En organizaciones con infraestructura de soporte-servicio limitada internamente, pero soportada por proveedores externos, es muy conveniente y usualmente un requisito acceder a proveedores acreditados ISO/IEC 17025.

Estos proveedores acreditados 17025 como laboratorios de ensayo o calibración, son reconocidos como organismos de evaluación de la conformidad, reconocidos vía su CMC acreditada para realizar servicios de Medición, Ensayo, Calibración, Caracterización, Calificación.

De forma muy común estos proveedores son requeridos para la realización de servicios de confirmación metrológica y aseguramiento de las mediciones, que pueden diferir de los servicios propiamente acreditados, servicios como: verificación, evaluación del desempeño, verificación de la calibración, identificar cambios de la calibración, comprobación intermedia, recalibración, calibración cruzada, validación cruzada, intercomparación, validación.

*Calibración
Caracterización
Vs
Comprobación
Verificación
Vs
Reemplazo*

Proceso	Propiedad Metrológica	Tipo Termopar (TC)	Estado
Confirmación metrológica			
Calibración inicial	Característica <i>FEM vs T</i> Exactitud	TC, todos	Nuevos, en Laboratorio carrete
Recalibración	Deriva/Estabilidad	TC metal noble puro (Au, Pt, Pd) TC metal noble aleación (B, R, S)	Usados, en Laboratorio
Comprobación o Verificación	InHomogeneidad	TC, todos metal base (E, J, K, N, T)	Usados, <i>in-situ</i>
Reemplazo	Tiempo de vida	TC todos metal base (E, J, K, N, T)	Usados

CONFIRMACIÓN METROLÓGICA DE TERMOPARES

Tolerancia inicial

Tolerancia, se define como la máxima desviación inicial permisible de la especificación de *FEM* (Fuerza Electromotriz). La tolerancia se expresa como el equivalente de temperatura en grados Celsius (°C). Clase 1, clase 2 y clase 3. La norma internacional especifica las tolerancias para termopares fabricados de acuerdo con esta norma. Los valores de tolerancia son para termopares fabricados a partir de alambres, normalmente en el intervalo de diámetro de 0,13 mm a 3,2 mm, tal como se entregan al usuario y no permiten la deriva de calibración durante el uso. Se advierte a los usuarios que las tolerancias se aplican solo a alambres nuevos y no permiten cambios en la *FEM* que pueden ocurrir con el uso. (IEC 60584-1, 2013)

Las tolerancias de valores iniciales de *FEM* vs Temperatura se aplican a alambre de termopar esencialmente homogéneo nuevo, normalmente en el intervalo de tamaño de 0,25 a 3 mm de diámetro (AWG, *American Wire Gauge*: 30 a 8) y se usa a temperaturas que no superan los límites recomendados. Si se usa a temperaturas más altas, estas tolerancias pueden no aplicarse, (ASTM E230, 2017).

La norma ASTM E230 e ISA-MC96.1, establecen las tolerancias Normal-estándar-típica y Especial de calibración inicial para termopares y cables de extensión de termopares.

La tolerancia de la calibración inicial se define como la desviación permisible del termopar y el cable de extensión en su condición inicial, tal como lo proporciona el fabricante a partir de las tablas de *FEM* vs Temperatura normalizadas de referencia.

Las tolerancias indicadas en las normas no son necesariamente una indicación de la exactitud de las mediciones de temperatura en uso después del calentamiento inicial de los materiales.

Una vez que el termopar esté en uso, su calibración cambiará. La magnitud y la dirección del cambio dependen de la temperatura, el tiempo y las condiciones ambientales que afectan al termopar y es posible que no se puedan predecir con exactitud. Las tolerancias para cada tipo de termopar se aplican solo en el intervalo de temperatura para el que se recomienda el tamaño de alambre en cuestión. Estas tolerancias deben aplicarse solo a tamaños de alambre normalizados (AWG). Es posible que no se obtengan las mismas tolerancias en tamaños especiales. Estas tolerancias no incluyen errores de instalación o del sistema (ISA-MC96.1, 1982).

Normas de aplicación específica para procesos de tratamiento térmico como: CQI-9 (2020) y AMS 2750 G (2022), establecen tolerancia de exactitud para calibración equivalentes a la tolerancia Especial de ASTM E 230 (2017)

Calibración inicial en laboratorio

El propósito de la calibración inicial de un termopar nuevo homogéneo y no calentado, es determinar su relación característica de *FEM* vs Temperatura.

El material nuevo, no expuesto previamente a gradientes de temperatura, puede comprobarse mediante técnicas descritas en ASTM E-220, NBS SP 300 v II (ISA-MC96.1, 1982).

En general, este método de ensayo es aplicable a termopares no utilizados. Este método de ensayo no se aplica a los termopares usados debido a la posible falta de homogeneidad del material, cuyos efectos no pueden identificarse ni cuantificarse mediante técnicas de calibración normalizadas (ASTM E220, 2021).

El método de ensayo se basa en la suposición de que los elementos térmicos de medición son homogéneos. Si es así, su tensión eléctrica de salida a una temperatura de unión de medición $-MJ-$ dada es independiente de las variaciones de temperatura a lo largo del termopar. Las desviaciones de este ideal contribuyen a la incertidumbre en el uso de los resultados de los ensayos. Los efectos suelen ser insignificanamente pequeños para material de termopar nuevo y sin usar, pero no para termopares usados, especialmente los de composición de metal base (ASTM E220, 2021).

Las incertidumbres para la calibración de termopares de metal base (E, J, K, T) incluyen un margen para la falta de homogeneidad de los termoelementos no utilizados. (ASTM E220, 2021).

Normas de aplicación específica para procesos de tratamiento térmico como: CQI-9 (2020) y AMS 2750 G (2022), establecen que tanto los termopares de metal noble, base y refractarios deben calibrarse antes del primer uso.

Recalibración, comprobación, verificación en laboratorio

Los laboratorios de calibración, productores de termopares y usuarios finales deben establecer la tasa de desviación –deriva- esperada o el tiempo de vida útil de la calibración antes de que sea necesaria la recalibración, de los termopares de tipo metal noble (B, R, S), (EURAMET TG 2, 2015).

Precaución: los usuarios deben tener en cuenta que ciertas características de los materiales de los termopares, incluida la relación *FEM* vs Temperatura, pueden cambiar con el uso; en consecuencia, los resultados de ensayos y el desempeño obtenidos en el momento de la fabricación pueden no aplicarse necesariamente durante un período prolongado de uso. Las tolerancias dadas se aplican solo al alambre nuevo entregado al usuario y *no permiten cambios en las características con el uso*. La magnitud de dichos cambios dependerá de factores tales como el tamaño del alambre, la temperatura, el tiempo de exposición y el entorno ambiental. Cabe señalar además que, debido a los posibles cambios en la homogenei-

dad, es probable que intentar recalibrar los termopares usados produzca resultados irrelevantes y no se recomienda. Sin embargo, puede ser apropiado comparar termopares usados *in-situ* con termopares nuevos o en buen estado para determinar su idoneidad para un servicio posterior en las condiciones de la comparación. (ASTM E230, 2017).

