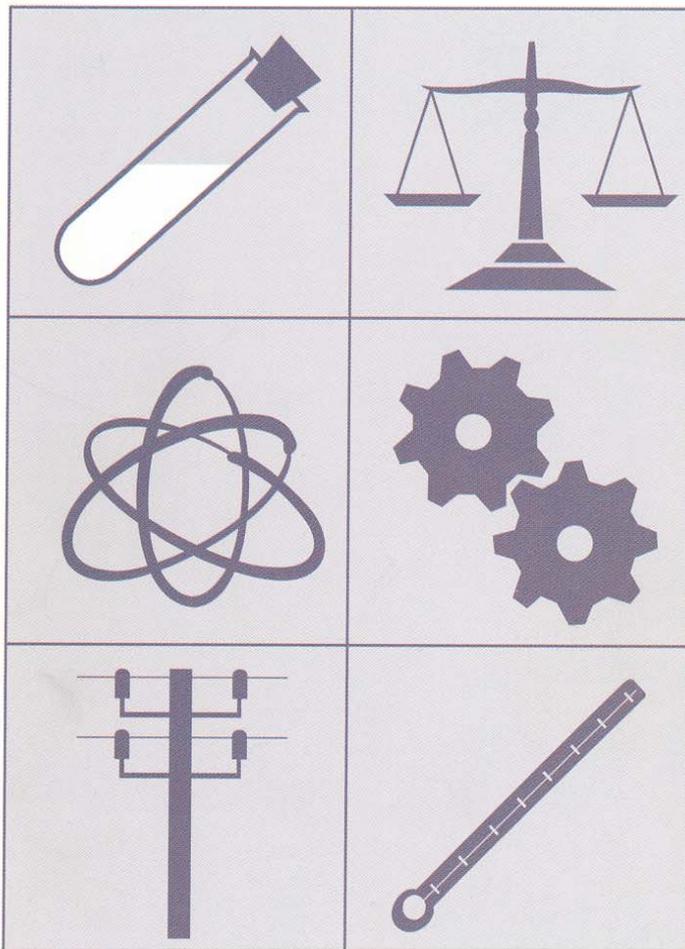


PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO EL- 018 PARA LA CALIBRACIÓN DE CONVERTIDORES TÉRMICOS DE INTENSIDAD DE CORRIENTE

m 08



MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO

CEM
CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

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

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

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

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

Correo electrónico
cem@cem.es



ÍNDICE

	Página
1. OBJETO	4
2. ALCANCE.....	4
3. DEFINICIONES	4
4. GENERALIDADES	9
5. DESCRIPCIÓN.....	19
5.1. Equipos y materiales	19
5.2. Operaciones previas.....	21
5.3. Proceso de calibración	23
5.4. Toma y tratamiento de datos	25
6. RESULTADOS	27
6.1. Cálculo de incertidumbres	27
6.2. Interpretación de resultados	34
7. REFERENCIAS	35
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración.....	35
7.2. Otras referencias para consulta	36
8. ANEXOS.....	37
ANEXO I: Ejemplo cálculo de la incertidumbre de calibración de un Convertidor Térmico de Intensidad de Corriente.....	38
ANEXO II: Cálculo de las diferencias de transferencia CA/CC de un Convertidor.....	43
ANEXO III: Condiciones particulares de la medida. Eliminación de errores	47



1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de convertidores térmicos de Intensidad de Corriente Eléctrica, identificados con el número 05.01 en la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica [1]; (ver también identificación 07.01 y 07.02: "shunts de corriente alterna").

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se aplica a todos los convertidores térmicos de intensidad de corriente, Incluyendo al conjunto formado por convertidor térmico-"shunt", para valores de intensidad entre aproximadamente 2,5 mA y 100 A y frecuencias comprendidas entre 10 Hz y 100 kHz.

Es de aplicación tanto a los convertidores térmicos cuyo principio de funcionamiento es un termopar cuya relación de tensiones de entrada-salida sigue una ley cuadrática, como a aquellos basados en un sensor de estado sólido cuya relación de tensiones es lineal.

3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [6] y en particular las que se indican a continuación.

Ajuste (de un sistema de medida) [6] (3.11)

Conjunto de operaciones realizadas en un sistema de medida de forma que este mida dentro de sus especificaciones.

NOTA 1 Los ajustes pueden ser de "cero", "offset" y ganancia.

NOTA 2 No debe confundirse ajuste con calibración.

NOTA 3 Después del ajuste es necesaria una recalibración.



Calibración [6] (2.39)

Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, en un primer paso, la relación entre los valores de unos patrones con sus incertidumbres y las indicaciones correspondientes con las incertidumbres de medida asociadas, y en un segundo paso utiliza esta información para establecer una relación que permite obtener un resultado de medida de una indicación.

NOTA 1 La incertidumbre de medida necesariamente aumenta con las secuencias de calibración.

NOTA 2 Los elementos de la cadena de calibraciones son los patrones y los sistemas de medida de acuerdo a procedimientos de medida

NOTA 3 De acuerdo a esta definición la “referencia” puede ser, la definición de una unidad mediante su realización práctica, un procedimiento de medida o un patrón

NOTA 4 Una comparación entre dos patrones puede ser considerada como una calibración, si la comparación se utiliza para comprobar, y en caso necesario corregir el valor y las incertidumbres de medida atribuidas a uno de los patrones

Desviación típica experimental [5] (B.2.17):

Para una serie de n mediciones de un mismo mensurando, la magnitud s que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

siendo x_i el resultado de la i-ésima medición y siendo la media aritmética de las n mediciones consideradas:



$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

NOTA La expresión s / \sqrt{n} es un estimador de la desviación típica de la distribución de la media de x y se denomina desviación típica experimental de la media.

Factor de disipación, D :

Parámetro que caracteriza las pérdidas del condensador. Su valor se establece a partir de la relación entre la potencia disipada en los elementos resistivos del condensador y la energía almacenada en el propio condensador.

Incertidumbre de medida [6] 2.26

Parámetro no negativo, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando, basado en la información utilizada.

NOTA 1 La incertidumbre de medida incluye las componentes debidas a efectos sistemáticos, como pueden ser los asociados a correcciones, a los valores asignados a los patrones, o a la incertidumbre de definición. En algunas ocasiones en lugar de corregir los errores sistemáticos, se incorporan como componentes de incertidumbre asociadas a los mismos.

NOTA 2 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica (o un múltiplo de ésta) o la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado.

NOTA 3 La incertidumbre de medida comprende, en general, varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y



pueden caracterizarse por sus desviaciones típica experimentales (evaluación tipo A). Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones típica, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones (evaluación tipoB).

NOTA 4 Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor del mensurando, y que todos los componentes de la incertidumbre, comprendidos los que provienen de efectos sistemáticos, tales como los componentes asociados a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

Trazabilidad metrológica [6] (2.41)

Propiedad del resultado de una medición que puede relacionarse con una referencia, por medio de una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, contribuyendo cada a la incertidumbre de medida.

NOTA 1 De acuerdo a esta definición una referencia puede ser la definición de una unidad y su realización practica o un procedimiento de medida incluyendo la unidad de medida o un patrón.

NOTA 2 La trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración.

NOTA 3 La especificación de la referencia debe incluir el momento en que la referencia fue utilizada para establecer la jerarquía de calibración, conjuntamente con cualquier otra información metrológica relevante como cuando se realizó la primera calibración.

NOTA 4 Para aquellas medidas cuyo modelo requiera más de una magnitud de entrada, cada magnitud debe ser metrológicamente trazable y la jerarquía de calibraciones debe constituir una estructura de ramas o una red. El esfuerzo necesario para establecer la trazabilidad metrológica de cada magnitud de entrada debe ser ponderado con su contribución relativa al resultado de la medida.



NOTA 5 La trazabilidad metrológica no garantiza que la incertidumbre de medida sea la adecuada para un objetivo determinado o la ausencia de fallos.

NOTA 6 La comparación de dos patrones puede ser considerada como una calibración si la comparación es utilizada para comprobar y si es necesario corregir el valor y la incertidumbre asignada a uno de los patrones.

NOTA 7 La ILAC considera que los elementos que confirman la trazabilidad metrológica son una cadena ininterrumpida de calibraciones a patrones nacionales o internacionales, una incertidumbre de medida documentada, un procedimiento de medida documentado, competencia técnica acreditada, trazabilidad metrológica al SI, e intervalos de calibración (ILAC P-10:2002).

