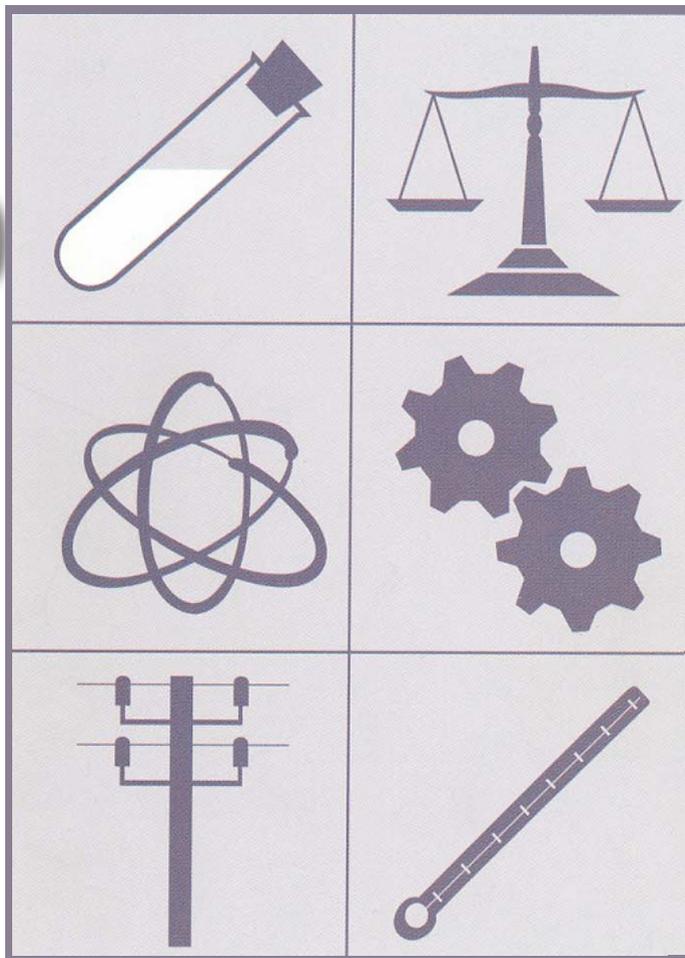


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO EL-024 PARA LA CALIBRACIÓN
DE FUENTES DE TENSIÓN E INTENSIDAD EN CA

ñ 14



La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web (www.cem.es).

El procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, respecto a la edición anterior en papel.

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
4.1.- ABREVIATURAS.....	9
5.- DESCRIPCIÓN.....	11
5.1.- EQUIPOS Y MATERIALES.....	11
5.2.- OPERACIONES PREVIAS.....	12
5.3.- PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	15
5.4.- TOMA Y TRATAMIENTO DE DATOS.....	20
6.- RESULTADOS.....	21
6.1.- CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES.....	21
6.2.- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	23
7.- REFERENCIAS.....	24
8.- ANEXOS.....	25



1.- OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer un método de calibración para fuentes de tensión e intensidad en corriente alterna (ca) codificados como EE-05.05 y EE-13.10, según la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica (ref. [5]).

2.- ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a fuentes de tensión e intensidad en corriente alterna. Este procedimiento es aplicable para tensiones no superiores a 1 000 V y frecuencias desde 10 Hz a 1 MHz; y para intensidades de corriente hasta 20 A, en frecuencias desde 10 Hz a 100 kHz.

Las fuentes de tensión e intensidad en corriente alterna a las que será aplicable este procedimiento, serán aquellas que tengan 5½ dígitos o menos de resolución. Quedan fuera del alcance de este procedimiento las fuentes de tensión e intensidad en corriente alterna de alta exactitud para cuya calibración sea necesario el uso de patrones de elevado nivel metrológico, como pueden ser los convertidores térmicos.

Para la calibración, se utilizarán multímetros de alta exactitud, de manera que la relación entre la incertidumbre del patrón y las especificaciones de la fuente sea al menos de 3:1.

En el caso de intensidad de corriente alterna, puede ser difícil conseguir la relación anteriormente mencionada, por lo que, en ese caso, y para esta magnitud, se utilizarán como patrones, junto con el multímetro, shunts o resistencias.

Para la función de tensión alterna se puede mejorar la relación utilizando en vez del multímetro un voltímetro de tensión alterna de alta exactitud. El presente procedimiento sería igualmente aplicable con la citada sustitución.

3.- DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [1] y en particular las que se indican a continuación.

Ajuste de un sistema de medida [1] (3.11)



Conjunto de operaciones realizadas sobre un **sistema de medida** para que proporcione **indicaciones** prescritas, correspondientes a **valores** dados de la **magnitud** a medir.

NOTA 1: Diversos tipos de ajuste de un sistema de medida son: **ajuste de cero**, ajuste del *offset* (*desplazamiento*) y ajuste de la amplitud de escala (denominado también ajuste de ganancia).

NOTA 2: No debe confundirse el ajuste de un sistema de medida con su propia calibración, que es un requisito para el ajuste.

NOTA 3: Después de su ajuste, generalmente un sistema de medida debe ser calibrado nuevamente.