Normas de aplicación específica para procesos de tratamiento térmico como: CQI-9 (2020) y AMS 2750 G (2022), establecen que únicamente los termopares de metal noble (B, R y S) pueden recalibrarse, mientras que se indica claramente que los termopares de metal base (E, J, K, T) no se permite sean recalibrados, sino remplazados.

Comprobación, verificación o validación en sitio, *in-situ*, de la exactitud de termopares calibrados, en uso

Un termopar debe verificarse periódicamente (ensayarse para cumplir con las especificaciones) para garantizar que no haya sufrido cambios físicos, metalúrgicos o químicos que inhiban o impidan las mediciones de temperatura con una exactitud aceptable. (ASTM E2846, 2020).

A diferencia de muchos otros sensores, la señal generada por un termopar depende del estado físico y químico de la región de los alambres del termopar o termoelementos donde existen gradientes de temperatura en lugar del estado de la unión de medición *-MJ-*. La degradación física o química del termopar en solo una parte de su longitud da como resultado la falta de homogeneidad del termopar. Tal falta de homogeneidad hace que la temperatura medida dependa del entorno térmico intermedio entre las uniones de medición *-MJ-* y unión de referencia *-RJ-* del termopar. Si un termopar se vuelve menos homogéneo con el tiempo, la temperatura medida por ese termopar puede parecer que deriva o se desvía de su valor original, aunque la temperatura real que está midiendo sea constante. (ASTM E2846, 2020).

Si el entorno térmico intermedio durante el uso es diferente al de la calibración, la medición de temperatura de un termopar no homogéneo será inexacta. (ASTM E2846, 2020).

Los termopares utilizados en un entorno hostil a menudo se vuelven progresivamente menos homogéneos; para tales termopares es particularmente importante hacer comprobaciones-ensayos periódicas de su desempeño. Además, un termopar deja de ser fiable si sufre otros cambios físicos. No medirá correctamente si los alambres o la unión de medición *-MJ-* están rotos o si sus elementos térmicos están en contacto eléctrico en un lugar que no sea la unión de medición *-MJ-*. (ASTM E2846, 2020).

Los termopares con cubierta metálica no funcionarán de manera confiable si hay una fuga eléctrica excesiva entre la cubierta y el alambre del termopar; esto puede ocurrir si se han desarrollado agujeros en la cubierta o si el sello del cierre del extremo presenta una fuga. Las comprobaciones-ensayos periódicas pueden verificar estos cambios no deseados, lo que permite al usuario saber si se puede confiar en el desempeño del termopar. Estas pruebas son particularmente importantes antes de la calibración de un termopar, porque determinan si el desempeño del termopar es digno del esfuerzo y el gasto de la calibración. (ASTM E2846, 2020).

Los efectos de la falta de homogeneidad pueden identificarse, pero no cuantificarse con exactitud, mediante las técnicas descritas en el apéndice X4 de ASTM E220 y en la sección 8.2 de la Guía ASTM E2846. Las descripciones de los ensayos de los termopares usados se pueden encontrar en la Guía ASTM E2846 y en el Manual ASTM MNL-12 (ASTM E220, 2021)

En un sentido estricto, las calibraciones por los métodos descritos en ASTM E220 (2021) se aplican solo para condiciones de uso similares a aquellas bajo las cuales se realizaron las calibraciones.

Una vez que un termopar, particularmente uno de metales base (E, J, K, T), se ha calentado a alta temperatura, pueden ocurrir cambios, incluso en termoelementos relativamente homogéneos, que harán que la salida de *FEM* del termopar dependa del perfil de temperatura particular existente entre la unión de medición *-MJ-* y la unión de referencia *-RJ-*. Esto es particularmente cierto en el caso de los termopares de metal base (E, J, K, T) que han sido calibrados a una profundidad de inmersión y se utilizan a una profundidad de inmersión más corta.

No es factible una evaluación cuantitativa general de los errores que pueden surgir de esta fuente, pero las posibilidades de tales errores deben reconocerse al analizar las incertidumbres de las mediciones de temperatura realizadas con termopares de metal base (E, J, K, T) calibrados.

Para termopares de metal base (E, J, K, T), es una práctica preferida calibrar una gran cantidad de alambre de termopar (carrete-bobina, *spool, reel*) o una muestra estadística de sondas de termopar ensambladas, y luego usar un nuevo termopar o sonda para cada ambiente o entorno térmico.

Las técnicas para la validación *in-situ* de los termopares usados que eliminan los errores resultantes de los diferentes perfiles térmicos de los aparatos de calibración en relación con el aparato donde se usa el termopar se analizan en ASTM MNL-12 (ASTM E220, 2021)

*Calibración,
Comprobación,
Verificación,
o SAT*

*En-Sitio
In-Situ*

La comprobación de los termopares instalados se complica por la falta de uniformidad termoeléctrica resultante de la contaminación o deterioro de los elementos. Las terminales o elementos no calentados de un termopar usado normalmente estarán como nuevos — la unión real $-MJ$, contaminada o deteriorada, y el material intermedio afectado en varios grados (ISA-MC96.1, 1982).

La salida de un termopar contaminado o deteriorado no estará determinada únicamente por la temperatura de la unión de medición calentada $-MJ$, como ocurre con un termopar homogéneo nuevo, sino también por el gradiente de temperatura entre los extremos o uniones de medición $-MJ$ y unión de referencia $-RJ$ y la firma-patrón-modelo-pauta de contaminación y deterioro en la zona de gradiente de temperatura (ISA-MC96.1, 1982).

POR ESTA RAZÓN

UN TERMOPAR USADO NO DEBE SER RETIRADO DE SU LUGAR DE INSTALACIÓN Y COLOCAR EN UN HORNO DE CALIBRACIÓN PARA SU COMPROBACIÓN. ES MUY IMPROBABLE QUE LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA EN LAS DOS INSTALACIONES SEAN IGUALES (ISA-MC96.1, 1982).

Un termopar usado debe verificarse en su ubicación normal de instalación, en sitio. El propósito de comprobar un termopar instalado no es determinar su relación característica de FEM vs Temperatura, sino determinar el error-sesgo desviación de temperatura en el servicio real. Esto se puede hacer más fácilmente instalando temporalmente un termopar nuevo o de comprobación-verificación-trabajo junto al termopar de servicio, o en su lugar, y comparando las lecturas. Si el termopar instalado se usa para medir un amplio intervalo de temperaturas, debe comprobarse en más de una temperatura dentro del intervalo de su uso. El ensayo-prueba de un termopar a una sola temperatura proporciona cierta información, pero no es seguro asumir que los cambios en la FEM del par termoeléctrico son proporcionales a la temperatura o a la FEM (ISA-MC96.1, 1982).

Normas de aplicación específica para procesos de tratamiento térmico como: CQI-9 (2020) y AMS 2750 G (2022), catalogan la calibraciones-comprobaciones-verificaciones en-sitio como ensayos de exactitud del sistema SAT (*System Accuracy Test*) identificando claramente la profundidad de inserción-inmersión en el sistema-horno del termopar de control, monitoreo o registro.

Ajuste

*Recocido
Tratamiento
Térmico
Annealing*

Ajuste, recocido de termopares

El recocido de los conductores de metales nobles (Pt, Au, Pd) y su estado de recocido tienen una influencia importante en su comportamiento termoeléctrico (EURAMET CG 8, 2020).

