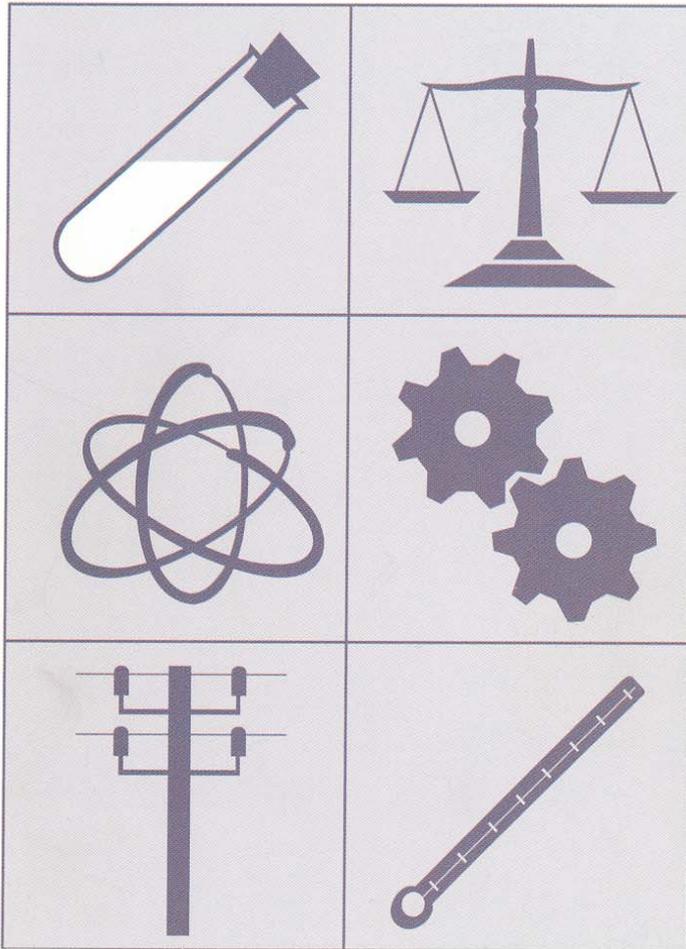


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO EL- 019 PARA LA CALIBRACIÓN DE CONVERTIDORES TÉRMICOS DE TENSIÓN ELÉCTRICA

m 08



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



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	8
5. DESCRIPCIÓN	16
5.1. Equipos y materiales.....	16
5.2. Operaciones previas	18
5.3. Proceso de calibración.....	20
5.4. Toma y tratamiento de datos	22
6. RESULTADOS.....	25
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	25
6.2. Interpretación de resultados.....	32
7. REFERENCIAS	33
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración	33
7.2. Otras referencias para consulta.....	33
8. ANEXOS	34
ANEXO I: Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de calibración de un Convertidor Térmico de Tensión.	35
ANEXO II: Cálculo de la expresión de las diferencias CA/CC de un Convertidor térmico.	40



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 tensión, identificados con el número 05.02 en la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica [1]; (ver también identificación 05.01: convertidor térmico).

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se aplica a todos los convertidores térmicos de tensión. Incluyendo al conjunto formado por convertidor térmico y resistencia de alcance, para conseguir tensiones desde aproximadamente 0,5 V a 1000 V y frecuencias comprendidas entre 10 Hz y 1 MHz.

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] que se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

Resistencia de alcance:

Resistencia de diferentes valores nominales que se conecta en serie a la entrada del convertidor térmico para conseguir aumentar el campo de medida de éste, desde su valor nominal a 1000 V.

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 \bar{x} 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.

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.

Resolución (de un dispositivo visualizador) [6] (4.15)

La menor diferencia de indicación de un dispositivo visualizador que puede percibirse de forma significativa.

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 metroológica 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 metroológicamente trazable y la jerarquía de calibraciones debe constituir una estructura de ramas o una red. El esfuerzo necesario para establecer la trazabilidad metroológica de cada magnitud de entrada debe ser ponderado con su contribución relativa al resultado de la medida.

NOTA 5 La trazabilidad metroológica 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 metroológica 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 metroológica al SI, e intervalos de calibración (ILAC P-10:2002).