NOTA 8 El término abreviado “trazabilidad” es utilizado algunas veces para significar trazabilidad metrológica así como otros conceptos, “trazabilidad de la muestra”, “trazabilidad documentada”, “trazabilidad de un instrumento”, “trazabilidad de un material” cuando se quiere significar la traza histórica de un objeto. Por ello es preferible utilizar el término completo de trazabilidad metrológica cuando exista riesgo de confusión.



4. GENERALIDADES

En el sistema internacional de unidades, (S.I.), la unidad básica eléctrica es la de intensidad de corriente continua (CC), el Amperio. El Amperio es muy difícil de realizar en la práctica por lo que se mantiene y difunde a partir de las unidades de tensión (Voltio) y resistencia eléctrica (Ohmio), haciendo pasar la corriente a calibrar por una resistencia conocida y midiendo la tensión en sus terminales.

En metrología, la medida de tensiones e intensidades en corriente alterna (CA), está directamente referida a la corriente continua (CC), mediante el uso de patrones de transferencia CA-CC.

Para la medida de corriente CA, se utilizan equipos que comparan el valor eficaz (rms) de la corriente alterna aplicada con el valor equivalente de corriente CC, es decir, aquel que produzca la misma cantidad de calor en el mismo tiempo y sobre la misma resistencia. Para la comparación se aplica al patrón una señal alterna y se mide la salida; después se aplica una intensidad continua tal que produzca la misma tensión de salida: en estas condiciones el valor eficaz de la tensión alterna será igual al valor de la señal en continua generada.

Los patrones de transferencia utilizados para este fin consisten en un conjunto de resistencias de cuatro terminales, dos de tensión y dos de intensidad, denominadas “shunts” conectadas en paralelo a convertidores térmicos de tensión. Ambos dispositivos constituyen lo que se conoce como convertidores térmicos de corriente (CTI), Fig. 1.

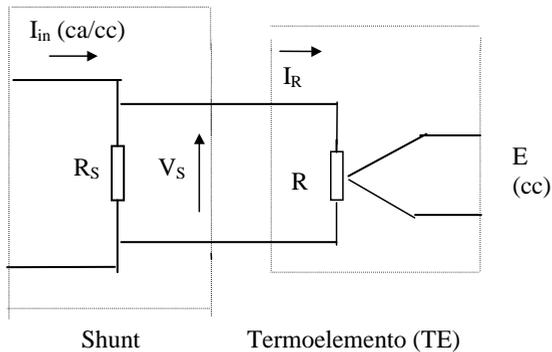


Figura 1

La intensidad de corriente se aplica a los terminales de entrada, de corriente, del “shunt”, obteniendo una tensión V_s en los terminales de salida, de tensión, de esta manera la resistencia de caldeo queda perfectamente definida.

Los valores que caracterizan a un convertidor térmico de corriente son, básicamente, los siguientes:

- Campos de intensidad de corriente y frecuencia de utilización.
- Tensión nominal de salida.
- Impedancia de entrada y salida.
- Error de inversión de corriente.
- Diferencias de transferencia CA/CC.
- Incertidumbres de calibración.
- Valor del factor, n , que caracteriza la función que relaciona la intensidad de corriente de entrada con la tensión de salida.
- Tipo de conectores de entrada y salida.

Los valores de resistencia de los “shunts” pueden variar desde milésimas de ohmios hasta las decenas de ohmios para conseguir tensiones de 0,3 V a 1 V, con corrientes desde miliamperios hasta 100 A y para frecuencias comprendidas entre 10 Hz y 100 kHz



(dependiendo del valor de intensidad de corriente aplicada). Los “shunts” se suelen fabricar de varias capas de películas de manganina y diseñar de manera que cumplan ciertas características como:

- Bajo coeficiente de temperatura, con el fin de evitar que la disipación de potencia sea alta.
- Valor constante en el tiempo del valor de la resistencia.
- Efectos termoeléctricos despreciables.
- Baja reactancia para conseguir una buena respuesta en frecuencia.

En ocasiones los “shunts” vienen incorporados dentro de instrumentos multirango. Algunos de ellos incluyen además de un número dado de “shunts” independientes, un amplificador interno (“shunts” activos).

Normalmente, para conseguir medidas de baja incertidumbre se utilizan dispositivos individuales para cada intensidad de corriente, es decir, cada “shunt” se conecta permanentemente a un convertidor determinado y se calibra el conjunto como un instrumento único.

Las características básicas de un CTI son:

- Intensidad nominal de entrada.
- Tensión de salida.
- Impedancia de entrada.
- Resistencia de salida.
- Diferencia de transferencia CA_CC.
- Error diferencia directa-inversa.
- Desviación de la ley de respuesta cuadrática o lineal (valor de n).
- Sobrecarga que pueda soportar a la entrada sin alterar su exactitud.

Al ser la salida del termoelemento (TE) una función de la potencia disipada en el calentador, esta varía aproximadamente con el cuadrado de la corriente de calentamiento; así pues la relación entre la salida y la entrada sigue aproximadamente una ley cuadrática.

$$E = f(I_{in}) = k \cdot I_{in}^n ; \quad n \cong 2 \quad (1)$$



Actualmente, existen en el mercado patrones de transferencia CA/CC, basados en un sensor de estado sólido. En este tipo de patrones, la relación entre la intensidad de corriente de entrada y la tensión de salida es lineal, es decir $n \cong 1$.

El valor exacto del coeficiente, n , nos es dado por el fabricante. Es una característica de cada convertidor y viene determinado por su diseño y construcción. Este coeficiente puede determinarse experimentalmente midiendo la variación que produce a la salida una variación conocida en la entrada.

En la práctica, las características de un TE no son ideales, debido a la presencia de efectos termoeléctricos y dependencias con la frecuencia, por lo que la igualdad de las salidas en CA y CC, no indica necesariamente que las tensiones de entrada sean iguales. La desviación de un convertidor térmico del modelo ideal se denomina diferencia de transferencia CA/CC o error de transferencia, δ , y este debe ser determinado en la calibración de cada convertidor. Además, en el proceso de transferencia CA-CC tenemos que tener en cuenta la existencia del error diferencia directa-inversa CC o error de inversión, por lo que necesitamos aplicar tensiones CC para ambas polaridades de la corriente.

La diferencia de transferencia CA-CC en intensidad de corriente, δ , por analogía con la definición utilizada en tensión, se define como:

$$\delta = \frac{I_{CA} - I_{CC}}{I_{CC}} \Big|_{E_{CA} = E_{CC}} \quad (2)$$

con
$$I_{CC} = \frac{I_{CC}^+ + I_{CC}^-}{2},$$

y siendo:



I_{CA} : Intensidad de corriente alterna de entrada, aplicada a los convertidores.

I_{CC} : Intensidad de corriente continua de entrada, (media de las dos polaridades), aplicada a los convertidores.

E_{CA} : Tensión continua de salida de los convertidores, cuando aplicamos a la entrada Intensidad de corriente alterna.

E_{CC} : Tensión continua de salida de los convertidores, cuando aplicamos a la entrada Intensidad de corriente continua.

NOTA:

Para el cálculo de la δ , I_{CC} e I_{CA} , son tales que produzcan la misma tensión de salida $E_{CA} = E_{CC}$.

La diferencia de transferencia CA-CC de un CTI a calibrar, δ_T , se determina comparándolo con un CTI patrón cuyas diferencias de transferencia CA-CC, δ_P , sean pequeñas y bien conocidas. Los dos CTI se conectan en serie, aplicando sucesivamente a corrientes CA y CC, siguiendo una secuencia de medida del tipo CA, CC+, CC-, CA, para conseguir eliminar errores CC y minimizar los efectos de la deriva a la salida de los CTI, siempre que las medidas se tomen a intervalos de tiempo iguales.

Las tensiones de salida de ambos CTI se leen en un voltímetro de rango y resolución adecuado.

Las medidas de $\delta_T - \delta_P$, se pueden realizar básicamente mediante dos métodos, [7]:

- 1) Método de nulo.
- 2) Método de deflexión.

1) En el método de nulo, los valores de $\delta_T - \delta_P$ se obtienen directamente a partir de los valores de intensidades de corriente CC y CA que se aplican a la entrada de los CTIs. Primero se aplica la intensidad de corriente CA a los dos CTIs y se toman las lecturas de los voltímetros; después se aplican consecutivamente



intensidades de corriente CC+, CC-, variando las intensidades para obtener la misma lectura que en alterna, tanto en el patrón ($I_{CC}(p)$) como en el CTI a calibrar ($I_{CC}(T)$).