El tratamiento térmico o recocido de un termopar está destinado a producir una condición física y química uniforme a lo largo de las longitudes calentadas del termopar. Debe verse como una especie de ajuste y, en el caso de recalibraciones, dicho tratamiento térmico solo debe realizarse con el acuerdo formal del cliente (EURAMET CG 8, 2020).

Para obtener los mejores resultados, un termopar a calibrar primero debe recocerse en inmersión máxima a la temperatura más alta de uso previsto durante varias horas (EURAMET CG 8, 2020).

Remplazo

Los laboratorios de calibración, productores de termopares y usuarios finales deben establecer la tasa de desviación –deriva- esperada o el tiempo de vida útil de la calibración antes de que sea necesaria el reemplazo de termopares de tipo metal base (E, J, K, N, T), (EURAMET TG 2, 2015).

Con el tiempo y el uso, la degradación del termopar y su calibración es inevitable y, a largo plazo, por lo tanto, se debe establecer y mantener un esquema de controles regulares y eventuales reemplazos. Para los termopares de metal base (E, J, K, N, T) que se usan a altas temperaturas, se recomienda reemplazarlos en lugar de recalibrarlos (EURAMET CG 8, 2020).

Cuando haya instalaciones de termopares a largo plazo, las comprobaciones de calibración se realizan mejor *in-situ* proporcionando la inserción de un patrón junto a un costado con los termopares en funcionamiento cuando sea necesario. Alternativamente, se puede sustituir temporalmente un termopar por un termopar patrón y comparar sus *FEM*. En la práctica, puede preferirse un programa de reemplazo periódico (EURAMET CG 8, 2020).

Remplazo

Para los termopares de metal base (E, J, K, N, T), un reemplazo con un termopar calibrado en lugar de una recalibración suele ser la mejor solución. De lo contrario, se recomiendan calibraciones o comprobaciones *'in situ'*. El tratamiento térmico cuidadoso a veces puede reducir la falta de homogeneidad (EURAMET CG 8, 2020).

Normas de aplicación específica para procesos de tratamiento térmico como: CQI-9 (2020) y AMS 2750 G (2022), establecen que los termopares de metal base (E, J, K, T) deben ser reemplazados en función de la temperatura de operación y la cantidad de usos máximos permitidos, catalogándolos como termopares de metal base desechables *'expendables'*.

Patrones y Trazabilidad

Los termopares se calibran mediante la medición a una serie de temperaturas de punto fijo, ej. puntos de fusión/solidificación, o por comparación con termómetros patrón o de referencia, en baños u hornos térmicamente estabilizados adecuados para la calibración, o mediante una combinación de técnicas, ej. comparaciones con un termómetro de referencia y u o temperaturas de punto fijo. Los termómetros patrón y de punto fijo deben ser trazables a los patrones nacionales, (EURAMET TG 2, 2020).

*Punto Fijo
Primario
Secundario
Trabajo
Comprobación
SAT
Ensayo TUS*

Puntos fijos, patrón

Generalmente, las calibraciones de punto fijo solo se requieren para la calibración de termopares de metales nobles (B, R, S) y termopares de metales puros (Au/Pt, Pt/Pd) con la máxima exactitud (EURAMET TG 2, 2020).

Patrón primario

Los termopares tipo S se usan con frecuencia para calibración o comprobación, ya que este tipo es uno de los patrones primarios (ISA-MC96.1, 1982). La misma categoría es señalada por CQI-9 (2020) y AMS 2750 G (2022) para los termopares B, R, y S.

Termopar de comprobación-verificación-trabajo o Patrón secundario

Los termopares de comprobación o los patrones secundarios deben ser homogéneos y no contaminados. Se puede usar cualquier termopar nuevo, pero debe compararse con un patrón primario (tipo S) y etiquetarse con su desviación de la curva de referencia. Si un usuario no tiene el equipo y la técnica para hacer esto, hay disponibles termopares calibrados y etiquetados. El Instituto Nacional de Metrología u otros Laboratorios de Referencia proporcionarán un Certificado de Calibración sobre las características de *FEM vs* Temperatura de un termopar enviado (ISA-MC96.1, 1982). La exactitud de un termopar de comprobación o un patrón secundario será cuestionable después de su uso (ISA-MC96.1, 1982):

Normalmente se puede confiar en los termopares de metal noble (S, R, y B) durante un período considerable de uso, siempre que no se haya evitado las temperaturas de comprobación.

Los termopares de metal base (E, J, K, T) que se utilizan con fines de comprobación deben comprobarse con frecuencia. Los termopares de metal base no se deben usar para realizar comprobaciones por debajo de los 480 °C (900 °F), si han sido expuestos entre comprobaciones a temperaturas superiores a los 760 °C (1400 °F).

El termopar tipo T (Cobre *versus* Constantán) puede servir como un termómetro de referencia útil en el intervalo de -195 °C a 370 °C (-320 °F a 700 °F) en algunos casos, aunque su exactitud, en general, está limitada por la estabilidad del alambre a temperaturas superiores a aproximadamente $+200\text{ °C}$ ($+390\text{ °F}$) y por la exactitud de las mediciones de *FEM* y la falta de homogeneidad del alambre por debajo de $+200\text{ °C}$. El alambre de $0,5\text{ mm}$ de diámetro (calibre 24 AWG) es un compromiso-arreglo-equilibrio útil entre la menor estabilidad del alambre más pequeño y la mayor conducción de calor del alambre grande (ASTM E220, 2021).

Termopares de metal base (E, J, K, T) de un solo uso (de sacrificio) para mediciones-ensayos a temperatura elevada, se puede usar como termómetro de referencia un termopar de metal base tomado de un lote calibrado de alambre de homogeneidad verificada. La homogeneidad del lote se puede determinar calibrando los termopares fabricados a partir de una muestra estadística del lote de alambre y determinando la desviación típica-estándar de los valores de *FEM* del conjunto de termopares, en cada temperatura de calibración. En esta aplicación, el termopar de referencia de metal base se usaría solo a temperaturas de prueba crecientes. Los termopares de metal base de un solo uso no son aptos para recalibración, y se debe incluir una incertidumbre adicional para tener en cuenta la deriva de la referencia durante la prueba. En particular, se sabe que los termopares tipo E y tipo K que no han recibido un tratamiento térmico especial muestran cambios de hasta el equivalente a 4 °C (7 °F) en la respuesta termoeléctrica después de exposiciones relativamente cortas a temperaturas en el rango de 250 °C (480 °F) a 550 °C (1020 °F) (ASTM E220, 2021).

En general, cualquier termómetro puede emplearse como termómetro de referencia siempre que tenga una cantidad conocida de incertidumbre de medición (ASTM E220, 2021).

Normas de aplicación específica para procesos de tratamiento térmico como: CQI-9 (2020) y AMS 2750 G (2022), catalogan como patrones secundarios de ensayo a termopares de metal noble (B, R y S), incluso termómetros de resistencia de platino (RTD). Es posible también el uso termopares de metal base (E, J, K, N, T) como termopar de ensayo, sujetos a los criterios de remplazo, y prohibición de recalibración.

ASTM E 2846 (2021) utiliza el término termómetro Arbitro-Evaluador (*referee*), fabricado del mismo carrete, bobina, lote o grupo del termopar comprobado, pero este patrón sin calentamiento previo y sin servicio permanente.