Calibración [1] (2.39)

Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los **valores** y sus **incertidumbres de medida** asociadas obtenidas a partir de los **patrones de medida**, y las correspondientes **indicaciones** con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un **resultado de medida** a partir de una indicación.

NOTA 1: Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

NOTA 2: Conviene no confundir la calibración con el **ajuste de un sistema de medida**, a menudo llamado incorrectamente “autocalibración”, ni con una **verificación** de la calibración.

NOTA 3: Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

Error de medida [1] (2.16)

Diferencia entre un **valor medido de una magnitud** y un **valor de referencia**.

NOTA 1: El concepto de error de medida puede emplearse:

- a) cuando exista un único valor de referencia, como en el caso de realizar una **calibración** mediante un **patrón** cuyo **valor medido** tenga una **incertidumbre de medida** despreciable, o cuando se toma un **valor convencional**, en cuyo caso el error es conocido.



b) cuando el mensurando se supone representado por un valor verdadero único o por un conjunto de valores verdaderos, de amplitud despreciable, en cuyo caso el error es desconocido.

NOTA 2: Conviene no confundir el error de medida con un error en la producción o con un error humano.

Incertidumbre de medida [1] (2.26)

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los **valores** atribuidos a un **mensurando**, a partir de la información que se utiliza.

NOTA 1: La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

NOTA 2: El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina **incertidumbre típica de medida** (o un múltiplo de ella) , o una semiamplitud con una **probabilidad de cobertura** determinada.

NOTA 3: En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

NOTA 4: En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

Resolución de un dispositivo visualizador [1] (4.15)

Mínima diferencia entre **indicaciones** visualizadas, que puede percibirse de forma significativa.

Trazabilidad metrológica [1] (2.41)

Propiedad de un **resultado de medida** por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de **calibraciones**, cada una de las cuales contribuye a la **incertidumbre de medida**.



NOTA 1: En esta definición, la referencia puede ser la definición de una **unidad de medida**, mediante una realización práctica, un **procedimiento de medida** que incluya la unidad de medida cuando se trate de una **magnitud no ordinal**, o un **patrón**.

NOTA 2: La trazabilidad metrológica requiere una **jerarquía de calibración** establecida.

NOTA 3: La especificación de la referencia debe incluir la fecha en la cual se utilizó dicha referencia, junto con cualquier otra información metrológica relevante sobre la referencia, tal como la fecha en que se haya realizado la primera calibración en la jerarquía.

NOTA 4: Para **mediciones** con más de una **magnitud de entrada** en el **modelo de medición**, cada **valor** de entrada debiera ser metrológicamente trazable y la jerarquía de calibración puede tener forma de estructura ramificada o de red. El esfuerzo realizado para establecer la trazabilidad metrológica de cada valor de entrada debería ser en proporción a su contribución relativa al resultado de la medición.

NOTA 5: La trazabilidad metrológica de un resultado de medida no garantiza por sí misma la adecuación de la incertidumbre de medida a un fin dado, o la ausencia de errores humanos.

NOTA 6: La comparación entre dos patrones de medida puede considerarse como una calibración si ésta se utiliza para comprobar, y si procede, corregir el valor y la incertidumbre atribuidos a uno de los patrones.

NOTA 7: La ILAC considera que los elementos necesarios para confirmar la trazabilidad metrológica son: una **cadena de trazabilidad** metrológica ininterrumpida a un **patrón internacional** o a un **patrón nacional**, una incertidumbre de medida documentada, un procedimiento de medida documentado, una competencia técnica reconocida, la trazabilidad metrológica al **SI** y los intervalos entre calibraciones (véase ILAC P-10:2002).

NOTA 8: Algunas veces el término abreviado “trazabilidad” se utiliza en lugar de “trazabilidad metrológica” así como para otros conceptos, como trazabilidad de una muestra, de un documento, de un instrumento, de un material, etc., cuando interviene el historial (“traza”) del elemento en cuestión. Por tanto, es preferible utilizar el término completo “trazabilidad metrológica” para evitar confusión.

Shunt [5] (EE-06.01; EE-07.01; EE-07.02):

Resistencia de cuatro terminales, dos de intensidad y dos de tensión, a fin de anular así la influencia de la caída de tensión en los cables de conexión.

Están diseñados para la medida de intensidad de corriente de forma precisa y se especifican por medio de la intensidad nominal que pueden medir. Dada su utilización es normal que el certificado de calibración indique su valor resistivo para distintos valores de



intensidad de corriente aplicada.

De esta forma, la medida de una intensidad de corriente con un shunt, se obtiene como el resultado de dividir la tensión medida en sus terminales por el valor certificado de su resistencia.

Existen también shunts activos, que se diferencian de los anteriores en que disponen de un amplificador interno con lo que se pueden conectar a cargas de impedancia muy bajas (centenas de ohmios).

4.- GENERALIDADES

Las fuentes, también llamadas generadores, son instrumentos que producen valores conocidos de una o varias magnitudes eléctricas. Se emplean principalmente para calibrar medidores y como componentes de circuitos eléctricos. Pertenecen a esta categoría los patrones de tensión y resistencia y las fuentes de alimentación. Existen instrumentos que combinan varias de estas funciones. Estos instrumentos se conocen como calibradores multifunción y calibradores multiproducto.