La intensidad de corriente CA, se aplica de nuevo al final para asegurarse de que no se han producido derivas apreciables.

La diferencia CA-CC se suele expresar en % (10^{-2}) ó $\mu\text{A} / \text{A}$ (10^{-6}).

De la definición:

$$\delta = (I_{CA} - I_{CC}) / I_{CC}$$

$$I_{CA} = I_{CC}(T) (1 + \delta_T)$$

$$I_{CA} = I_{CC}(p) (1 + \delta_p)$$

Al ser I_{CA} la misma, pues los dos CTIs están en serie y despejando δ_T , se obtiene:

$$\delta_T = \frac{I_{CC}(p)}{I_{CC}(T)} (1 + \delta_p) - 1 \quad (3)$$

Este procedimiento tiene el inconveniente de que el tiempo de los ajustes es muy largo y si la deriva de la salida del CTI es grande durante el tiempo requerido para el ajuste, se pueden obtener malos resultados.

2) Método de deflexión.

Actualmente se utilizan para la calibración de convertidores, métodos de deflexión, en los que la diferencia de transferencia CA-CC, δ , se calcula a partir de los valores de tensión continua obtenidos a la salida de los CTI. El método de medida más utilizado es el llamado de doble canal. En este sistema se conectan a la salida de los CTI, dos voltímetros para tomar las lecturas de tensión continua que obtenemos cuando aplicamos sucesivamente



intensidad de corriente alterna y continua para ambas polaridades de la corriente. A partir de estos valores, obtenemos la diferencia de transferencia del CTI a calibrar en función de la δ_p del patrón mediante la fórmula (ver referencia [8] y anexo II de este procedimiento):

$$\delta_T = \delta_p + \frac{E_{Ap} - E_{Cp}}{n_p E_{Cp}} - \frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}}, \quad \text{con} \quad (4)$$

$$E_{CT} = \frac{E_{CT}^+ + E_{CT}^-}{2} \quad \text{y} \quad E_{Cp} = \frac{E_{Cp}^+ + E_{Cp}^-}{2}$$

Para poder obtener buena exactitud, utilizando esta ecuación, es importante minimizar las diferencias ($E_{Ap} - E_{Cp}$) y ($E_{AT} - E_{CT}$). Esto se puede conseguir ajustando la tensión de entrada de manera que $|E_{Ap} - E_{Cp}| < 100 \mu\text{A} / \text{A}$. Por otro lado, las lecturas tomadas de los dos voltímetros de salida han de ser en lo posible, simultáneas a fin de evitar errores de deriva.

En este procedimiento vamos a desarrollar este último método por ser el mas utilizado y poderse emplear para comparar convertidores de diferentes salidas.

Normalmente las fuentes de corriente utilizadas, tanto de CC como de CA, son generadores de tensión de alta exactitud, cuya salida se conecta a un amplificador de transconductancia. El amplificador de transconductancia, convierte la tensión aplicada a sus terminales de entrada, tanto en CC como en CA, en una corriente directamente proporcional a dicha tensión y del mismo tipo (reproduce todas las características de polaridad, frecuencia, fase, etc. de la tensión de entrada), estando la exactitud de la intensidad de corriente, referida a la exactitud de la tensión de entrada. De esta manera, se puede utilizar para la conmutación entre las dos fuentes, un conmutador de tensión (más preciso y fácil de conseguir que los de corriente), conectado a la entrada del amplificador, con lo que se consigue mantener el circuito de corriente siempre cerrado. Un problema de los generadores, de intensidad actuales es que suelen formar parte



de un calibrador multifunción y el margen de intensidad suministrado es muy bajo, normalmente inferior a 2 A, mientras que los "shunts" que existen actualmente en el mercado tienen capacidad de medida hasta 100 A. Los amplificadores de transconductancia también solucionan este problema.

Cuando se quieran utilizar los "shunts" y los convertidores térmicos de tensión por separado, en la mayoría de los casos (medios y altos valores de intensidad) podremos considerar que la diferencia de transferencia CA-CC del conjunto "shunt" y termoelemento, δ_C , es prácticamente igual a la suma de la diferencia de transferencia de la admitancia del "shunt", δ_{Sh} , y de la impedancia del termoelemento, δ_{Te} . En algunos casos y dependiendo de la exactitud requerida en la calibración se deberán tener en cuenta algunas correcciones en el cálculo final de las δ , ver referencia [9]. Esto no es posible a bajas corrientes (menores que 250 mA), ya que los termoelementos llevan la mayor parte de la corriente total. Cuando esto sea posible se pueden intercambiar "shunts" de distintos valores con varios termoelementos para conseguir un amplio campo de medida.

Símbolos y abreviaturas

a_d : Valor máximo de deriva del error del patrón.

a_r : Máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución de los voltímetros.

CA: Corriente alterna.

CA/CC: corriente alterna/corriente continua.

CC+, CC-: Corriente continua para ambas polaridades.

CTC: Convertidor Térmico de Tensión.

CTI: Convertidor Térmico de Intensidad de corriente.

CTIs: Convertidores Térmicos de Intensidad de corriente.



δ : Diferencia de transferencia CA/CC.

δ_T : Diferencia de transferencia del patrón a calibrar.

$\Delta_{\delta_T}^-$: Corrección debida a la dispersión de los resultados.

δ_P : Diferencia de transferencia del CTI utilizado como patrón.

E : Tensión continua de salida.

E_{Ap} : Indicación del voltímetro conectado a la salida del convertidor patrón, cuando se aplica la señal de intensidad de corriente alterna a la entrada de los convertidores.

E_{Cp} : Indicación del voltímetro conectado a la salida del convertidor patrón, cuando se aplica la señal de intensidad de corriente continua a la entrada de los convertidores.

E_{AT} : Indicación del voltímetro conectado a la salida del convertidor a calibrar, cuando se aplica la señal de intensidad de corriente alterna a la entrada de los convertidores.

E_{CT} : Indicación del voltímetro conectado a la salida del convertidor a calibrar, cuando se aplica la señal de intensidad de corriente continua a la entrada de los convertidores.

F : Frecuencia de medida.

I_{CA} : Intensidad de corriente en corriente alterna.

I_{CC} : Intensidad de corriente en corriente continua.

I_{in} : Intensidad de corriente de entrada.

N : Número de medidas realizadas.

n_P : Coeficiente n , del CTI patrón.



n_T : Coeficiente n, del CTI a calibrar.

TE: Termoelemento.

$u(\delta_{pder})$: Incertidumbre debida a la deriva del patrón.

$u(\delta_{pcert})$: Incertidumbre de calibración del CTI patrón.

$u(E_{xxrep})$: Incertidumbre asociada a la repetibilidad de los voltímetros.

$u(E_{xxres})$: Incertidumbre asociada a la resolución de los voltímetros.



5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario disponer de un sistema de medida compuesto por los siguientes equipos:

- Un convertidor térmico de intensidad de corriente, que actuará como patrón en la calibración, cuyas δ , sean conocidas y cuya exactitud debiera ser mejor que la del convertidor a calibrar.

El patrón de calibración de un laboratorio debe poseer un certificado de calibración en vigor, trazable.

- El convertidor térmico de intensidad de corriente que se quiera calibrar.
- Generador de Intensidad de corriente continua con un alcance en intensidad de corriente apropiado para la calibración.
- Generador de Intensidad de corriente alterna con un alcance en intensidad de corriente y frecuencia apropiado para la calibración.

NOTAS:

1. Si se dispone de un generador multifunción se puede utilizar como generador de intensidad de corriente continua y alterna, conmutando entre ambas funciones.
2. Aunque no es necesario conocer con gran exactitud el valor de entrada aplicado a los CTIs, los calibradores o generadores, deberían estar calibrados y tener una estabilidad a corto plazo lo suficientemente pequeña para que las variaciones en la salida de los CTIs debidas a este efecto, no contribuyan de manera apreciable a la incertidumbre total. En general una estabilidad relativa mejor de 10^{-3} es suficiente.



- Amplificador de transconductancia. Se utilizará junto con los generadores de intensidad para los casos en que los calibradores por si mismos, no tengan capacidad de suministrar la intensidad necesaria.