NOTA 8 El término abreviado “trazabilidad” es utilizado algunas veces para significar trazabilidad metroológica 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 metroológica cuando exista riesgo de confusión.

4. GENERALIDADES

En Metrología la medida de tensiones e intensidades en corriente alterna está directamente referida a la corriente continua mediante el uso generalizado de convertidores térmicos (basados en termopares).

El principio de funcionamiento de estos elementos está basado en la igualdad de calentamiento que produce una corriente continua y una

corriente del mismo valor eficaz aplicada al calentador o resistencia de calentamiento de estos elementos.

Su construcción consiste en un hilo recto que hace de calentador que tiene unido en su punto medio un termopar aislado eléctricamente. El conjunto se monta en una cápsula de vidrio donde se ha hecho el vacío.

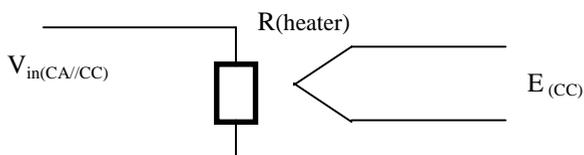


Figura 1

Los termopares o termoelementos, TE, son apropiados para medidas de audio y altas frecuencias, de 10 Hz a 1 MHz dependiendo del campo de medida.

La salida de un convertidor térmico de tensión, CTT, basado en un termopar, (E), para sus tensiones nominales de trabajo (0,5 V a 5 V) es relativamente baja (7 a 12 mV) cuando la corriente de calentamiento es de 2,5, 5 ó 10 mA. Para habilitar estos instrumentos en un campo de medida más amplio, se los complementa con resistencias en serie, permitiendo alcanzar tensiones del orden de 1000 V.

Al ser la salida del termopar 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.

$$E = f(V_{in}) = k \cdot V_{in}^n; \quad n \cong 2 \text{ o } 1. \quad (1)$$

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.

En la práctica, el comportamiento de un TE no es ideal, debido a la presencia de efectos termoeléctricos y otros factores dependientes 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 ca\cc o error de transferencia, δ , y este debe ser cuantificado para 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, por lo que necesitamos aplicar tensiones cc en ambas polaridades de la corriente.

La diferencia de transferencia cacc de un convertidor térmico de tensión, δ , se define como la diferencia relativa entre el valor eficaz de la tensión alterna, V_{ca} , y la tensión continua V_{cc} que produce la misma tensión de salida en el convertidor. El valor V_{cc} , se define como el valor medio obtenido con polaridad directa e inversa.

$$\delta = \frac{V_{ca} - V_{cc}}{V_{cc}} \Big|_{E_A = E_C} ; \quad V_{cc} = \frac{V_{cc}^+ + V_{cc}^-}{2} \quad (2)$$

donde,

V_c : Tensión alterna de entrada, aplicada al convertidor.

V_{cc} : Tensión continua de entrada, (media de las dos polaridades), aplicada al convertidor.

E : Tensión continua de salida del convertidor, cuando aplicamos a la entrada tensión alterna.



E_C : Tensión continua de salida del convertidor, cuando aplicamos a la entrada tensión continua.

Inicialmente, se usaban instrumentos electrodinámicos para medir tensión y corriente de transferencia ca\cc. Su utilización estaba limitada en frecuencia, a 1000 Hz o 2000 Hz, debido a su relativamente alta inductancia. También se utilizaron sistemas electrostáticos para frecuencias más altas, pero con limitaciones a baja tensión.

Posteriormente se pasó a la utilización de los convertidores térmicos de tensión (CTT) o corriente (CTC) del tipo de una simple unión (SJTC). Para mejorar las limitaciones de estos convertidores térmicos de una sola unión (baja salida y errores significativos debidos a efectos termoeléctricos), se diseñaron elementos con múltiples termopares en serie, convertidores térmicos multiunión (MJTC) (de hasta 200 uniones), obteniendo salidas de un orden superior a los anteriores (más fáciles de medir) y consiguiendo que la incertidumbre de la característica ca\cc sea mejorada, alcanzando niveles de $1 \mu\text{V} / \text{V}$ en su margen óptimo de frecuencia (1 kHz) y tensión (3 V).