Las fuentes de tensión e intensidad en corriente alterna, generan una tensión o intensidad de corriente, que se pueda seleccionar dentro de un extenso campo de amplitud y frecuencia, con la suficiente estabilidad y precisión para calibrar los instrumentos que miden corriente alterna.

Para la calibración de las fuentes de tensión alterna, se pueden utilizar multímetros de alta exactitud, normalmente de $7^{1/2}$ ó $8^{1/2}$ dígitos. En los casos en que necesitemos mayor exactitud, podremos utilizar un voltímetro de tensión alterna de alta precisión, codificado como EE-05.20, según la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica (ref. [5]), para la calibración en tensión alterna y junto a un juego de resistencias o shunts para la magnitud de intensidad de corriente alterna.

Cuando se utilicen resistencias o shunts, para la medida de intensidad de corriente, se ha de tener en cuenta la relación entre la impedancia de entrada del multímetro y la resistencia utilizada. Debido a la utilización del multímetro para la medida de la caída de tensión en la resistencia, la impedancia de entrada del mismo se conecta en paralelo con esta, pudiendo producir errores. Por ejemplo si la impedancia de entrada del multímetro es de $10\text{ M}\Omega$ produciría un error del orden de partes en 10^{-7} para una resistencia de $1\ \Omega$, pero de partes en 10^{-3} para una resistencia de $10\text{ k}\Omega$. Para evitar este error, se utilizará siempre un multímetro, de manera que el cociente entre la resistencia utilizada y la impedancia de entrada de éste, sea diez veces menor que la mayor de las contribuciones



a la incertidumbre total de la medida.

Dado que tanto los multímetros de alta precisión como la mayoría de las fuentes de este tipo, disponen de la posibilidad de comunicación IEEE o RS232, la calibración puede automatizarse logrando mayor rapidez, ahorro de tiempo de operario y eliminando la posibilidad del error humano tanto en la toma de datos como en el tratamiento de los mismos.

4.1.- Abreviaturas

b_{\max} : Valor máximo de la corrección no realizada sobre los patrones.

ca: Corriente alterna.

c_C : Corrección por calibración de la fuente a calibrar.

c_i : Coeficiente de sensibilidad.

c_{PT} : Coeficiente de temperatura de M_p .

$c_{R_{PT}}$: Coeficiente de temperatura de R_p .

cM_{Pcal} : Corrección por calibración de los patrones.

cM_{Pder} : Corrección por efecto de la deriva sobre los patrones.

cM_{Pres} : Correcciones por resolución de los patrones.

cM_{PT} : Correcciones por efecto de la temperatura sobre los patrones.

cR_{Pder} : Corrección por efecto de la deriva sobre la resistencia patrón.

cR_{PT} : Correcciones por efecto de la temperatura sobre la resistencia patrón.

cV_{Pcal} : Corrección por calibración del multímetro patrón.

cV_{Pder} : Corrección por efecto de la deriva sobre el multímetro patrón.

cV_{Pres} : Correcciones por resolución del multímetro patrón.

cV_{PT} : Correcciones por efecto de la temperatura sobre el multímetro patrón.

d_p : Resolución de M_p .

ΔM_{Pmax} : Límite máximo de deriva de los patrones, obtenido a partir de su historial de calibración o de especificaciones del fabricante.

ΔR_{Pmax} : Límite máximo de deriva de la resistencia patrón, obtenido a partir de su historial de calibración o de especificaciones del fabricante.

$\Delta u(x_i)/u(x_i)$: incertidumbre relativa de $u(x_i)$.

i : Usado como subíndice, indica cualquiera de los distintos subíndices que afectan a M .



I_C : Señal de intensidad de corriente generada por el instrumento a calibrar.

I_P : Señal de intensidad de corriente medida por el patrón

k : Factor de cobertura dado en la calibración.

k_P : Factor de cobertura obtenido del certificado de calibración de los patrones.

M_C : Señal de tensión o intensidad generada por el instrumento a calibrar.

M_P : Señal de tensión o intensidad medida por el patrón.

\overline{M}_P : Valor medio de las lecturas del patrón.

n : Número de lecturas.

\overline{R}_P : Valor certificado de la resistencia o shunt utilizados para la medida de intensidad de corriente.

T_{cal} : Temperatura de calibración.

T_{ref} : Temperatura de referencia, que figura en el certificado del patrón utilizado.

τ : Constante de tiempo característica de las resistencias en corriente alterna.

$u(c_C)$: Incertidumbre típica combinada de la corrección por calibración de la fuente.

$U(c_C)$: Incertidumbre típica expandida de la corrección por calibración de la fuente.

$u(cM_{Pcal})$: Incertidumbre debida a la calibración de los patrones.

$u(cM_{Pder})$: Incertidumbres por efecto de la deriva sobre los patrones.

$u(cM_{Pres})$: Incertidumbres por resolución del multímetro patrón.

$u(cM_{PT})$: Incertidumbres por efecto de la temperatura sobre los patrones.

$u(cR_{Pder})$: Incertidumbres por efecto de la deriva sobre la resistencia patrón.

$u(cR_{PT})$: Incertidumbres por efecto de la temperatura sobre la resistencia patrón.