Comprobación
Verificación
SAT

Ensayo TUS

MÉTODOS NORMALIZADOS

	Internacional	Europeas	Estadounidense
Sensor Termopar, TC-# Especificaciones & Tolerancias	IEC 60584-1	DIN, BS, CSN, SIST, DS, NF, UNE, ... EN 60584-1	ASTM E1751 ASTM E230 ANSI MC96.1
Cables de: Extensión #X, Compensación #C	IEC 60584-3	EN 60584-3	ASTM E230
Calibración Termopar (en laboratorio)	CCT-BIPM	EURAMET cg 8 PTB DKD-R 5-3 EA-10/08 (EAL-G31)	ASTM E220 ANSI MC96.1
Comprobación Verificación Termopar (en sitio o lab)	CCT-BIPM IEC 62651 IEC 62765-2	EURAMET tg 2	ASTM E2846 ANSI MC96.1 CQI-9 AMS 2750
Calibración Unión de Referencia, -RJP-	-	-	ASTM E2730

Métodos normalizados para la calibración, verificación de termopares.



-Su termopar no funciona,



-¿Qué es un termopar?



-¿Usted no sabe qué es un termopar?



-En ese caso le costará un poco más !!!

Lorenzo, de la tira cómica Pepita y Lorenzo (Blondie & Dagwood)

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN & VERIFICACIÓN

Incertidumbre

Los componentes de incertidumbre que cubren la repetibilidad del termómetro de referencia, la estabilidad de la temperatura del baño y la deriva del termopar pueden evaluarse mediante análisis estadístico de múltiples mediciones de termómetros patrón de comprobación. (ASTM E220, 2021).

A temperaturas superiores a aproximadamente +200 °C (+400 °F), los termopares de metal base (E, J, K, T) pueden desviarse sustancialmente durante el ensayo de calibración, lo que impone la principal limitación a la incertidumbre de la calibración. Las limitaciones metalúrgicas de los materiales de los termopares dan como resultado falta de homogeneidad en la composición a lo largo de los termoelementos, incluso cuando son nuevos. Este efecto limita la mejor exactitud alcanzable en una calibración de termopar (ASTM E220, 2021). Como guía aproximada:

los termopares de metal base (E, J, K, T) se pueden calibrar con una incertidumbre fraccionaria de 10^{-3} (0,1 %) de la diferencia de temperatura entre las uniones de referencia $-R_J$ y unión de medición $-M_J$,

los termopares de aleación de metales nobles (R, S, B) se pueden calibrar con una incertidumbre fraccionaria de 10^{-4} (0,01 %) de esta diferencia de temperatura, y

los termopares de elementos puros (Au, Pt, Pd) pueden calibrarse con una incertidumbre fraccionaria de 10^{-5} (0,001 %) de esta diferencia de temperatura.

Incertidumbre:

Repetibilidad

Estabilidad

Deriva

Inhomogeneidad

Las incertidumbres combinadas que ocurren en los puntos de calibración para los tipos comunes de termopares, según se obtienen en NIST SP 250-35 (1989) y NIST IR 5340 (1994). Las incertidumbres para la calibración de termopares de metal base (E, J, K, T) incluyen una tolerancia por la falta de homogeneidad de los termoelementos no utilizados (ASTM E220, 2021).



Inhomogeneidad de los elementos conductores del termopar

La *FEM* de un termopar se produce en un gradiente de temperatura y no en la punta *-MJ* del termopar. En muchos casos, la falta de homogeneidad termoeléctrica de los conductores limita la incertidumbre de medida (EURAMET CG 8, 2020).

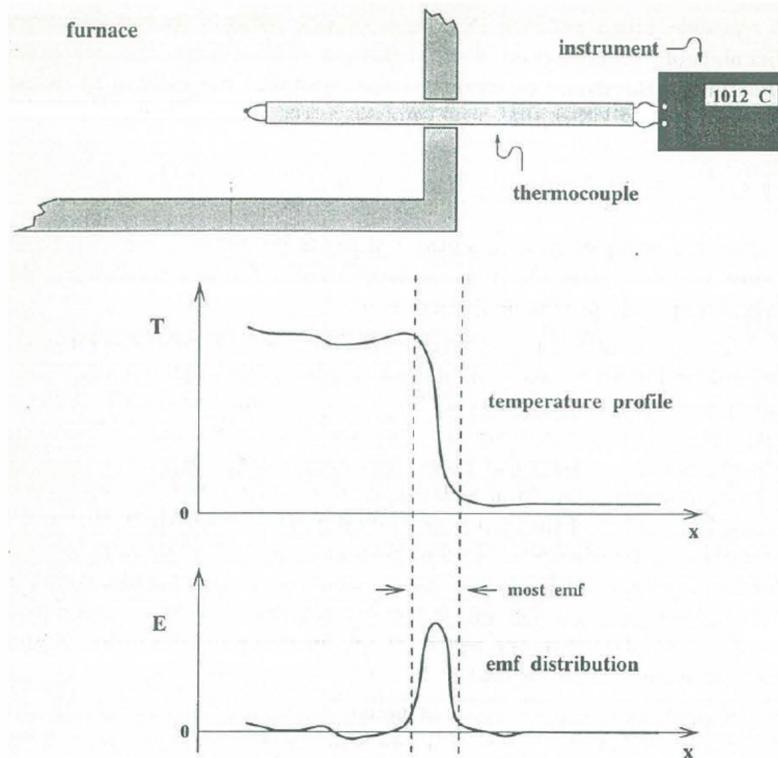


Fig. 1. Distribución de *FEM* en un termopar: una gráfica de su temperatura, T , y el campo eléctrico resultante, E (*fem*/unidad de longitud), a lo largo de su longitud, x . (Bentley, 1998)

Se puede cuantificar un cambio en la *FEM* y la calibración de un termopar como resultado del uso, o incluso como resultado inmediato de la calibración, sumergiendo el termopar en un baño u horno térmicamente estabilizado mantenido a una temperatura adecuada y midiendo la salida en una serie de profundidades de inmersión que abarcan la profundidad de trabajo normal. Si, finalmente, el termopar está sustancialmente sumergido en exceso, es decir, más allá de cualquier profundidad de trabajo anterior, las *FEM* medidas deben aproximarse mucho al valor que se muestra en el (primer) certificado de calibración inicial a la temperatura correspondiente y corroborar la validez de los dos (posiblemente diferentes) sistemas de calibración. Sin embargo, este efecto de falta de homogeneidad de los termohilos debe tenerse en cuenta al estimar la incertidumbre de medición (EURAMET CG 8, 2020).