Por otro lado existen en el mercado convertidores de estado sólido cuya salida tiene una relación lineal con la entrada, basados en un sensor que utiliza dos transistores y resistencias de película delgada, construido todo el conjunto, en un chip monolítico. Aunque la incertidumbre conseguida en la medida es mayor que con los MJTC, tienen la ventaja de una mayor tensión de salida (2 V para tensiones de entrada desde 2 mV a 1000 V) y una respuesta más rápida.

Actualmente se han desarrollando unos nuevos MJTC's de tecnología planar cuya fabricación es mas reproducible y barata que en el caso de los clásicos MJTC's cuya fabricación es manual y muy cara. Estos MJTC's están basados en nuevas técnicas de película delgada y fotolitografía, las estructuras multiuniones se forman sobre un substrato de dióxido de silicio mediante técnicas de multicapas y máscaras. Con



estos patrones se han previsto resultados con unas diferencias ca/cc menores que $\mu\text{V} / \text{V}$.

Durante varios años, los laboratorios nacionales han desarrollado gran variedad de comparadores, puentes comparadores y sistemas de medida para medir la diferencia relativa ca/cc entre CTT y para calibrar patrones de trabajo, estando los sistemas de medida completamente automatizados.

La diferencia ca/cc de un instrumento de transferencia (CTT ó CTC) a calibrar, "test", δ_T , se determina comparándolo con un patrón similar, cuyas correcciones δ_p , son bien conocidas.

Los convertidores térmicos se colocan en paralelo y se los conecta sucesivamente a generadores de tensión (calibradores o fuentes) ca y cc, mediante un conmutador. Normalmente se utilizan secuencias de medida del tipo CA, CC+, CC, CA....., para conseguir eliminar errores de cc y minimizar los efectos de la deriva en las salidas de los CTT, si las medidas se toman a intervalos de tiempo iguales.

Las medidas de δ_T y δ_p , se pueden realizar básicamente mediante dos métodos, [7]:

- a) Método de nulo.
 - b) Método de deflexión.
- a) En el método de nulo, los valores de δ_T δ_p se obtienen directamente a partir de los valores de tensión CC y CA que se aplican a la entrada de los CTTs. Primero se aplica la tensión CA a los dos CTTs y se toman las lecturas de los voltímetros; después se aplican consecutivamente tensiones CC+, CC, ajustando estos valores para obtener en los dos voltímetros las mismas tensiones de salida que al aplicar alterna, tanto en el patrón como en el CTT a calibrar.

La tensión 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 $\mu\text{V} / \text{V}$ (10^6).

De la definición:

$$\delta = (V_{ca} - V_{cc}) / V_{cc}$$

$$V_{ca} = V_{cc}(T) (1 + \delta_T)$$

$$V_{ca} = V_{cc}(P) (1 + \delta_P)$$

Al ser V_{CA} la misma, pues los dos CTTs están en paralelo y despejando δ_T , se obtiene:

$$\delta_T = \frac{V_{cc}(P)}{V_{cc}(T)} (1 + \delta_P) - 1 \quad (3)$$

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

b) 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 CTTs. El método de medida más utilizado es el llamado de doble canal. En este sistema se conectan a la salida de los CTTs, dos voltímetros para tomar las lecturas de tensión continua que obtenemos cuando aplicamos sucesivamente tensión alterna y continua para ambas polaridades de la corriente. A partir de estos valores, obtenemos la diferencia de transferencia del



CTT 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 $|E_{Ap} - E_{Cp}| < 100 \mu\text{V} / \text{V}$. 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 más utilizado y poderse emplear para comparar convertidores de diferentes salidas.

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 de la corriente.



CTT: Convertidor Térmico de Tensión.

CTTs: Convertidores Térmicos de Tensión.

δ : Diferencia de transferencia ca/cc.

δ_T : Diferencia de transferencia del patrón a calibrar.

Δ_{δ_T} : Corrección debida a la dispersión de los resultados.

δ_P : Diferencia de transferencia del CTT 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 tensión 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 tensión 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 tensión 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 tensión continua a la entrada de los convertidores.

F : Frecuencia de medida.

N : Número de medidas realizadas.

n_P : Coeficiente n , del CTT patrón.

n_T : Coeficiente n , del CTT a calibrar.



TE: Termoelemento.

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

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

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

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

V_{ca} : Tensión en corriente alterna.