$u(cV_{Pcal})$: Incertidumbre debida a la calibración del multímetro patrón.

$u(cV_{Pder})$: Incertidumbres por efecto de la deriva sobre el multímetro patrón.

$u(cV_{Pres})$: Incertidumbres por resolución del multímetro patrón.



$u(cV_{PT})$: Incertidumbres por efecto de la temperatura sobre el multímetro patrón.

$u(\overline{M}_P)$: Incertidumbre debida a la dispersión de las lecturas del patrón.

$u(M_C)$: Incertidumbre debida al instrumento a calibrar.

$u(R_P)$: Incertidumbre debida a la calibración de la resistencia patrón.

$u(V_C)$: Incertidumbre en tensión alterna del instrumento a calibrar.

$u(\overline{V}_P)$: Incertidumbre debida a la dispersión de las lecturas del patrón.

U_{Pcali} ; U_P : Incertidumbre típica expandida obtenida del certificado de calibración de los patrones.

V/A: Voltio / Amperio.

V_P : Valor de las lecturas en tensión del patrón.

\overline{V}_P : Valor medio de las lecturas en tensión del patrón.

v_{eff} : Grados de libertad efectivos del proceso de medida.

v_i : Número de grados de libertad efectivos asociado a la contribución de incertidumbre u_i .

5.- DESCRIPCIÓN

5.1.- Equipos y materiales

- Multímetro digital de alta exactitud (7½ dígitos ó 8½ dígitos) o voltímetro patrón de tensión alterna. El equipo ha de estar calibrado y ha de tener un alcance apropiado para la calibración. La relación entre la incertidumbre del multímetro y las especificaciones de la fuente ha de ser como mínimo de 3:1.

- Conjunto de Shunts o resistencias. Junto con el voltímetro utilizado, han de tener los valores de incertidumbre y rangos adecuados para la calibración de todos los valores de intensidad.

Las resistencias o shunts utilizados, deben estar calibradas para el valor de intensidad y en un rango en frecuencia que incluya todas las frecuencias a medir.

Para alterna, debido a que el multímetro mide la caída de



tensión eficaz en la impedancia equivalente de la resistencia, es necesario conocer para cada frecuencia el modulo de la misma. El valor de la resistencia o shunt en alterna suele darse de la siguiente forma:

$$R(f) = R (1+j2\pi f\tau) \quad (1)$$

siendo f la frecuencia y τ la constante de tiempo. Si la resistencia tiene una baja constante de tiempo la diferencia entre el modulo de la impedancia y el valor de la parte real es despreciable.

Si las resistencias no están calibradas en corriente alterna, también las se pueden utilizar si se conoce su valor certificado en intensidad de corriente continua y sabemos, o bien por certificación del fabricante o bien por un estudio previo, que su error en alterna es despreciable dentro de unos límites, que deberemos añadir a la incertidumbre, y por debajo de una determinada frecuencia.

Por otro lado, se debe tener en cuenta la curva de potencia del shunt, para poder hacer las correcciones necesarias en función de la potencia aplicada y la potencia máxima que se puede aplicar a las resistencias de manera que no se produzca un calentamiento significativo.

Además serán necesarios:

- Un ordenador, cuando la calibración se realiza controlando los instrumentos mediante un software.
- Cables: Se utilizarán los cables adecuados, en función de la magnitud y frecuencia a medir. Para evitar o reducir la interferencia con fuentes de ruido externas utilizar cables apantallados y trenzados o coaxiales. Los cables trenzados se pueden utilizar hasta frecuencias de 100 kHz y los coaxiales desde continua hasta 100 MHz.
- Termómetro. Con él se tomarán los valores de la temperatura a la que se realiza la calibración.

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.

- 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.
 - Se conectará a la red de alimentación eléctrica el instrumento a calibrar, durante un tiempo previo al inicio de la calibración, para conseguir la estabilización térmica. El tiempo de estabilización térmica cambia de un instrumento a otro, y viene indicado por su fabricante en su manual de utilización.
 - En el caso de que la fuente, disponga de una opción de autocalibración, que lleve asociada ajustes de sus constantes de calibración internas, nos aseguraremos de que esta no se realice antes de la calibración del equipo, de manera que se conozca el estado de éste cuando llegó al laboratorio.
 - Deberán mantenerse unas condiciones de referencia (ambientales, tensión, etc.) adecuadas para los patrones y para el instrumento a calibrar. Estas condiciones de referencia serán las que indique el fabricante en el manual de los equipos utilizados (generalmente, los laboratorios de medida de magnitudes eléctricas tienen la temperatura controlada a $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ y una humedad relativa del aire inferior al 70 %).
 - 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.
 - Se deberán evitar en lo posible, corrientes de aire y perturbaciones electromagnéticas, que afecten de modo apreciable a la medida.
- Conexión de pantallas y “guardas“

Para cada una de las magnitudes de medida las conexiones de las pantallas de los cables y las guardas de los



instrumentos deben hacerse de forma correcta para que sean efectivas. No existe una forma única de conexión por las distintas configuraciones de medida por lo que en cada caso debe analizarse y nunca realizar las conexiones de forma aleatoria. Los fabricantes de los instrumentos suelen dar en sus manuales indicaciones sobre las conexiones de las mismas.