NOTA:

El conjunto formado por calibrador-amplificador deberá cumplir lo especificado en la nota anterior

- Conmutador, para el caso en el que se utilicen dos generadores.
- 2 voltímetros adecuados en rango y resolución, para medir la salida de los CTI.

NOTA:

Se utilizarán los voltímetros adecuados para medir con alta resolución, en función de las tensiones de salida de los convertidores.

Además serán necesarios:

- Un ordenador, cuando la calibración se realiza controlando los instrumentos mediante un software.
- Adaptadores y conectores necesarios para la conexión en serie de los CTI.
- Cables adecuados de baja fuerza electromotriz:
 - De los generadores de tensión al conmutador.
 - Del conmutador al conector de entrada.
 - De la salida de tensión de los convertidores térmicos a los voltímetros.
- Termómetro. Con él se tomarán los valores de la temperatura a la que se realiza la calibración, hasta la décima de grado.



5.2. Operaciones previas

Antes de iniciar la calibración se comprobará que:

- El instrumento a calibrar está identificado de forma permanente y unívoca, como puede ser con su marca, modelo y número de serie; si no lo estuviera se le asignará una identificación unívoca que se fijará sobre el instrumento para poder asociarle los resultados de esta calibración y de las que se le hagan en el futuro.
- Todos los bornes están marcados de forma que puedan ser identificados sin ambigüedad.
- Se dispondrá del manual de todos los equipos utilizados en la calibración, para su conexión y utilización correcta. Asimismo, se dispondrá del manual del patrón.
- Se verificará que todos los equipos y patrones funcionan correctamente, conectándolos, revisando que no tienen golpes, ni daños que puedan afectar a su operatividad, etc. Si funcionara con batería se comprobará su estado.
- Antes de iniciar las medidas, el equipo a calibrar deberá permanecer en el laboratorio donde se van a realizar las medidas un mínimo de 24 horas para alcanzar su equilibrio térmico. Los generadores, amplificadores, voltímetros y patrones han de estar un cierto tiempo (ver especificaciones de cada equipo) conectados, antes de realizar las medidas para su estabilización térmica.
- Deberán mantenerse unas condiciones de referencia (ambientales, tensión, etc...) adecuadas para el CTI patrón y para CTI a calibrar. Estas condiciones de referencia serán las que indique el fabricante en el manual del aparato. (Generalmente, los laboratorios de medida de magnitudes eléctricas tienen la temperatura controlada a 23 ± 2 °C). El patrón de referencia de un laboratorio no debería moverse de su emplazamiento, porque no suelen tener buenas



características de transportabilidad y podría alterar sus propiedades metrológicas. La humedad relativa del aire ha de ser inferior al 70 %.

- Se deberán evitar en lo posible, corrientes de aire y perturbaciones electromagnéticas, que afecten de modo apreciable a la medida.
- Todo el sistema de medida, deberá estar correctamente apantallado, estableciéndose un punto del sistema como potencial de masa.

ADVERTENCIA: Tanto en el instrumento a calibrar como en la instrumentación utilizada para la calibración, están presentes, bien en los terminales externos o internamente, durante la realización de la calibración o de los ajustes y comprobaciones que fuera necesario realizar, tensiones peligrosas para las personas. Para evitar daños, deben ser observadas todas las precauciones de trabajos con tensión, siguiendo de forma ordenada la secuencia de operaciones indicadas en el procedimiento. En cualquier caso tomar como referencia las instrucciones facilitadas por los fabricantes de los distintos equipos en los manuales técnicos, para evitar riesgos al personal que realiza la calibración.

- Los terminales de “tierra” y guarda se han de conectar a tierra y se unirán todas las guardas a la tierra general del sistema.
- El circuito de entrada de corriente y el de salida de tensión se deben conectar en un punto a tierra, a fin de evitar elevadas diferencias de potencial, durante las conmutaciones CA-CC, que podrían dañar seriamente al patrón de referencia.
- Asegurarse de que todos los equipos controlados por ordenador, estén direccionados adecuadamente.

5.3. Proceso de calibración

Se conectarán los equipos según se indica en la figura 2:

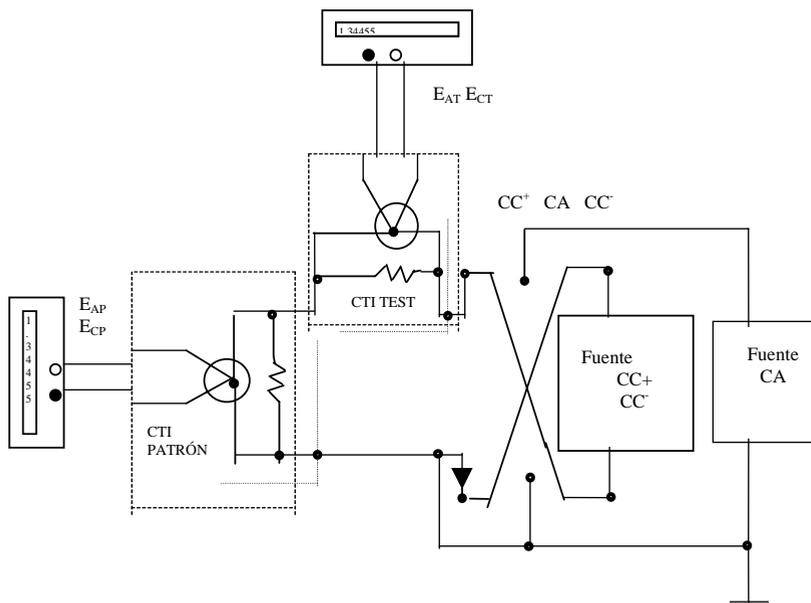


Figura 2

Se colocarán los generadores a la intensidad de corriente y frecuencia de calibración y los convertidores conectados en serie.

La calibración se realizará a la intensidad de corriente nominal del CTI a calibrar y a un número determinado de frecuencias comprendidas dentro del campo de utilización del CTI.



NOTA:

1. La calibración se realizará para un número de frecuencias que deben incluir los límites inferior y superior del margen de funcionamiento o de utilización del CTI a calibrar, así como el suficiente número de puntos intermedios que nos permita caracterizar de forma fiable la dependencia de la δ con la frecuencia.
2. Por ejemplo, para un CTI cuyo campo de funcionamiento en frecuencia esté comprendido entre 10 Hz y 100 kHz, una buena elección sería: 10 Hz, 50 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 70 kHz y 100 kHz.

Previo a las medidas, se ajustarán las intensidades de corriente de entrada de tal forma que:

$$|E_{Ap} - E_{Cp}| < 100 \mu A / A$$

En primer lugar se aplicará la intensidad de corriente CA a ambos CTIs, leyendo los valores obtenidos en los voltímetros, E_{AT} y E_{Ap} tras esperar un tiempo de estabilización de aproximadamente 100 s.

En segundo lugar se conectará, mediante el conmutador, una intensidad de corriente continua CC conocida del mismo valor que el eficaz que la intensidad de corriente alterna CA a la que se quiere calibrar el equipo y tras esperar un tiempo de estabilización similar al anterior se tomarán de nuevo las lecturas de los voltímetros, obteniendo: E_{CT}^+ y E_{Cp}^+ . Una vez hecho esto, se invierte la polaridad de la tensión continua y de nuevo se repite la operación anterior, obteniendo: E_{CT}^- y E_{Cp}^- .

La diferencia de transferencia CA/CC se obtendrá de, [8] :

$$\delta_T = \delta_P + \frac{E_{Ap} - E_{Cp}}{n_p E_{Cp}} - \frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}}$$

Las medidas para cada punto de intensidad de corriente y frecuencia se repetirán al menos 5 veces.

5.4. Toma y tratamiento de datos



Para cada punto de calibración se anotarán los siguientes datos:

- Valor de la intensidad de corriente alterna aplicada: Amplitud y frecuencia.
- Lecturas obtenidas en los voltímetros colocados a la salida de ambos CTIs: E_{Ap} , E_{AT} , E_{Cp}^+ , E_{Cp}^- , E_{CT}^+ , E_{CT}^- .

NOTA:

Si se toman varias medidas en los voltímetros, en la tabla se anotará el valor medio y se calculará la desviación típica correspondiente, para un posterior análisis de incertidumbres.