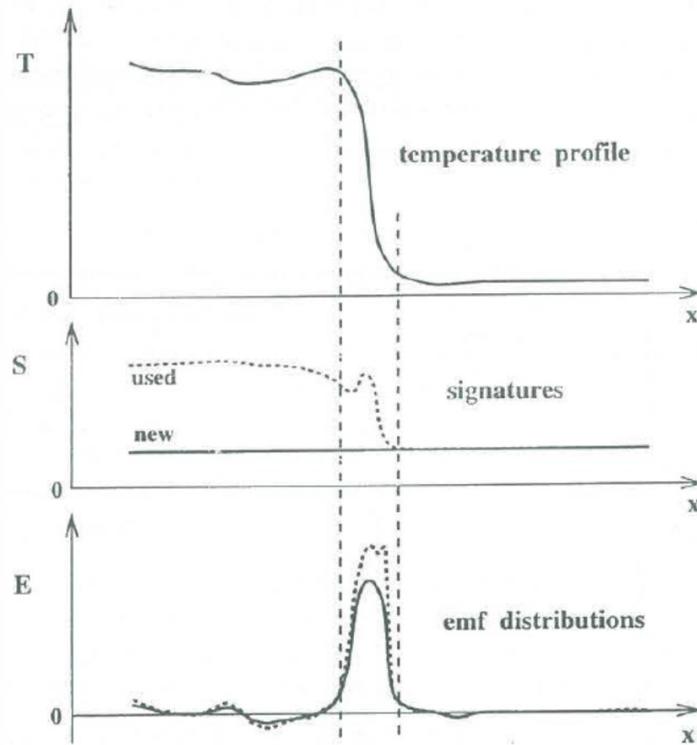


Fig. 2. El cambio en la firma termoeléctrica con el uso y el cambio resultante en la distribución de FEM .
Se grafican la temperatura, T , el coeficiente Seebeck, S , y el campo eléctrico, E .
Por conveniencia, se supone que S para alambre nuevo es independiente de T . (Bentley, 1998).

La falta de homogeneidad se puede cuantificar moviendo la unión de medición $-MJ$ en un entorno con una distribución de temperatura homogénea (ej. En un baño de líquido agitado o una celda de punto fijo, o un escáner de gradiente único especializado). Durante el ensayo de inhomogeneidad, se exponen diferentes partes del alambre a la región con el mayor gradiente de temperatura, lo que genera cambios en la FEM si el termopar no es homogéneo. Para la calibración de carretes de alambre de termopar, la inhomogeneidad se puede determinar a partir de la variación máxima de la calibración de dos o más termopares tomados del carrete (EURAMET CG 8, 2020).

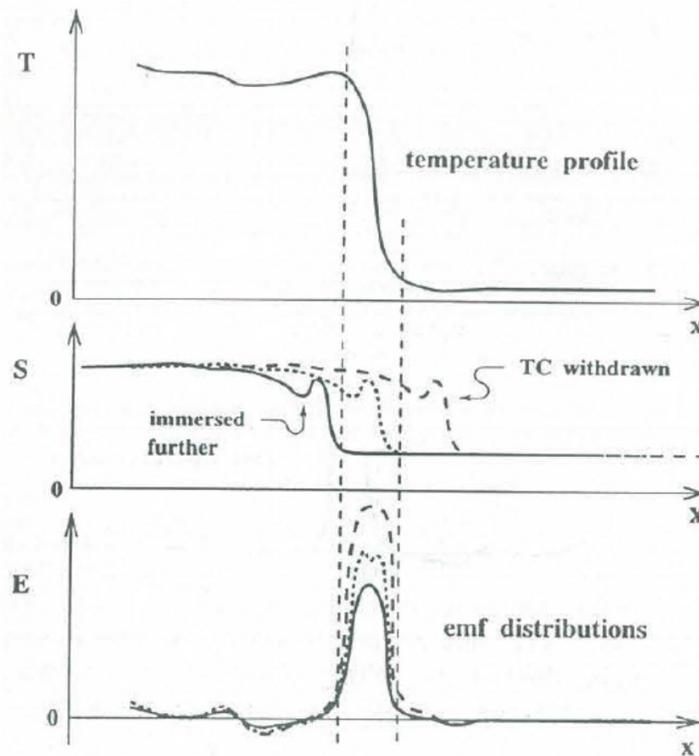


Fig. 3 El resultado de mover un termopar en relación con el perfil de temperatura después del uso (Fig. 2) La distribución de *FEM* se muestra para tres posiciones del termopar, cada una representada por su firma termoeléctrica. (Bentley, 1998)

En los casos en que no sea posible la medición individual de inhomogeneidad, se recomienda (solo para termopares nuevos, calibración inicial) tomar los siguientes valores como contribución ($k=2$) a la incertidumbre (EURAMET CG 8, 2020):

- Au/Pt y Pt/Pd: 0,02 % de temperatura en °C
- Tipo R y S: 0,04 % de temperatura en °C
- Tipo B: 0,10 % de temperatura en °C
- Tipo K y N: 0,20 % de temperatura en °C
- Todos los otros tipos (E, J, T): 0,50 % de temperatura en °C

Para una estimación de la falta de homogeneidad a otras temperaturas distintas de las ensayadas, se puede suponer que para termopares de metales puros (Au/Pt, Pt/Pd) y nobles (R, S, B), la inhomogeneidad se puede expresar como un porcentaje de la temperatura total (EURAMET CG 8, 2020).

La situación es muy diferente para los termopares de metal base (E, J, K, N, T), que exhiben una amplia gama de efectos reversibles e irreversibles dependientes de la temperatura que hacen imposible tal extrapolación (EURAMET CG 8, 2020).

Tiempo de Vida Útil, Deriva y Estabilidad

La guía EURAMET TG 2 (2015) delinea los requisitos técnicos básicos para aquellos laboratorios que realizan la evaluación del tiempo de vida útil y la deriva/estabilidad de calibración de termopares industriales de metales base y metales nobles.

Los laboratorios de calibración, productores de termopares y usuarios finales deben establecer las tasas de desviación esperadas –deriva- o el tiempo de vida útil de la calibración antes de que sea necesaria la recalibración (para TC de tipo de metal noble, R, S, B) o el reemplazo (para TC de tipo metal base, E, J, K, N, T), (EURAMET TG 2, 2015). Se define y describen brevemente su aplicación:

Tiempo de vida útil

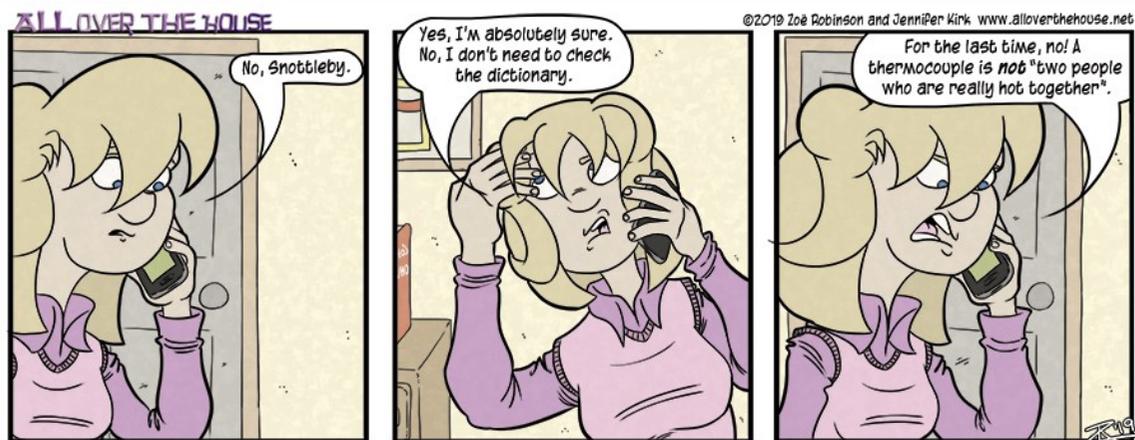
La vida útil se determina como el tiempo transcurrido a una temperatura específica (elevada) sobre la cual la calibración del termopar permanece dentro de los límites específicos (tolerancias). Se recomienda para TC de metal base, nuevos, sin tratamiento térmico o recocido, no calibrados.