De forma genérica se deben cumplir las siguientes reglas:

- Las pantallas de los cables deben conectarse al potencial de “Ground” en un solo punto.
- La guarda debe conectarse siempre, ya que puede producirse una diferencia de potencial excesiva entre el terminal de guarda y el de “LO” que puede dañar el instrumento. Los instrumentos en configuración de guarda interna conectan la guarda al “LO”.
- La guarda debe conectarse de forma que este al mismo potencial o muy próximo al potencial “LO” de la fuente o del multímetro.
- La guarda debe conectarse al potencial “LO” en uno y solo en un punto, normalmente en el punto en que el terminal “LO” se conecta al potencial de “Ground”.
- Cuando la fuente y el multímetro disponen de guarda (lo mas frecuente) las dos guardas han de conectarse entre sí, para ello se utiliza el apantallamiento de los cables, el terminal “LO” de la fuente se conecta al terminal de guarda, y la guarda ha de conectarse al terminal de “Ground” en la fuente o en el multímetro, preferiblemente en la fuente, pero nunca en los dos.

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 irreparables, 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.

5.3.- Proceso de calibración

Puntos de calibración:

Al no ser viable realizar la calibración para todas las posibles salidas de la fuente, ésta hay que limitarla a un número que garantice de forma razonable la trazabilidad del instrumento en todas las funciones y rangos de utilización.

Si el instrumento se destina a una única aplicación, la cual requiere realizar medidas en una serie de puntos especificados, la calibración más apropiada será en estos puntos, quedando el uso del instrumento limitado a dicha aplicación.

De forma general se recomienda realizar la calibración en al menos los siguientes puntos. Para todos los rangos de intensidad y tensión alterna realizar la calibración, en el 10 % y en el fondo del campo y para un número de frecuencias que deben incluir los límites inferior y superior del margen de funcionamiento o de utilización de la fuente, así como el suficiente número de puntos intermedios, (incluyendo una frecuencia de cada uno de los rangos de especificaciones establecidas por el fabricante o por las necesidades establecidas por el cliente), que nos permita caracterizar de forma fiable la dependencia con la frecuencia.

NOTA: Por ejemplo, para una fuente cuyo campo de funcionamiento en frecuencia esté comprendido entre 10 Hz y 100 kHz, una buena elección sería: 10 Hz, 50 Hz, 1 kHz, 50 kHz, 70 kHz y 100 kHz.

Proceso de calibración:

ADVERTENCIA: Al realizar las conexiones siempre seleccionar en la fuente salida cero, ya que, durante

las conexiones se puede pulsar inadvertidamente el pulsador de “operación”.

Calibración en tensión e intensidad de corriente alterna con un multímetro:

La calibración se realizará por comparación directa, aplicando la señal a calibrar a la entrada del multímetro o voltímetro y tomando las lecturas de éste, para, posteriormente calcular la corrección. El tratamiento siempre es el mismo, y consiste en comparar el valor generado por el instrumento a calibrar con el valor proporcionado por el patrón, restando ambos valores para obtener la corrección. Esto se repite para todos los puntos de medida necesarios para completar la calibración.

- Conectar el sistema de medida según la figura 1:

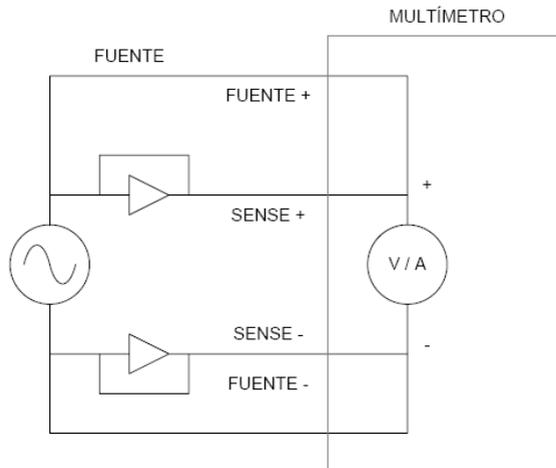


Figura 1. Esquema de calibración de una fuente de tensión e intensidad en corriente alterna

- Realizar la función cero del multímetro siguiendo las indicaciones del fabricante. Algunas fuentes también



requieren que se ejecute esta función para obtener sus mejores especificaciones de medida. Anotar en la hoja de toma de datos que se han realizado estas funciones.

- Configurar el multímetro en las mismas condiciones de medida que figuran en el certificado de calibración del mismo. Anotar estas condiciones en la hoja de toma de datos.
- Conectar la fuente al multímetro utilizando cables apantallados y trenzados de baja fuerza termo-electromotriz (utilizar también cables coaxiales para frecuencias superiores a 100 kHz).
- Introducir en la fuente, la tensión o intensidad de corriente y la frecuencia a calibrar.
- En el patrón, se obtendrá la lectura de la tensión o intensidad de la fuente.
- Para cada punto de calibración realizar al menos diez medidas y anotar, en la hoja de toma de datos, los valores medidos, el valor medio y la desviación típica experimental. Si una vez estabilizada la lectura no existe variación en la indicación del multímetro no es necesario anotar las diez lecturas. Si la variación de la lectura es pequeña (del orden de uno o dos dígitos), se anotarán los límites de variación de las mismas, en función del número de dígitos de la cifra menos significativa, de forma que todas las lecturas estén dentro de esos límites.
- Calcular la corrección de la fuente como la diferencia entre la lectura del patrón y el valor generado por el equipo a calibrar:

$$c_c = M_p - M_c \quad (2)$$

- Repetir las instrucciones anteriores para todos los puntos necesarios de medida, en todos los rangos, en su caso, del instrumento.
- Verificar que el error en el valor de salida de la fuente está dentro de los límites establecidos.