V_{cc} : Tensión en corriente continua.

V_{in} : Tensión de entrada.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

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

- Un convertidor térmico o conjunto de CTT (convertidor + juego de resistencias de alcance), 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 tensión que se quiera calibrar.
- Generador de tensión continua, con un alcance en tensión apropiado para la calibración.



- Generador de tensión alterna con un alcance en tensión y frecuencia apropiado para la calibración.

NOTAS:

1. Si se dispone de un generador multifunción se puede utilizar como generador de tensión continua y alterna, conmutando entre ambas funciones.
2. Aunque no es necesario conocer con gran exactitud el valor de entrada aplicado a los CTTs, 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 CTTs 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 tensión para medidas en tensión superiores a 100 V.

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 CTTs.

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.
- Conector de tensión de entrada en “T” para la conexión en paralelo de los CTTs.
- Adaptadores necesarios para la conexión al conector en “T” de los CTT.
- Cables adecuados de baja fuerza electromotriz:
 - De los generadores de tensión al conmutador.
 - Del conmutador al conector de entrada tipo N en “T”.
 - 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 CTT patrón y para CTT 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 $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$). 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 metroológicas. 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.
- Asegurarse de que todos los equipos controlados por ordenador, estén direccionados adecuadamente.
- El conector “Low” de entrada de los patrones utilizados ha de estar conectado al conector “Low” de salida.
- Generadores de tensión:

Los generadores de tensión, se han de colocar inicialmente a la tensión y frecuencia de calibración, limitándolos tanto en tensión como en corriente.

5.3. Proceso de calibración

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

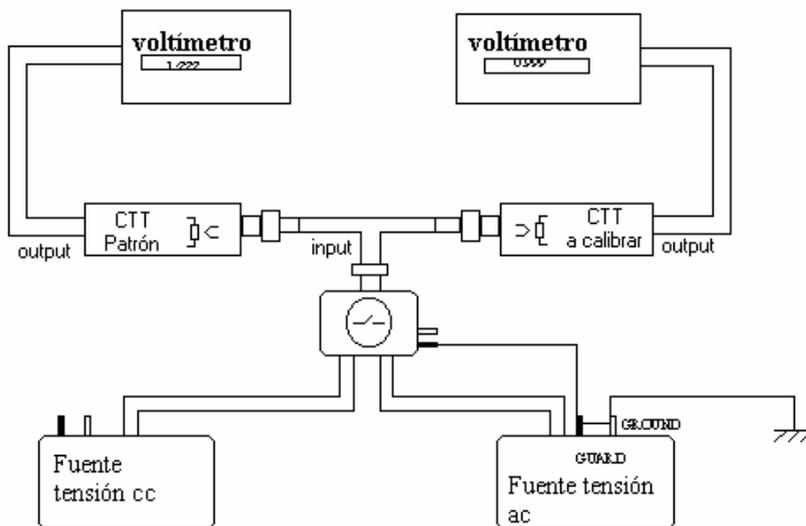


Figura 2. Sistema de transferencia ca/cc. calibración de un CTT

Se colocarán los generadores a la tensión y frecuencia de calibración y los convertidores conectados en paralelo.

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

NOTAS:

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 CTT 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 CTT 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 tensiones de entrada de tal forma que:

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

En primer lugar se aplicará la tensión CA a ambos CTTs, 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 tensión CC del mismo valor que el eficaz que la tensión 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 cacc del CTT a calibrar 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 tensión 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 nominal de la tensión alterna aplicada: Amplitud y frecuencia.
- Lecturas obtenidas en los voltímetros colocados a la salida de ambos CTTs: 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 CTT patrón, obtenida de su Certificado de Calibración.
- Error asociado a la calibración en cada punto (Diferencia de transferencia, δ_T , del CTT a calibrar) y su desviación típica experimental correspondiente. En electricidad, lo usual es expresar el error de la medición en error relativo, en %, o partes en 10^6 ($\mu V / V$). 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 $\mu V / V$ (partes en 10^6).

A continuación se compararán los errores obtenidos con las tolerancias asignadas al CTT 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 multímetros y realice los cálculos de la diferencia de transferencia. En este último caso se deberá validar el programa informático utilizado antes de realizar la calibración, y se conservarán los

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la guía EA4-02 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 CTT 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 afectarían al resultado (aunque se tome valor de corrección nulo) sería:

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

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 CTT 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, ΔV . 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 CTT 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 CTT 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 CTTs, 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 $\sqrt{3}$.