- Diferencia de transferencia CA/CC, δp , del CTI patrón, obtenida de su Certificado de calibración.
- Error asociado a la calibración en cada punto (Diferencia de transferencia, δ_T , del CTI a calibrar) y su desviación típica experimental correspondiente. En electricidad, lo usual es expresar el error de la medición en error relativo, en partes en partes en 10^2 (%), o partes en 10^6 ($\mu A / A$). En este caso al ser la magnitud a medir, una magnitud relativa, los valores obtenidos tanto del error, δ , como de su incertidumbre asociada, serán números adimensionales sin unidad, que normalmente se expresan en partes en 10^6 ($\mu A / A$).

A continuación se compararán los errores obtenidos con las tolerancias asignadas al CTI por el fabricante o con los valores preestablecidos por el laboratorio en función del historial y deriva del equipo. En el caso de que una vez determinados los errores, existiera duda sobre alguno de los valores obtenidos, por tratarse por ejemplo, de errores muy superiores a las tolerancias asignadas, se repetirá la calibración en esos puntos para confirmar la bondad de los resultados obtenidos.

La toma de datos se podrá realizar de forma manual o mediante ordenador y un bus de comunicación IEEE, que controle los



donde, δT , es la diferencia de transferencia del CTI a calibrar y $s(\delta T)$, es la desviación típica experimental asociada.

$$\overline{\delta_T} = \frac{\sum_{k=1}^n \delta_{T_k}}{n}; \quad s(\delta_T) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\delta_{T_k} - \overline{\delta_T})^2}{n-1}}$$

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la guía EA-4-02 y de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. [3].

En primer lugar se determinará la expresión de la magnitud de salida (que es la diferencia de transferencia del CTI en cada punto de calibración), en función de las distintas magnitudes de entrada.

Como resultado de la calibración se toma la diferencia de transferencia, δ_T , cuya expresión, considerando todas aquellas correcciones que afectan al resultado (aunque se asigne valor de corrección nulo) sería:

$$\delta_T = \Delta \overline{\delta_T} + \left\{ \delta_P + \frac{E_{AP} - (E_{CP}^+ + E_{CP}^-)/2}{n_p (E_{CP}^+ + E_{CP}^-)/2} - \frac{E_{AT} - (E_{CT}^+ + E_{CT}^-)/2}{n_T (E_{CT}^+ + E_{CT}^-)/2} \right\} \quad (5)$$

Aplicando la ley de propagación de las varianzas, considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, se obtiene:



$$\begin{aligned} u^2(\delta_T) = & u^2(\Delta\bar{\delta}_T) + u^2(\delta_P) + \left(\frac{1}{n_P(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)/2} \right)^2 u^2(E_{AP}) + \\ & \left(-\frac{2E_{AP}}{n_P(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)^2} \right)^2 u^2(E_{CP}^+) + \left(-\frac{2E_{AP}}{n_P(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)^2} \right)^2 u^2(E_{CP}^-) + \\ & \left(-\frac{1}{n_T(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)/2} \right)^2 u^2(E_{AT}) + \left(\frac{2E_{AT}}{n_T(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right)^2 u^2(E_{CT}^+) \\ & + \left(\frac{2E_{AT}}{n_T(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right)^2 u^2(E_{CT}^-) \end{aligned} \quad (6)$$

NOTA

No se han tenido en cuenta aquí, las contribuciones a la incertidumbre asociadas a los valores de n_P y n_T , ya que las podemos considerar despreciables en base a estudios realizados sobre algunos tipos de convertidores térmicos con los que actualmente se trabaja.

Para realizar una calibración de gran exactitud o cuando se quiera realizar un estudio detallado sobre las características de un CTI dado, el coeficiente, n , se puede calcular y valorar su incertidumbre, midiendo las variaciones que se obtienen en la salida ΔE , cuando aplicamos variaciones conocidas a la entrada, ΔI . Ver referencia [7].

6.1.1.- Asignación de las componentes de la incertidumbre.

- a) Primero se calculará la desviación típica experimental, para la que se utilizarán los datos obtenidos durante la calibración. (contribución a la incertidumbre de tipo A), $u(\Delta\bar{\delta}_T)$.



$$u(\Delta_{\bar{\delta}_T}) = s(\bar{\delta}_T)$$

donde : $s(\bar{\delta}_T) = \frac{s(\delta_T)}{\sqrt{n}}$ y $s(\delta_T)$ es la que se obtuvo en la sección 5.4.

b) Incertidumbre asociada al CTI patrón, $u(\delta_p)$.

La podemos expresar como la suma de varias contribuciones:

$$u^2(\delta_p) = u^2(\delta_{pcert}) + u^2(\delta_{pder})$$

siendo,

- Incertidumbre de calibración del CTI patrón, $u(\delta_{pcert})$. Se calcula a partir de la incertidumbre dada por el certificado de calibración, U_p , dividiendo por el factor de cobertura indicado (normalmente $k = 2$):

$$u(\delta_{pcert}) = U_p / k_p$$

NOTA:

En el caso de que en el certificado del patrón no figure el punto de calibración, o uno muy próximo, en el que se está calculando la incertidumbre se podrá tomar como U_p y k_p el valor máximo de U_p / k_p , en valor absoluto o si resultase más conveniente trabajando con valores relativos, de los indicados en el certificado de calibración del patrón.

- Corrección debida a la deriva del patrón, $u(\delta_{pder})$. Se obtiene a partir del historial de los CTIs, o en su defecto, de las especificaciones del fabricante. Se estimará de un límite máximo de esta deriva para el periodo de calibración establecido, o para el tiempo transcurrido desde la calibración del patrón si se quisiese optimizar.



Para hallar la incertidumbre típica se supondrá una distribución rectangular dividiendo, por tanto, el valor dado en especificaciones del fabricante o el valor máximo de deriva del error del patrón, a_d , por $\sqrt{3}$.

$$u(\delta_{p_{der}}) = \frac{a_d}{\sqrt{3}}$$

NOTAS:

1. No se ha tenido en cuenta la componente asociada a la repetibilidad del patrón utilizado, por considerarse despreciable frente a la incertidumbre de calibración.
2. Tampoco hemos considerado la componente debida a las variaciones de temperatura ambiente sobre los CTIs, ya que están contruidos de tal forma que, ésta sea despreciable.

c) Incertidumbre asociada a los voltímetros: $u(E_{AP})$, $u(E_{CP}^+)$, $u(E_{CP}^-)$, $u(E_{AT})$, $u(E_{CT}^+)$ y $u(E_{CT}^-)$.

La incertidumbre asociada a los voltímetros, la podemos expresar como,

$$u^2(E_{xx}) = u^2(E_{xxrept}) + u^2(E_{xxres})$$

siendo,

- $u(E_{xxrept})$, la incertidumbre asociada a la repetibilidad, que se obtendrá de la desviación típica experimental de la media de los valores de tensión tomados en el voltímetro.

Para este caso, en el que realizamos una sola medida en cada voltímetro para el cálculo de cada δ_T , la incertidumbre de repetibilidad la podemos obtener como:



$$u(E_{xxrept}) = s(\bar{E}_{xx}) / \sqrt{1},$$

Siendo $s(\bar{E}_{xx})$, la desviación típica obtenida en un estudio previo, de la repetibilidad del voltímetro.

- $u(E_{xxres})$, la resolución de los multímetros. En este caso, se considera el máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del multímetro como $\pm 0,5$ veces el último dígito (Res. = 0,5 dígitos), la incertidumbre típica se hallará suponiendo una distribución rectangular y dividiendo por tanto por $\sqrt{3}$. El valor de esta contribución se expresará en unidades homogéneas con el resto de contribuciones.

$$u(E_{xxres}) = \frac{ar}{\sqrt{3}}$$

NOTA

No se han considerado, las componentes de incertidumbre debidas a la calibración, deriva y variación con la temperatura de los voltímetros, ya que debido al método de calibración utilizado, estas no afectan al resultado final.