Deriva a largo plazo

La deriva a largo plazo se determina como el cambio en la calibración del termopar después de la exposición continua a una temperatura específica (elevada) durante un período de tiempo específico, generalmente varios meses (al menos 4 meses, calibración semanal y quincenal). Aplica para TC metal base o noble, calibrado y recocido correctamente.

Deriva a corto plazo

La desviación a corto plazo se determina como el cambio en la calibración del termopar después de ejecutar un procedimiento específico que generalmente involucra ciclos entre una o varias temperaturas (elevadas), como en calibraciones repetidas (4 calibraciones, con calentamientos de 8 h entre cada calibración). Aplica para TC metal base o noble, calibrado y recocido correctamente.



REPORTE (INFORME) DE RESULTADOS

Considerando lo descrito en las diferentes fuentes de referencia (guías, documentos, normas) los termopares (metal base, metal noble) tienen sus características particulares que deben ser evaluadas y reportados en los diferentes ejemplos de Certificado de Calibración.

El contenido técnico del Certificado debe comprender lo siguiente:

- Una identificación clara de los elementos sujetos a medición, incluidos el termopar(es), cualquier compensación o cable de extensión, especialmente cuando estos son elementos separados y cualquier otro instrumento (por ejemplo, indicadores digitales) que forman parte de todo el sistema medido;
- El intervalo de temperatura cubierto por la calibración;
- Una declaración de cualquier tratamiento térmico (recocido, *annealing*) realizado antes de la calibración, especialmente cuando el estado termoeléctrico no está bien definido (BIPM-CCT, 2021);
- Condiciones de operación (BIPM-CCT, 2021), la profundidad de inmersión del sensor;
- Estado termoeléctrico (BIPM-CCT, 2021), una declaración sobre la falta de homogeneidad del termopar;
- El procedimiento de medición y calibración (BIPM-CCT, 2021) utilizado. Por ejemplo, puntos 'fijos', comparación con termómetro(s) de referencia, aumentando o disminuyendo las temperaturas de calibración;
- Cualquier condición ambiental relevante;
- Cualquier estándar u otra especificación relevante para el procedimiento utilizado, por ejemplo, tablas de referencia IEC o ASTM;
- Evaluación de la incertidumbre de medida asociada a los resultados.

A continuación se muestran algunos ejemplos de variantes de en los tipos de servicios y el Certificado-Reporte-Informe de Caracterización-Calibración-Verificación correspondiente:

- Calibración-Characterización, curva FEM vs T . Método comparación directa;
- Calibración, Error (Sesgo Instrumental). Método comparación directa, tipo patrón, Error vs Indicación E vs I ;
- Calibración, Error (Sesgo Instrumental). Método comparación directa, tipo ordinario, Error vs Indicación E vs I ;
- Calibración-Verificación o ensayo SAT. Método de medición directa.

*Tiempo de
Vida Útil*

Deriva

Calibración-Characterización, curva FEM vs T. Método comparación directa.

Contenido: Cuadro o tabla de calibración y el diagrama (gráfica) de calibración, de errores de ajuste o sesgos instrumentales e incertidumbres instrumentales, reportados en mV unidad de tensión eléctrica (FEM) y temperatura en °C (grados Celsius) + curva de ajuste con coeficientes del polinomio la ITS-90.

Notas: La incertidumbre instrumental declarada, es válida únicamente para la profundidad de inmersión de (200 mm o 300 mm). Su uso a profundidades diferentes debe considerar la incertidumbre adicional por "inhomogeneidad" de los alambres del termopar de acuerdo con: EURAMET cg -8; ASTM E 220.

Recomendado para termopares de metal noble (S, R, B) o termopares de metal base utilizados como patrón de referencia.

Resultados de la Calibración (Sin Corregir)
Utilizado Coeficientes del Polinomio Normalo

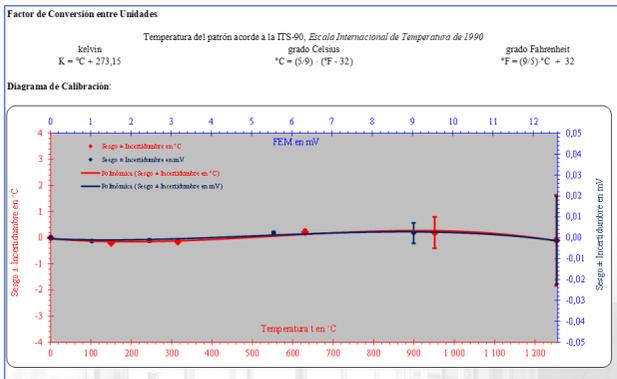
Cuadro (tabla) de Calibración:

Magnitud	Patrón		Indicación Promedio		Sesgo Instrumental		Incertidumbre Instrumental ¹	
	Temperatura	Valor de Referencia de la Magnitud	Temperatura	mV	Temperatura	mV	Temperatura	mV
K	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV
273,152	0,0017	0,000 0	0,000	0,000 06	-0,002	0,000 05	±0,028	±0,000 15
423,127	149,977	1,029 2	149,777	1,027 59	-0,200	-0,001 64	±0,042	±0,000 44
588,133	314,983	2,460 4	314,837	2,459 10	-0,146	-0,001 34	±0,064	±0,000 73
902,935	629,785	5,544 1	630,007	5,546 35	0,222	0,002 25	±0,087	±0,000 70
1 224,051	950,901	9,024 4	951,10	9,026 55	0,20	0,002 2	±0,60	±0,004 9
1 525,899	1 252,75	12,586 8	1 252,6	12,585 56	-0,1	-0,001	±1,7	±0,021

Las indicaciones, sesgos e incertidumbres instrumentales son resultado del promedio de las mediciones.

La incertidumbre instrumental declarada, es válida únicamente para la profundidad de inmersión de 200 mm o 300 mm. Su uso a profundidades diferentes debe considerar la incertidumbre adicional por "inhomogeneidad" de los alambres del termopar de acuerdo con: EURAMET cg-8; ASTM E 220.

Observaciones: El sensor ha sido calibrado con la unión de referencia a 0,00 °C en punto de hielo. El sensor se calibró con un indicador de termopares facilitado por MetAs, configurado para "mV". Es responsabilidad del usuario configurar el indicador con los coeficientes presentados en este informe. Las indicaciones de temperatura en °C corresponden a la conversión de la medición de FEM en mV, utilizando la función inversa aproximada para termopar tipo S de las tcnicas para aproximación de la ITS-90, nomadas en IEC 584, ASTM E 230 & monografía 175 del NIST.