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

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 CTTs, 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 $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad, c_i	Contribuc. Incert. $c_i * u(x_i)$
$\Delta \bar{\delta}_T$	0	$\left(\frac{\sum_{j=1}^n (\delta_{Tj} - \bar{\delta}_T)^2}{n(n-1)} \right)^{1/2}$	1	$u_1(\delta_T) = 1 * \left(\frac{\sum_{j=1}^n (\delta_{Tj} - \bar{\delta}_T)^2}{n(n-1)} \right)^{1/2}$
δ_P	δ_P	$\left((U_P / k_P)^2 + \left(\frac{a_d}{\sqrt{3}} \right)^2 \right)^{1/2}$	1	$u_2(\delta_T) = 1 * \left((U_P / k_P)^2 + \left(\frac{a_d}{\sqrt{3}} \right)^2 \right)^{1/2}$
E_{AP}	E_{AP}	$\left((S(\bar{E}_{AP}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right)^{1/2}$	$\left(\frac{1}{n_P(E_{CP}^+ + E_{CP}^-) / 2} \right)$	$u_3(\delta_r) = \left(\frac{1}{n_P(E_{CP}^+ + E_{CP}^-) / 2} \right) * \left((S(\bar{E}_{AP}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right)^{1/2}$
E_{CP}^+	E_{CP}^+	$\left((S(\bar{E}_{CP}^+) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right)^{1/2}$	$\left(-\frac{2E_{AP}}{n_P(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)} \right)$	$u_4(\delta_r) = \left(-\frac{2E_{AP}}{n_P(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)} \right) * \left((S(\bar{E}_{CP}^+) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2 \right)^{1/2}$



Magnitud, X_i	Estimac, x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad, c_i	Contribuc. Inert. $c_i \cdot u(x_i)$
E_{CP}	E_{CP}	$\sqrt{(s(\bar{E}_{CP}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2} j^{1/2}$	$\left(-\frac{2E_{AP}}{n_p(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)^2} \right)$	$u_5(\delta_T) = \left(-\frac{2E_{AP}}{n_p(E_{CP}^+ + E_{CP}^-)^2} \right)^*$ $\sqrt{(s(\bar{E}_{CP}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2} j^{1/2}$
E_{AT}	E_{AT}	$\sqrt{(s(\bar{E}_{AT}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2} j^{1/2}$	$\left(\frac{1}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)/2} \right)$	$u_6(\delta_T) = \left(-\frac{1}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)/2} \right)^*$ $\sqrt{(s(\bar{E}_{AT}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2} j^{1/2}$
E_{CT}^+	E_{CT}^+	$\sqrt{(s(\bar{E}_{CT}^+) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2} j^{1/2}$	$\left(\frac{2E_{AT}}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right)$	$u_7(\delta_T) = \left(\frac{2E_{AT}}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right)^*$ $\sqrt{(s(\bar{E}_{CT}^+) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2} j^{1/2}$
E_{CT}	E_{CT}	$\sqrt{(s(\bar{E}_{CT}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2} j^{1/2}$	$\left(\frac{2E_{AT}}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right)$	$u_8(\delta_T) = \left(\frac{2E_{AT}}{n_r(E_{CT}^+ + E_{CT}^-)^2} \right)^*$ $\sqrt{(s(\bar{E}_{CT}) / \sqrt{1})^2 + (a_r / \sqrt{3})^2} j^{1/2}$
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_T , 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 N1. Para incertidumbres tipo B, los grados de libertad se calculan como:

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

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 ν_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 E1.

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 $k \cdot u(\delta_T)$ el valor máximo, b_{max} , de dicha corrección no realizada (expresado en las unidades adecuadas)

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

6.2. Interpretación de resultados

Se deberán establecer, en función del uso previsto para el CTT, 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 CTT puede destinarse libremente a su uso previsto.
- $\delta_T \pm u(\delta_T)$ fuera de los límites de tolerancia: El CTT debe retirarse del servicio y repararse, ajustarse, darse de baja o destinarse a una aplicación menos exigente.
- $\delta_T \pm u(\delta_T)$ parcialmente dentro de los límites de tolerancia: El CTT 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 CTT, 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 CTT a calibrar.