Presentamos en forma de tabla el resumen de todo el análisis de incertidumbres



Tabla I

Magnitud, X_i	Estimac , x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coficiente sensibilidad, c_i	Contribuc. Incert. $c_i \cdot u(x_i)$
$\Delta \bar{\delta}_T$	0	$\left(\frac{\sum_{j=1}^n (\delta_{Tj} - \bar{\delta}_T)^2}{n(n-1)} \right)^{1/2}$	1	$u_1(\delta_T) = 1 \cdot \left(\frac{\sum_{j=1}^n (\delta_{Tj} - \bar{\delta}_T)^2}{n(n-1)} \right)^{1/2}$
δ_P	δ_P	$\left((U_P / k_P)^2 + \left(\frac{ad}{\sqrt{3}} \right)^2 \right)^{1/2}$	1	$u_2(\delta_T) = 1 \cdot \left\{ (U_P / k_P)^2 + \left(\frac{ad}{\sqrt{3}} \right)^2 \right\}^{1/2}$
E_{AP}	E_{AP}	$\left\{ (s(\bar{E}_{AP}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$	$\left(\frac{1}{n_p(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)/2} \right)$	$u_3(\delta_T) = \left(\frac{1}{n_p(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)/2} \right) \cdot \left\{ (s(\bar{E}_{AP}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$
E_{CP}^+	E_{CP}^+	$\left\{ (s(\bar{E}_{CP}^+) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$	$\left(-\frac{2E_{AP}}{n_p(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)^2} \right)$	$u_4(\delta_T) = \left(-\frac{2E_{AP}}{n_p(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)^2} \right) \cdot \left\{ (s(\bar{E}_{CP}^+) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$
E_{CP}^-	E_{CP}^-	$\left\{ (s(\bar{E}_{CP}^-) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$	$\left(-\frac{2E_{AP}}{n_p(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)^2} \right)$	$u_5(\delta_T) = \left(-\frac{2E_{AP}}{n_p(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)^2} \right) \cdot \left\{ (s(\bar{E}_{CP}^-) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$
E_{AT}	E_{AT}	$\left\{ (s(\bar{E}_{AT}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$	$\left(\frac{1}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)/2} \right)$	$u_6(\delta_T) = \left(\frac{1}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)/2} \right) \cdot \left\{ (s(\bar{E}_{AT}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$
E_{CT}^+	E_{CT}^+	$\left\{ (s(\bar{E}_{CT}^+) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$	$\left(\frac{2E_{AT}}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right)$	$u_7(\delta_T) = \left(\frac{2E_{AT}}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right) \cdot \left\{ (s(\bar{E}_{CT}^+) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$
E_{CT}^-	E_{CT}^-	$\left\{ (s(\bar{E}_{CT}^-) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$	$\left(\frac{2E_{AT}}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right)$	$u_8(\delta_T) = \left(\frac{2E_{AT}}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right) \cdot \left\{ (s(\bar{E}_{CT}^-) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right\}^{1/2}$
δ_T	$\bar{\delta}_T$			$\sqrt{\sum u_i^2(\delta_T)}$



NOTA:

Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de δ_r , respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado.

6.1.2.- Cálculo de la incertidumbre expandida.

Deben calcularse los grados de libertad efectivos del proceso de medida usando para ello la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{eff} = \frac{u^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (7)$$

En esta fórmula u es la incertidumbre combinada, u_i las distintas contribuciones individuales a la incertidumbre y v_i el número de grados de libertad efectivos asociados a la contribución con incertidumbre u_i .

Para una incertidumbre típica obtenida de una evaluación tipo A, el número de grados de libertad viene dado por $N-1$. Para incertidumbres tipo B, los grados de libertad se calculan como:

$$v_i \cong \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2},$$

El término $\Delta u(x_i) / u(x_i)$ representa la incertidumbre relativa de la incertidumbre $u(x_i)$. Esta cantidad se debe evaluar subjetivamente conforme al buen juicio científico basado en la información disponible. En ocasiones, al tratarse de incertidumbres tipo B en las que se supone una distribución rectangular, puede admitirse que la incertidumbre se conoce sin error, lo que implica que v_i tiende a ∞ .



Una vez calculado el número efectivo de grados de libertad, se determina el factor de cobertura k que corresponde a un intervalo de confianza del 95 % según la distribución de Student, ver referencia [4], Apéndice, tabla E-1.

Se calcula la incertidumbre expandida a partir de la incertidumbre combinada, multiplicando esta última por el factor de cobertura k obtenido.

$$U(\delta_T) = k u(\delta_T)$$

NOTA:

Si no se hubiesen realizado, p.e. sobre los patrones, correcciones conocidas no nulas, p.e. la corrección derivada del certificado de calibración de dichos patrones, estas deberán incorporarse a la incertidumbre de acuerdo con lo indicado en el apartado F.2.4.5 de la referencia [3], sumándose linealmente a $k.u(\delta_T)$ el valor máximo, b_{max} , de dicha corrección no realizada (expresado en las unidades adecuadas)

$$U = k.u(\delta_T) + b_{max}.$$

6.2. Interpretación de resultados

Se deberán establecer, en función del uso previsto para el CTI, unos límites de tolerancia de calibración para el valor de δ_T , a partir de los cuales se considerará adecuado o no para su uso. En función de los límites de tolerancia y de las incertidumbres obtenidas pueden distinguirse los siguientes casos:

- $\delta_T \pm u(\delta_T)$ dentro de los límites de tolerancia: El CTI puede destinarse libremente a su uso previsto.
- $\delta_T \pm u(\delta_T)$ fuera de los límites de tolerancia: El CTI debe retirarse del servicio y repararse, ajustarse, darse de baja o destinarse a una aplicación menos exigente.



- c) $\delta_T \pm u(\delta_T)$ parcialmente dentro de los límites de tolerancia: El CTI será tratado como en b) salvo que se resuelva la indeterminación (por ejemplo recalculando el resultado realizando todas las correcciones posibles).

NOTA

En el caso de que se proceda al ajuste o reparación del CTI, este deberá recalibrarse y será necesario disponer de datos antes y después de dicho ajuste o reparación.

Un período razonable para la recalibración de estos instrumentos será entre 6 y 12 meses, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente del uso que se realice del instrumento, y de la variación que se observe con el paso del tiempo. El usuario del equipo será siempre el responsable de asignar el período de recalibración, y de revisarlo cuando sea preciso, considerando, por ejemplo, los resultados obtenidos con respecto a las calibraciones anteriores y las tolerancias admisibles.

7. REFERENCIAS.

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración.

Manual de funcionamiento del CTI a calibrar.

Manual de funcionamiento del CTI patrón.

Manual de funcionamiento del sistema de medida (Fuentes, voltímetros y amplificador de transconductancia).



7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía.
- [2] Norma UNE-EN 30012-1. Requisitos de aseguramiento de la calidad de los equipos de medida. Parte 1: Sistemas de Confirmación Metrológica de los Equipos de Medida. Octubre 1994.
- [3] Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Versión Española. Centro Español de Metrología. 2ª Edición. Marzo 2000.
- [4] Guía EA-4/02. Expression of the uncertainty of measurement in calibrations. Edition 2. EA 1999.
- [5] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 3. 2001.
- [6] International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). JCGM 200:2008
- [7] The practical uses of AC-DC transfer instruments. Earl S. Willians. NBS. October 1982.
- [8] Using a linear thermal transfer standard for high precision AV/DV transfers. Don Matson. John Fluke Mfg. Co., Inc. PO Box C9090. Everett, WA 98206.
- [9] Joseph R. Kinard; AC-DC Difference Relationships for Current Shunts and Thermal Converter Combinations. IEEE Trans. On Instr. And measurement. Vol. 40. No. 2. April 1991.



8. ANEXOS

- ANEXO I: Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de calibración de un Convertidor Térmico de Intensidad de Corriente.
- ANEXO II: Cálculo de las diferencias de transferencia CA/CC de un Convertidor.
- ANEXO III: Condiciones particulares de la medida. Eliminación de errores.



ANEXO I. EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN DE UN CONVERTIDOR TÉRMICO DE INTENSIDAD DE CORRIENTE

Se han realizado las medidas de la calibración de un CTI en corriente alterna a 2,5 mA y 5 kHz, por comparación, siguiendo las instrucciones de este procedimiento.

Características del CTI patrón

El patrón de referencia es un convertidor térmico de intensidad de corriente continua con las siguientes características:

- Intensidad de corriente nominal de entrada: 5 mA
- Tensión nominal de salida: 250 mV
- Diferencia de transferencia CA/CC en este punto: 6 $\mu\text{A} / \text{A}$
- n : 1 (respuesta lineal)

El patrón posee un certificado de calibración en el que se indica que para este punto de medida, $U_p = 50 \mu \text{A/A}$ con un nivel de confianza 95,45 % con $k = 2$, habiéndose hecho la calibración a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Características del CTI a calibrar

Es un convertidor térmico de intensidad de corriente con las siguientes características:

- Intensidad de corriente nominal de entrada: 5 mA
- Tensión nominal de salida: 7 mV
- n : 2 (respuesta cuadrática)

Cálculo de la incertidumbre

Las medidas se realizaron con dos voltímetros digitales, de $7^{1/2}$ (lecturas del patrón) y $6^{1/2}$ (lecturas del instrumento a calibrar), para medir la tensión de salida de los CTIs.