Resultados de la Calibración

Con el método de mínimos cuadrados se obtienen los siguientes coeficientes para utilizarse con las ecuaciones correspondientes, de las cuales se obtienen los

Función de Medición

$$E(t_{90}) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot t_{90}^i$$

t_{90} = temperatura en °C
 E = fem en mV
 a_i = coeficientes para $E(t_{90})$
 c_k = coeficientes para $t_{90}(E)$

$$t_{90}(E) = \sum_{k=0}^m c_k \cdot E^k$$

TC-S, Intervalo -50...+1 064,18 °C

$a_0 = a_0 \pm \Delta a_0$ -2,131 831 612 3 E-04
 $a_1 = a_1 \pm \Delta a_1$ 5,390 389 601 7 E-03
 $a_2 = a_2 \pm \Delta a_2$ 1,263 314 141 1 E-05
 $a_3 = a_3 \pm \Delta a_3$ -2,327 199 858 9 E-08
 a_4 3,220 288 230 4 E-11
 a_5 -3,314 651 963 9 E-14
 a_6 2,357 442 511 9 E-17
 a_7 -1,250 488 713 9 E-20
 a_8 2,714 431 761 5 E-24

TC-S, Intervalo =1 064,18... 1664,5 °C

$a_0 = a_0 \pm \Delta a_0$ 1,328 791 257 7 E+00
 $a_1 = a_1 \pm \Delta a_1$ 3,332 349 638 8 E-03
 $a_2 = a_2 \pm \Delta a_2$ 6,587 764 365 6 E-06
 $a_3 = a_3 \pm \Delta a_3$ -1,672 764 311 8 E-09
 a_4 1,299 896 051 7 E-14

TC-S, Intervalo -50...+250 °C

$c_0 = c_0 \pm \Delta c_0$ 7,242 001 3 E-02
 $c_1 = c_1 \pm \Delta c_1$ 1,850 207 E+02
 $c_2 = c_2 \pm \Delta c_2$ -8,007 957 E+01
 $c_3 = c_3 \pm \Delta c_3$ 1,022 393 E+02
 c_4 -1,522 486 E+02
 c_5 1,888 213 E+02
 c_6 -1,590 859 E+02
 c_7 8,230 279 E+01
 c_8 -2,341 819 E+01
 c_9 2,797 863 E+00

TC-S, Intervalo 250...+1200 °C

$c_0 = c_0 \pm \Delta c_0$ 1,298 749 E+01
 $c_1 = c_1 \pm \Delta c_1$ 1,467 011 E+02
 $c_2 = c_2 \pm \Delta c_2$ -3,537 638 E+01
 $c_3 = c_3 \pm \Delta c_3$ 3,147 638 E+00
 c_4 -4,163 238 E-01
 c_5 3,187 964 E-02
 c_6 -1,291 638 E-03
 c_7 2,183 475 E-05
 c_8 -1,447 380 E-07
 c_9 8,2112 721 E-09

TC-S, Intervalo 1064...+1664,5 °C

$c_0 = c_0 \pm \Delta c_0$ -8,080 539 E+01
 $c_1 = c_1 \pm \Delta c_1$ 1,622 386 E+02
 $c_2 = c_2 \pm \Delta c_2$ -8,566 032 E+00
 $c_3 = c_3 \pm \Delta c_3$ 4,738 632 E-01
 c_4 -1,441 694 E-02
 c_5 2,081 619 E-04

$U_{conv} k = \pm 0,26$ °C

(E ± ΔE) mV	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,07	17,86	34,50	50,26	65,32	79,80	93,81	107,42	120,70	133,69
1	146,42	158,92	171,22	183,33	195,28	207,09	218,78	230,33	241,76	253,14
2	264,35	275,50	286,58	297,58	308,51	319,37	330,17	340,92	351,61	362,24
3	372,83	383,36	393,86	404,30	414,71	425,08	435,41	445,70	455,95	466,17
4	476,36	486,51	496,63	506,72	516,77	526,80	536,79	546,76	556,69	566,59
5	576,47	586,31	596,13	605,92	615,67	625,40	635,10	644,77	654,41	664,02
6	673,61	683,16	692,69	702,19	711,66	721,10	730,51	739,89	749,26	758,59
7	767,89	777,16	786,41	795,63	804,82	813,99	823,13	832,25	841,34	850,40
8	859,44	868,45	877,44	886,40	895,34	904,26	913,15	922,02	930,87	939,69
9	948,50	957,28	966,03	974,77	983,49	992,18	1 000,86	1 009,51	1 018,15	1 026,76
10	1 035,36	1 043,94	1 052,50	1 061,04	1 069,57	1 078,07	1 086,56	1 095,03	1 103,49	1 111,94
11	1 120,37	1 128,80	1 137,20	1 145,60	1 153,99	1 162,36	1 170,73	1 179,09	1 187,44	1 195,78
12	1 204,11	1 212,43	1 220,75	1 229,06	1 237,37	1 245,67	1 253,96	-	-	-

Temperatura t₉₀ en °C del Termopar tipo S, en función de la fem E en mV

Calibración, Error (Sesgo Instrumental). Método comparación directa, tipo ORDINARIO E vs I

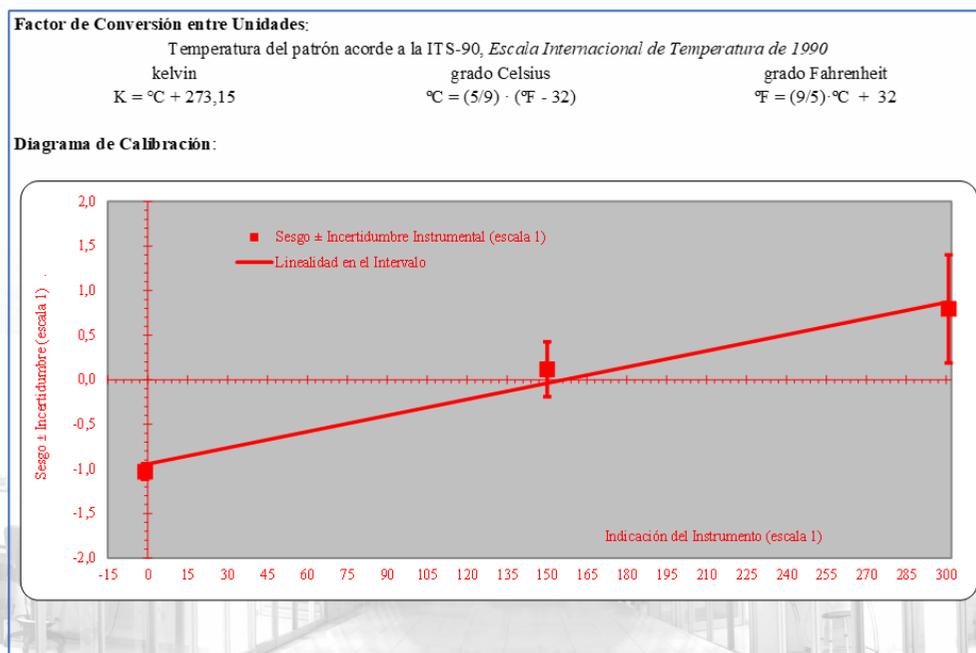
Cuadro (tabla) y diagrama (gráfica) de calibración, de errores de ajuste e incertidumbres instrumentales, reportados en °C (grados Celsius).