Calibración en intensidad de corriente alterna con un voltímetro y un juego de resistencias o shunts:

La calibración se realizará, aplicando la señal a calibrar a la entrada de los terminales de intensidad del shunt o

resistencia y conectando los terminales de potencial al voltímetro. Se tomarán las lecturas de este último, para, posteriormente, calcular la corrección. A partir de la ley de Ohm, se calculará el valor de la intensidad de corriente como el cociente entre el valor medio de la tensión obtenida en el voltímetro y el valor certificado de la resistencia o shunt utilizados. Esto se repite para todos los puntos de medida necesarios para completar la calibración.

- Conectar el sistema de medida según la figura 2.

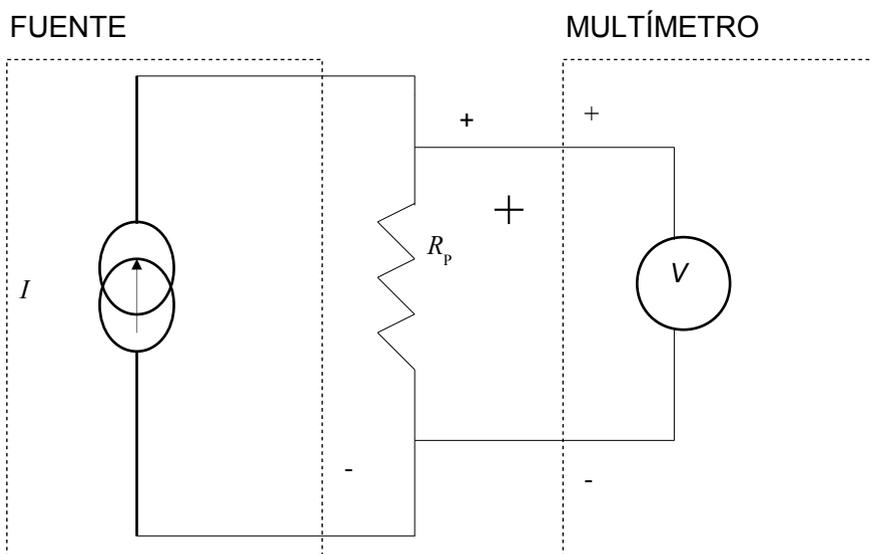


Figura 2. Esquema de calibración de una fuente en intensidad de corriente

- Configurar el multímetro en las mismas condiciones de medida que figuran en el certificado de calibración del mismo. Anotar estas condiciones en la hoja de toma de datos.



- Conectar los terminales de intensidad del shunt o de la resistencia a los terminales de intensidad de la fuente.
- Conectar el multímetro a los terminales de potencial del shunt o de la resistencia.
- Introducir en la fuente la intensidad de corriente y la frecuencia a calibrar.
- En el voltímetro patrón, se obtendrá la lectura de la tensión sobre los terminales de la resistencia.
- Para cada punto de calibración realizar al menos diez medidas y anotar, en la hoja de toma de datos, los valores medidos, el valor medio y la desviación típica experimental. Si una vez estabilizada la lectura no existe variación en la indicación del multímetro no es necesario anotar las diez lecturas. Si la variación de la lectura es pequeña (del orden de uno o dos dígitos), en este caso, se anotarán los límites de variación de las mismas, en función del número de dígitos de la cifra menos significativa, de forma que todas las lecturas estén dentro de esos límites.
- Calcular la corrección de la fuente como la diferencia entre el valor calculado de Intensidad y la intensidad generada por el equipo a calibrar:

$$c_c = I_p - I_c, \quad \text{con} \quad I_p = \frac{V_p}{R_p} \quad (3)$$

- Repetir las instrucciones anteriores para todos los puntos necesarios de medida, en todos los rangos o funciones, en su caso, del instrumento.
- Verificar que el error en el valor de salida de la fuente está dentro de los límites establecidos.

Controles a realizar entre calibraciones

Para asegurar el buen funcionamiento del equipo en el periodo comprendido entre calibraciones, se realizarán medidas en distintos puntos del alcance con un multímetro, verificando que el equipo encuentra dentro de los límites establecidos.

Si la fuente dispone de referencias internas y posibilidad de autocalibración, ésta se llevará a cabo entre calibraciones para verificar su comportamiento.



5.4.- Toma y tratamiento de datos

Para cada punto de calibración se anotarán los siguientes datos:

- Configuración de la fuente y del multímetro o voltímetro utilizado.
- Valor de la magnitud aplicada: Amplitud y frecuencia.
- Las lecturas obtenidas por el multímetro, la media y la desviación típica.