Previamente se ha realizado un estudio sobre la repetibilidad de los voltímetros, obteniéndose una desviación típica $s = 0,5 \cdot 10^{-7}$ mV.

Todas las medidas se realizaron a una temperatura de $(23,1 \pm 2)$ °C y para una humedad del 61 %. La temperatura de referencia de todos los instrumentos es de 23 °C.

Las lecturas obtenidas en los voltímetros son:

T^a (°C) = 23,1 °C

Humedad(%) = 61%

Nº Rept.	I_{CA} (mA)	F (kHz)	δp (10^6)	Lecturas en los voltímetros						δ_T (10^6)
				E_{AP} (mV)	E_{CP}^+ (mV)	E_{CP}^- (mV)	E_{AT} (mV)	E_{CT}^+ (mV)	E_{CT}^- (mV)	
1	2,5	5	6	110,47079	110,69612	110,24445	2,599942	2,611396	2,588328	-93
2				110,47075	110,69615	110,24443	2,599941	2,611397	2,588325	-94
3				110,47070	110,69616	110,24442	2,599943	2,611399	2,588328	-94
4				110,47071	110,69615	110,24441	2,599942	2,611395	2,588330	-93
5				110,47080	110,69614	110,24440	2,599940	2,611400	2,588320	-93
				$\bar{\delta}_T$						-93
				$s(\delta_T)$						0,2

Ahora se calcula la incertidumbre de calibración, teniendo en cuenta todas las contribuciones.

a) Desviación típica experimental:

$$\Delta u(\bar{\delta}_T) = s(\bar{\delta}_T) = 0,2 / \sqrt{5} = 0,1 \mu A / A$$

b) Incertidumbre asociada al CTI patrón, $u(\delta_P)$:

- Según el certificado de calibración del patrón $U_p = 50 \mu A / A$ con $k = 2$.



Entonces,

$$u(\delta_{P_{cert}}) = U_p / k_p = 25 \mu A / A$$

- De la deriva del patrón: Se ha observado un error máximo por deriva en el periodo de calibración de $10 \mu A/A$,

$$u(\delta_{P_{der}}) = a_d / \sqrt{3} = 5,8 \mu A / A,$$

Por lo que, $u(\delta_p) = (u^2(\delta_{P_{cert}}) + u^2(\delta_{P_{der}}))^{1/2} = (25^2 + 5,8^2) = 25,66 \mu A / A$.

c) Incertidumbre asociada a los voltímetros:

- Repetibilidad, $u(E_{xxrept})$,

$$u(E_{xxrept}) = s(\bar{E}_{xx}) / \sqrt{1} = 0,5 * 10^{-7} \text{ mV}.$$

- Resolución, $u(E_{xxres})$,

$$u(E_{xPres}) = ar / \sqrt{3} = 0,000005 / \sqrt{3} \text{ mV} = 2,9 * 10^{-6} \text{ mV}.$$

$$u(E_{xTres}) = ar / \sqrt{3} = 0,0000005 / \sqrt{3} \text{ mV} = 2,9 * 10^{-7} \text{ mV}.$$

Luego las incertidumbres asociadas a los voltímetros serían:

$$\begin{aligned} u(E_{AP}) &= (u^2(E_{APrept}) + u^2(E_{APres}))^{1/2} = \\ &= ((0,5 * 10^{-7})^2 + (2,9 * 10^{-6})^2)^{1/2} = 2,90 * 10^{-6} \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u(E_{CP}^+) &= (u^2(E_{CP^+rept}) + u^2(E_{CP^+res}))^{1/2} = \\ &= ((0,5 * 10^{-7})^2 + (2,9 * 10^{-6})^2)^{1/2} = 2,90 * 10^{-6} \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u(E_{CP}^-) &= (u^2(E_{CP^-rept}) + u^2(E_{CP^-res}))^{1/2} = \\ &= ((0,5 * 10^{-7})^2 + (2,9 * 10^{-6})^2)^{1/2} = 2,90 * 10^{-6} \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u(E_{AT}) &= (u^2(E_{ATrept}) + u^2(E_{ATres}))^{1/2} = \\ &= ((0,5 * 10^{-7})^2 + (2,9 * 10^{-7})^2)^{1/2} = 2,94 * 10^{-7} \text{ mV} \end{aligned}$$

$$u(E_{CT}^+) = (u^2(E_{CT^+rept}) + u^2(E_{CT^+res}))^{1/2} =$$



$$= ((0,5 * 10^{-7})^2 + (2,9 * 10^{-7})^2)^{1/2} = 2,94 * 10^{-7} \text{ mV}$$

$$u(E_{CT}^-) = (u^2(E_{CT}^-_{rept}) + u^2(E_{CT}^-_{res}))^{1/2} =$$

$$= ((0,5 * 10^{-7})^2 + (2,9 * 10^{-7})^2)^{1/2} = 2,94 * 10^{-7} \text{ mV}$$

La incertidumbre típica combinada:

$$u^2(\delta_T) = (0,1 * 10^{-6})^2 + (25,66 * 10^{-6})^2 + \left(\frac{1}{(110)}\right)^2 * (2,90 * 10^{-6})^2 +$$

$$\left(-\frac{2}{(110)}\right)^2 * (2,90 * 10^{-6})^2 + \left(-\frac{2}{(110)}\right)^2 * (2,90 * 10^{-6})^2 +$$

$$\left(-\frac{1}{2 * 2,6}\right)^2 * (2,94 * 10^{-7})^2 + \left(\frac{1}{2,6}\right)^2 * (2,94 * 10^{-7})^2 + \left(\frac{1}{2,6}\right)^2 * (2,94 * 10^{-7})^2 =$$

$$= 1 * 10^{-14} + 6,58 * 10^{-10} + 6,95 * 10^{-16} + 2,78 * 10^{-15} + 2,78 * 10^{-15} + 3,20 * 10^{-15} +$$

$$+ 1,28 * 10^{-14} + 1,28 * 10^{-14} = 6,57 * 10^{-10}$$

$$u(\delta_T) = (6,57 * 10^{-10})^{1/2} = 2,56 * 10^{-5} \mu\text{A} / \text{A} \cong 26 \mu\text{A} / \text{A}$$

la U_{eff} es muy alta pues domina la incertidumbre de calibración del CTI patrón (incertidumbre de tipo B) y por lo tanto podemos suponer $k = 2$

La incertidumbre expandida, es $U = 52 \mu\text{A} / \text{A}$ con $k = 2$

A continuación un resumen del análisis de incertidumbres:



Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad, c_i	Contribuc. Incert. $c_i * u(x_i)$
$\Delta \bar{\delta}_T$	0	$0,1 * 10^{-6}$	1	$u_1(\delta_T) = 0,1 * 10^{-6}$
δ_P	$6 * 10^{-6}$	$25,66 * 10^{-6}$	1	$u_2(\delta_T) = 25,66 * 10^{-6}$
E_{AP}	E_{AP}	$2,90 * 10^{-6}$ mv	$\left(\frac{1}{110}\right) (\text{mV})^{-1}$	$u_3(\delta_T) = 2,64 * 10^{-8}$
E_{CP}^+	E_{CP}^+	$2,90 * 10^{-6}$ mv	$\left(-\frac{2}{110}\right) (\text{mV})^{-1}$	$u_4(\delta_T) = 5,27 * 10^{-8}$
E_{CP}^-	E_{CP}^-	$2,90 * 10^{-6}$ mv	$\left(-\frac{2}{110}\right) (\text{mV})^{-1}$	$u_5(\delta_T) = 5,27 * 10^{-8}$
E_{AT}	E_{AT}	$2,94 * 10^{-7}$ mv	$-\left(\frac{1}{2 * 2,6}\right) (\text{mV})^{-1}$	$u_6(\delta_T) = 5,66 * 10^{-8}$
E_{CT}^+	E_{CT}^+	$2,94 * 10^{-7}$ mv	$\left(\frac{1}{2,6}\right) (\text{mV})^{-1}$	$u_7(\delta_T) = 1,13 * 10^{-7}$
E_{CT}^-	E_{CT}^-	$2,94 * 10^{-7}$ mv	$\left(\frac{1}{2,6}\right) (\text{mV})^{-1}$	$u_8(\delta_T) = 1,13 * 10^{-7}$
δ_T	$\bar{\delta}_T$	$-93 * 10^{-6}$		$26 * 10^{-6}$



ANEXO II. CÁLCULO DE LA EXPRESIÓN DE LAS DIFERENCIAS CA/CC DE UN CONVERTIDOR TÉRMICO DE INTENSIDAD DE CORRIENTE

La diferencia de transferencia CA/CC de un convertidor se define como:

$$\delta = \frac{I_A - I_C}{I_C} \Big|_{E_A=E_C}$$

donde,

I_A : Intensidad de corriente alterna de entrada, aplicada a los convertidores.