U_2 (Teórica). La incertidumbre instrumental declarada, considera la "inhomogeneidad" de los alambres de termopar de acuerdo con: EURAMET cg-8 (vigente). Lo cual considera su uso a profundidades de inmersión diferentes a las de calibración.

Evaluación de la Estabilidad y Deriva por Efectos de Inhomogeneidad @ TC-base-usados Tolerancia ASTM E 230 & IEC 60584-1.

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN						
Cuadro (tabla) de Calibración:						
Magnitud: Temperatura (de contacto por inmersión)				Modo: Medición		
Patrón			Instrumento: Termómetro: Sensor Termopar tipo "K" Desnudo + Indicador Digital			
Valor de Referencia de la Magnitud			Indicación Promedio	Sesgo Instrumental e	Incertidumbre Instrumental U	
°F	K	°C	°C	°C	°C	
32,00	273,151	0,001	-1,0	-1,0	±0,1	
301,97	423,13	149,98	150,1	0,1	±0,3	
572,3	573,31	300,16	301,0	0,8	±0,6	

Las indicaciones, sesgos e incertidumbres instrumentales son resultado del promedio de las mediciones.
La incertidumbre instrumental declarada, considera la inhomogeneidad de los alambres de termopar de acuerdo con: EURAMET cg-8 (vigente). Lo cual considera su uso a profundidades de inmersión diferentes a las de calibración.
Observaciones: No se realizó ajuste. Puntos de calibración a solicitud del cliente.



Evaluación de la Estabilidad y Deriva por Efectos de Inhomogeneidad

Dado que los termopares pueden estar fabricados con diferentes normativas, se presenta el análisis comparativo de la Capacidad de Medición (CM) encontrada durante la calibración $[|e| + U]$ con respecto a las tolerancias indicadas por la norma Internacional (IEC 60584-1) y Estadounidense (ASTM E 230) para sus diferentes Clases o Especificación de Exactitud.

Resultado Conforme $CM \leq T$ tolerancia

Resultado No Conforme $CM > T$ tolerancia

La Clase de Exactitud o Especificación no considera el Valor Nominal calibrado en su Intervalo de Medición

Evaluación de la Conformidad @ TC-base-usados, Tolerancia ASTM E230 & IEC 60584-1

Valor Nominal	CM $ e + U$	IEC 60584-1			ASTM E230	
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Especial	Normal
		-40...1000 °C	-40...1200 °C	-200...40 °C	0...1250 °C	-200...0 °C & 0...1250 °C
°C	°C	°C	°C	°C	°C	
0	$\pm 1,1$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 1,1$	$\pm 2,2$
150	$\pm 0,43$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	-	$\pm 1,1$	$\pm 2,2$
300	$\pm 1,4$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	-	$\pm 1,2$	$\pm 2,3$

Reglas de Decisión:

Confirmación metroológica [ILAC G 8, ISO 10012, GUM]. Declaración binaria, basada en la 'aceptación simple' o 'riesgo compartido'. $CM = [|e| + U] \leq EMP_{m\acute{a}x}$; $U' = [|b| + U] \leq EMP_{m\acute{a}x}$

$P_c^* =$ Probabilidad de Conformidad

$p_c^* =$ Nivel de Riesgo

$p_c \geq 97,7\%$

riesgo $< 2,3\%$

Notas:

Referencia ASTM E 220

1. Este método de ensayo (Calibración) se puede utilizar para la verificación de la conformidad de los materiales de los termopares con las tolerancias de temperatura para especificaciones como las tablas de la Especificación E230 u otras especificaciones especiales requeridas para fines comerciales, aplicaciones militares o de investigación.

2. Los termopares de metal base sufren cambios con el uso a alta temperatura, que a menudo los hacen inadecuados para la recalibración. Por lo tanto, estos termopares no deberán ser recalibrados.

Referencia EURAMET cg 08

1. Con el tiempo y el uso, la degradación del termopar y su calibración es inevitable a largo plazo, por lo tanto, se debe establecer y mantener un esquema de comprobaciones regulares (preferible *in-situ*) y eventuales reemplazos (periódicos programados). TC-base @ altas temperaturas, se recomienda reemplazarlos en lugar de recalibrarlos.

Calibración-Verificación o ensayo SAT. Método de medición directa

Se informan: tabla y gráfica de Desviación (sesgo + gradiente) \pm Incertidumbre (inestabilidad) instrumental.

Evaluación de la Estabilidad y Deriva por Efectos de Inhomogeneidad @ Tolerancia ASTM E 220 & IEC 60584-1.

Instalado en Condiciones de operación, profundidad de inmersión y perfil térmico.

REFERENCIAS (NORMALIZACIÓN)

- AMS 2750 G. (2022), *Pyrometry*. Revision G, 2022-06-09. SAE Society of Automotive & Aerospace Engineers International, AMS Aerospace Material Specifications.
- ANSI MC96.1-1982. (1982). *American National Standard. Temperature Measurement Thermocouples*. ISA, Instrument Society of America. 1982-agosto-12.
- ASTM E220-19. (2019). *Standard Test Method for Calibration of Thermocouples By Comparison Techniques*. Última actualización 2021-mayo-14.
- ASTM E230/E230M-17. (2017). *Standard Specification for Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples*. Última actualización 2017-diciembre-04.
- ASTM E1751/E1751M-20. (2020). *Standard Guide for Temperature Electromotive Force (emf) Tables for Non-Letter Designated Thermocouple Combinations*. Última actualización 2021-mayo-14.
- ASTM E2846-20. (2020). *Standard Guide for Thermocouple Verification*. Última actualización 2021-mayo-14.
- ASTM MNL 12. (antes STP 470B) (1993). *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement*. 4a edición
- Bentley, Robin E. (1998). *Theory and Practice of Thermoelectric Thermometry, Handbook of Temperature Measurement, Volume 3*. Springer & CSIRO, National Measurement Laboratory, Australia.
- CCT-BIPM. (2021). *Guide to Secondary Thermometry. Thermocouple Thermometry: 1. General Usage*. 2021-09-06. CCT, Consultative Committee for Thermometry. BIPM, Bureau International des Poids et Mesures.
- CQI-9-4. (2020). *Special Process: Heat Treat System Assessment*. 4th Edition, 2020-jun. AIAG, Automotive Industry Action Group.
- EURAMET Calibration Guide No. 8. (2020). *Guidelines on the Calibration of Thermocouples*. Versión 3.1, 2020-febrero.
- EURAMET Technical Guide No. 2. (2015). *EURAMET Guide on Lifetime and Drift/Stability Assessment of Industrial Thermocouples*. Versión 1.0, 2015-mayo.
- IEC 60584-1:2013. (2013). *Thermocouples—Part 1: EMF specifications and tolerances*. Edición 3.0, 2013-08.
- IEC 61515:2016. (2016). *[MIMS] Mineral insulated metal-sheathed thermocouple cables and thermocouples*. Edición 2.0, 2016-04
- IEC 62651:2013. (2013). *Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – Thermocouples: characteristics and test methods*. Edición 1.0, 2013-04.
- ISO/IEC 17025:2017. (2017). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. 2017-noviembre.
- ISO/IEC Guide 99:2007. (2010). *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM, 3th ed)*. Fecha publicación: 2007-12, versión corregida (en): 2010-09. equivalente a JCGM 200:2008.