Manual de funcionamiento del CTT patrón.

Manual de funcionamiento del sistema de medida (Fuentes y multímetros).

7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI Ministerio de Industria y Energía.
- [2] Norma UNEEN 300121. 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. 2000.
- [4] Guía EA4/02. Expression of the uncertainty of measurement in calibrations. Edition 2. EA 1999.
- [5] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. 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 ACDC 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.

8. ANEXOS

ANEXO I: Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de calibración de un Convertidor Térmico de Tensión.

ANEXO II: Cálculo de la expresión de las diferencias CA/CC de un Convertidor térmico.



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

Se han realizado las medidas de la calibración de un CTT en corriente alterna a 20 V y 500 kHz, por comparación, siguiendo las instrucciones de este procedimiento.

Características del CTT patrón

El patrón de referencia es un convertidor térmico de tensión con las siguientes características:

- Tensión nominal de entrada: 20 V
- Tensión nominal de salida: 100 mV
- Diferencia de transferencia ca/cc en este punto: 10 $\mu\text{V} / \text{V}$
- n : 2 (respuesta cuadrática)

El patrón posee un certificado de calibración en el que se indica que para este punto de medida, $Up = 50 \mu\text{V} / \text{V}$ 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 CTT a calibrar

Es un convertidor térmico de tensión multirango con las siguientes características:

- Escala de utilización en este caso : 22 V
- Tensión nominal de salida: 2 V a fondo de escala
- n : 1 (respuesta lineal)

Cálculo de la incertidumbre

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



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

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

Las lecturas obtenidas en los voltímetros son:

$T^a (\text{ }^\circ\text{C}) = 23,1^\circ\text{C}$

Humedad(%) = 61%

Nº Rept.	V_{CA} (V)	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	20	500	10	100,52683	100,52665	100,52702	1,669711	1,669734	1,669685	-262
2				100,52682	100,52664	100,52701	1,669711	1,669734	1,669684	-262
3				100,52682	100,52664	100,52701	1,669709	1,669733	1,669683	-262
4				100,52681	100,52663	100,52700	1,669709	1,669732	1,669683	-262
5				100,52681	100,52664	100,52699	1,669706	1,669732	1,669682	-261
				$\bar{\delta}_T$						-262
				$s(\delta_T)$						1

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

a) Desviación típica experimental:

$$\Delta u(\bar{\delta}_T) = s(\bar{\delta}_T) = 1 / \sqrt{5} = 0,4 \mu\text{V} / \text{V}$$

b) Incertidumbre asociada al CTT patrón, $u(\delta p)$:

Según el certificado de calibración del patrón $U_p = 50 \mu\text{V} / \text{V}$ con $k = 2$.

Entonces,



$$u(\delta_{Pcert}) = U_p / k_p = 25 \mu\text{V} / \text{V}$$

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

$$u(\delta_{Pder}) = a_d / \sqrt{3} = 5,8 \mu\text{V} / \text{V}$$

Por lo que, $u(\delta_p) = (u^2(\delta_{Pcert}) + u^2(\delta_{Pder}))^{1/2} = (25^2 + 5,8^2) = 25,66 \mu\text{V} / \text{V}$.

c) Incertidumbre asociada a los voltímetros:

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

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

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

Resolución, $u(E_{xxres})$,

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

$$u(E_{xTres}) = ar / \sqrt{3} = 0,0000005 / \sqrt{3} \text{ mV} = 2,9 * 10^6 \text{ V}.$$

Luego las incertidumbres asociadas a los voltímetros serían:

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

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

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

$$\begin{aligned} u(E_{AT}) &= (u^2(E_{ATrept}) + u^2(E_{ATres}))^{1/2} = \\ &= ((0,5 * 10^7)^2 + (2,9 * 10^6)^2)^{1/2} = 2,90 * 10^6 \text{ V} \end{aligned}$$

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



$$u(E_{CT}) = (u^2(E_{CT\text{repl}}) + u^2(E_{CT\text{res}}))^{1/2} = \\ = ((0,5 * 10^7)^2 + (2,9 * 10^6)^2)^{1/2} = 2,90 * 10^6 \text{ V}$$