I_C : Intensidad de corriente continua de entrada, (media de las dos polaridades), aplicada a los convertidores.

E_A : Tensión continua de salida de los convertidores, cuando aplicamos a la entrada tensión alterna.

E_C : Tensión continua de salida de los convertidores, cuando aplicamos a la entrada tensión continua.

La relación que existe entre la tensión de salida y la tensión de entrada en un CTI es:

$E = k \cdot I^n$, donde

E : tensión de salida

I : intensidad de corriente de entrada

k : constante

n : coeficiente de valor aproximado 2 (respuesta cuadrática) o 1 (respuesta lineal)

En la práctica, no es conveniente medir las tensiones de entrada para calcular la δ , ya que los CTI, presentan una respuesta muy lenta y cierta



deriva. Normalmente las δ_i se calculan a partir de las tensiones de salida de los CTIs.

Para calcular la δ_i en función de las tensiones de salida, se realiza un desarrollo en serie de la fórmula anterior, para una variación muy pequeña de la intensidad de corriente de entrada en el entorno del punto de calibración.

Despreciando los términos de segundo orden y superiores, nos queda:

$$E(I) = kI^n$$

$$E(I + \Delta I) = k(I^n + nI^{n-1}\Delta I + \dots) \cong E(I) + \frac{nE(I)}{I}\Delta I$$

$$\Delta E = E(I + \Delta I) - E(I) = \frac{nE(I)}{I}\Delta I \quad y$$

$$\frac{\Delta E}{E} = n \frac{\Delta I}{I} \Rightarrow \Delta I = \frac{\Delta E}{nE} \cdot I$$

De la definición de δ_i se tiene:

$$\delta_p = \frac{I_A - I_C'}{I_C'} \quad y \quad \delta_T = \frac{I_A - I_C''}{I_C''},$$

y según el desarrollo anterior :

$$I_C' = I_C + \frac{E_{Ap} - E_{Cp}}{n_p E_{Cp}} I_C$$

$$I_C'' = I_C + \frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}} I_C$$



de las expresiones de δ_T y δ_p , se deduce que para una misma I_A ,

$$(1 + \delta_p)I_C' = (1 + \delta_T)I_C'',$$

sustituyendo los valores de I_C' y I_C'' , obtenemos:

$$(1 + \delta_T) \left(1 + \frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}} \right) I_C = (1 + \delta_p) \left(1 + \frac{E_{Ap} - E_{Cp}}{n_p E_{Cp}} \right) I_C,$$

que lo podemos expresar como:

$$\delta_T \left(1 + \frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}} \right) = 1 + \delta_p + (1 + \delta_p) \frac{E_{Ap} - E_{Cp}}{n_p E_{Cp}} - \left(1 + \frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}} \right),$$

despejando δ_T :

$$\delta_T = \frac{\left(\delta_p + (1 + \delta_p) \frac{E_{Ap} - E_{Cp}}{n_p E_{Cp}} - \frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}} \right)}{\left(1 + \frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}} \right)},$$



Esta ecuación se puede simplificar teniendo en cuenta que $\delta p \ll 1$ (del orden de $\mu\text{A} / \text{A}$) y ajustando las tensiones de entrada de manera que

$$\frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}} = 0,001 \ll 1$$

El error que se comete en δ_T , aplicando esta condición, es admisible frente a los valores que se obtienen de $u(\delta_T)$, en el cálculo de la incertidumbre total.

Esto último se puede conseguir minimizando las diferencias ($E_{Ap} - E_{Cp}$) y ($E_{AT} - E_{CT}$). Por ejemplo ajustando la tensión de entrada de manera que ($E_{Ap} - E_{Cp}$) < 100 $\mu\text{A}/\text{A}$, lo cual hará que $E_{AT} - E_{CT}$ sea también muy pequeña.

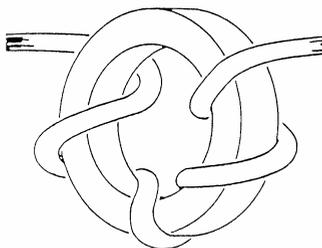
La ecuación quedaría:

$$\delta_T = \delta_p + \frac{E_{Ap} - E_{Cp}}{n_p E_{Cp}} - \frac{E_{AT} - E_{CT}}{n_T E_{CT}}$$

ANEXO III. CONDICIONES PARTICULARES DE LA MEDIDA. ELIMINACIÓN DE ERRORES

Para conseguir un buen resultado en las medidas es aconsejable, siempre teniendo en cuenta la exactitud deseada, tomar una serie de precauciones en la disposición del conexionado del circuito de medida que permitirán eliminar errores y en algunos casos evitar posibles daños a los patrones utilizados.

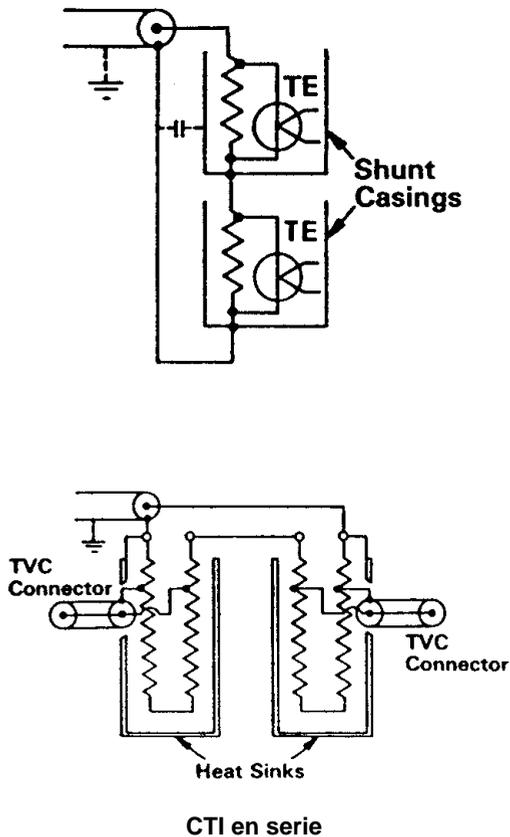
- El circuito de entrada de corriente y el de salida de tensión se deben conectar en un punto a tierra, a fin de evitar elevadas diferencias de potencial, durante las conmutaciones CA-CC, que podrían dañar seriamente al patrón de referencia.
- Para suprimir lazos de corrientes CA a la salida del amplificador de transconductancia, se puede colocar un igualador de corriente, arrollando el cable de salida del amplificador alrededor de un núcleo magnético toroidal de alta permeabilidad.



Igualador de corriente

- Cuando se realicen medidas de gran exactitud, la tierra nunca se debe conectar en la línea de conexión de los dos convertidores, ya que pueden aparecer corrientes de fugas debido a capacidades parásitas que hacen que la corriente que pasa a través de los dos CTI sea

diferente. Con el fin de evitar estas corrientes parásitas capacitivas, para cada valor medido a una intensidad de corriente y frecuencia determinada, las medidas se realizan dos veces. En una de ellas la carcasa de uno de los “shunt” se conecta a tierra, mientras que el otro se conecta al positivo del conductor interno y en la otra las posiciones se intercambian.



- En los CTI cuyas entradas son bornas convencionales, pueden aparecer campos magnéticos alrededor de éstas que inducen un error en la medida; dicho error consiste en la aparición de una tensión adicional en el circuito del termopar que causa calentamiento extra cuando aplicamos altas corrientes (> 5 A). Para evitar este efecto se utilizan terminaciones coaxiales a la entrada de los convertidores y los correspondientes cables coaxiales que conecten el convertidor patrón con el convertidor a calibrar.