La incertidumbre típica combinada:

$$u^2(\delta_T) = (0,4 * 10^{-6})^2 + (25,66 * 10^{-6})^2 + \left(\frac{1}{2(100)}\right)^2 * (2,90 * 10^{-6})^2 + \\ \left(-\frac{1}{100}\right)^2 * (2,90 * 10^{-6})^2 + \left(-\frac{1}{100}\right)^2 * (2,90 * 10^{-6})^2 + \\ \left(-\frac{1}{1,7}\right)^2 * (2,90 * 10^{-6})^2 + \left(\frac{2}{1,7}\right)^2 * (2,90 * 10^{-6})^2 + \left(\frac{2}{1,7}\right)^2 * (2,90 * 10^{-6})^2 = \\ = 1,6 * 10^{-13} + 6,58 * 10^{-10} + 2,10 * 10^{-16} + 8,41 * 10^{-16} + 8,41 * 10^{-16} + 2,91 * 10^{-12} + \\ + 1,16 * 10^{-11} + 1,16 * 10^{-11} = 6,84 * 10^{-10}$$

$$u(\delta_T) = (6,84 * 10^{-10})^{1/2} = 2,62 * 10^{-5} \cong 27 \mu\text{V} / \text{V}$$

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

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

A continuación un resumen del análisis de incertidumbres:

Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coficiente sensibilidad, c_i	Contribuc. Incert. $c_i * u(x_i)$
$\Delta \bar{\delta}_T$	0	$0,4 * 10^6$	1	$u_1(\delta_T) = 0,4 * 10^6$
δ_P	$6 * 10^6$	$25,66 * 10^6$	1	$u_2(\delta_T) = 25,66 * 10^6$



Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad, c_i	Contribuc. Incert. $c_i * u(x_i)$
E_{AP}	E_{AP}	$2,90 * 10^6$ mv	$\left(\frac{1}{200}\right) (\text{mV})^1$	$u_3(\delta_T) = 1,45 * 10^8$
E_{CP}^+	E_{CP}^+	$2,90 * 10^6$ mv	$\left(-\frac{1}{100}\right) (\text{mV})^1$	$u_4(\delta_T) = 2,90 * 10^8$
E_{CP}	E_{CP}	$2,90 * 10^6$ mv	$\left(-\frac{1}{100}\right) (\text{mV})^1$	$u_5(\delta_T) = 2,90 * 10^8$
E_{AT}	E_{AT}	$2,90 * 10^6$ v	$-\left(\frac{1}{1,7}\right) (\text{V})^1$	$u_6(\delta_T) = 1,70 * 10^6$
E_{CT}^+	E_{CT}^+	$2,90 * 10^6$ v	$-\left(\frac{2}{1,7}\right) (\text{V})^1$	$u_7(\delta_T) = 3,40 * 10^6$
E_{CT}	E_{CT}	$2,90 * 10^6$ v	$-\left(\frac{2}{1,7}\right) (\text{V})^1$	$u_8(\delta_T) = 3,40 * 10^6$
δ_T	$\bar{\delta}_T$	$262 * 10^6$		$27 * 10^6$



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

La diferencia de transferencia ca/cc de un convertidor se define como:

$$\delta = \frac{V_A - V_C}{V_C} \Big|_{E_A = E_C}$$

donde,

V_A : Tensión alterna de entrada, aplicada a los convertidores.

V_C : Tensión 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 termoelemento es:

$$E = k \cdot V^n$$

donde:

E : tensión de salida.

V : tensión 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 CTT, presentan una respuesta muy lenta y cierta deriva. Normalmente las δ , se calculan a partir de las tensiones de salida de los CTT.

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

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

$$E(V) = kV^n$$

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

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

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

De la definición de δ , se tiene:

$$\delta_P = \frac{V_A - V_C'}{V_C'} \quad y \quad \delta_T = \frac{V_A - V_C''}{V_C''},$$

y según el desarrollo anterior :

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



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

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

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

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

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

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 $\mu V / V$) 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 $(E_{Ap} - E_{Cp}) < 100 \mu V / V$, lo cual hará que $E_{AT} - E_{CT}$ sea también muy pequeña.

La ecuación quedaría:

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