NOTA: Si se corrigieran las lecturas obtenidas, la corrección se sumaría al valor medio de las lecturas del multímetro en cada punto de calibración. Si la calibración se realiza en puntos diferentes a los del certificado de calibración, la corrección del valor se podrá obtener por interpolación entre los valores certificados.

-En el caso de intensidad de corriente, valor certificado de la resistencia o shunt, obtenida de su certificado de calibración.

- Corrección asociada a la calibración en cada punto (diferencia entre el valor medio obtenido y el valor aplicado por la fuente) y su desviación típica experimental correspondiente.

A continuación se compararán las correcciones obtenidas, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada, con las tolerancias asignadas a la fuente por el fabricante o con los valores preestablecidos por el usuario, si se conocen, en función del historial y deriva del equipo. En el caso de que una vez determinados las correcciones, existiera duda sobre alguno de los valores obtenidos, por tratarse por ejemplo, de correcciones muy superiores a las tolerancias asignadas, se repetirá la calibración en esos puntos para confirmar la bondad de los resultados obtenidos. En el caso de que la fuente se pueda ajustar, se ajustará (siempre que se disponga de la autorización previa del usuario) y se calibrará de nuevo, comprobando las tolerancias asignadas.

En el caso de ajuste se deben anotar, tanto los valores obtenidos antes como los obtenidos después de este.

La toma de datos se podrá realizar de forma manual o mediante ordenador y un bus de comunicación IEEE, que controle los equipos y realice los cálculos de la corrección.



En este último caso se deberá validar el programa informático utilizado antes de realizar la calibración, y se conservarán los ficheros de datos primarios que permitan reconstruir la calibración automática realizada, conservando los datos indicados anteriormente.

La calibración se realizará en las condiciones ambientales y de calibración indicadas en el procedimiento, y se rechazarán aquellos datos de los que se sospeche que no se obtuvieron en ellas. En el caso de que no sea posible, habrá que tener en cuenta su influencia.

Los datos se tomarán de forma que quede reflejado el lugar y fecha en la que se obtuvieron, así como los valores de las magnitudes involucradas.

6.- RESULTADOS

6.1.- Cálculo de incertidumbres

El cálculo de incertidumbres se realizará aplicando los criterios establecidos en la "Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, 3ª ed. en español (traducción de 1ª ed. 2008 en inglés), Centro Español de Metrología, 2009" [2] y la Guía CEA-ENAC-LC/02, Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones, Rev. 1, Enero 1998 [3].

En el Anexo 1 se incluye el desarrollo del cálculo de incertidumbres y la explicación de cómo se calcula cada contribución a la incertidumbre. A continuación se facilitan las tablas resumen a partir de las cuales se puede realizar el cálculo de la incertidumbre asociada a la calibración de fuentes de tensión e intensidad en corriente alterna de acuerdo con este procedimiento.

Calibración en tensión de corriente alterna con un multímetro:

Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distrib. de prob.	Coef. De sens. c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
\bar{M}_P	$\sum M_{P_i}/n$	$[\sum(M_{P_i} - \bar{M}_P)^2/n(n-1)]^{1/2}$	normal	1	$[\sum(M_{P_i} - \bar{M}_P)^2/n(n-1)]^{1/2}$
M_C	M_C	0		-1	0
cM_{Pcal}	0	U_{Pcal}/k_P	normal	1	U_{Pcal}/k_P
cM_{Pder}	0	$ \Delta M_{Pmax} /\sqrt{3}$	Rect.	1	$ \Delta M_{Pmax} /\sqrt{3}$
cM_{Pres}	0	$d_P/\sqrt{12}$	Rect.	1	$d_P/\sqrt{12}$
cM_{PT}	0	$[c_{PT} T_{cal} - T_{ref}]/\sqrt{3}$	Rect.	1	$[c_{PT} T_{cal} - T_{ref}]/\sqrt{3}$
c_C	$M_P - M_C$	Incertidumbre combinada		$\sqrt{\sum(u_i(y)^2)}$	
Número de grados efectivos de libertad $\nu_{ef} =$				$u^4/\sum(u_i^4/\nu_i)$	
Factor de cobertura $k =$				Según distribución t de student	
Incertidumbre expandida (k)				$k \cdot \sqrt{\sum(u_i(y)^2)}$	
Corrección no realizada máxima				b_{max}	
Incertidumbre global de calibración				$k \cdot \sqrt{\sum(u_i(y)^2)} + b_{max}$	

Tabla 1. Resumen de valores de incertidumbre en la calibración en tensión e intensidad de corriente alterna con un multímetro

NOTA:

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

Calibración en tensión e intensidad de corriente alterna con un voltímetro y un juego de resistencias o shunts:

Magnit X_i	Valor estima do x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distrib. de Prob.	Coef. de Sens. c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
\bar{V}_P	$\sum V_{Pj}/n$	$[\sum (V_{Pj} - \bar{V}_P)^2/n(n-1)]^{1/2}$	Norm.	$1/R_P$	$(1/R_P) \cdot \{[\sum (V_{Pj} - \bar{V}_P)^2/n(n-1)]^{1/2}\}$
R_P	R_P	U_{Pcal}/K_P	Norm.	$-V_P/R_P^2$	$(-V_P/R_P^2) \cdot (U_{Pcal}/K_P)$
cV_{Pcal}	0	U_{Pcal}/K_P	Norm.	$1/R_P$	$(1/R_P) \cdot (U_{Pcal}/K_P)$
cV_{Pder}	0	$ \Delta V_{Pmax} /\sqrt{3}$	Rect.	$1/R_P$	$(1/R_P) \cdot (\Delta V_{Pmax} /\sqrt{3})$
cV_{Pres}	0	$d/\sqrt{12}$	Rect.	$1/R_P$	$(1/R_P) \cdot (d/\sqrt{12})$
cV_{PT}	0	$[c_{PT} T_{cal} - T_{ref}]/\sqrt{3}$	Rect.	$1/R_P$	$(1/R_P) \cdot (c_{PT} T_{cal} - T_{ref}]/\sqrt{3})$
cR_{Pder}	0	$ \Delta R_{Pmax} /\sqrt{3}$	Rect.	$-V_P/R_P^2$	$(-V_P/R_P^2) \cdot (\Delta R_{Pmax} /\sqrt{3})$
cR_{PT}	0	$[c_{RPT} T_{cal} - T_{ref}]/\sqrt{3}$	Rect.	$-V_P/R_P^2$	$(-V_P/R_P^2) \cdot (c_{RPT} T_{cal} - T_{ref}]/\sqrt{3})$
c_c	$I_P - I_C$	Incertidumbre combinada		$\sqrt{\sum (u_i(y))^2}$	
Número de grados efectivos de libertad $\nu_{ef} =$			$u^4/\sum (u_i^4/\nu_i)$		
Factor de cobertura $k =$			Según distribución t de student		
Incertidumbre expandida (k)			$k \cdot \sqrt{\sum (u_i(y))^2}$		
Corrección no realizada máxima			b_{max}		
Incertidumbre global de calibración			$k \cdot \sqrt{\sum (u_i(y))^2} + b_{max}$		

Tabla 2. Resumen de valores de incertidumbre en la calibración en tensión e intensidad de corriente alterna con un voltímetro y un juego de resistencias o shunts

NOTA:

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

En el Anexo 2 se incluye un ejemplo numérico de aplicación del cálculo de incertidumbres.

6.2.- Interpretación de resultados

Se deberán establecer, en función del uso previsto para la fuente, unos límites de tolerancia de calibración, 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:



- a) $c_c \pm U(c_c)$ dentro de los límites de tolerancia: La fuente puede destinarse libremente a su uso previsto.
- b) $c_c \pm U(c_c)$ fuera de los límites de tolerancia: La fuente debe retirarse del servicio y repararse, ajustarse, darse de baja o destinarse a una aplicación menos exigente.
- c) $c_c \pm U(c_c)$ parcialmente dentro de los límites de tolerancia: La fuente será tratada como en b) salvo que se resuelva la indeterminación (por ejemplo recalculando el resultado realizando todas las correcciones posibles).

En caso de que sea necesario realizar un ajuste, se procederá a una nueva calibración completa, y en el certificado de calibración figuren los resultados de la calibración antes y después de los ajustes realizados.

Un período razonable para la recalibración de estos instrumentos será de 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. No obstante el responsable final de asignar el período de recalibración, y revisarlo cuando sea preciso, es siempre el usuario del equipo, considerando, por ejemplo, los resultados obtenidos con respecto a las calibraciones anteriores y las tolerancias admisibles.

7.- REFERENCIAS

[1] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados. 3ª ed. en español (traducción de 3ª ed. en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO 706-09-001-0.

[2] Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, 3ª ed. en español (traducción de 1ª ed. 2008 en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO: 706-09-002-6.



- [3] Guía CEA-ENAC-LC/02, Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones, Rev. 1, Enero 1998.
- [4] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 2, Tres Cantos, Madrid. Año 2000.
- [5] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía. 1994.
- [6] Manual de funcionamiento de la fuente.
- [7] Manual de funcionamiento del multímetro o voltímetro patrón.
- [8] Manual de funcionamiento de los shunts y resistencias.

8.- ANEXOS

- ANEXO 1.- Desarrollo del cálculo de incertidumbres.
- ANEXO 2.- Ejemplo numérico.



ANEXO 1

DESARROLLO DEL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES



Calibración en tensión e intensidad de corriente alterna con un multímetro:

- a) En primer lugar se determinará la expresión de la magnitud de salida (la corrección de la fuente en cada punto de calibración), en función de las distintas magnitudes de entrada.

Para una magnitud genérica M (que puede ser tensión o intensidad de corriente), La expresión, considerando todas aquellas correcciones que afectarían al resultado (aunque como corrección sea nula) sería:

$$c_C = (\overline{M}_P + cM_{Pcal} + cM_{Pder} + cM_{Pres} + cM_{PT}) - (M_C) \quad (4)$$

- b) En la ecuación (4) hay componentes asociadas al patrón y otras asociadas al instrumento a calibrar. Aplicando la ley de propagación de incertidumbres, considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, se obtiene:

$$u^2(c_C) = u^2(\overline{M}_P) + u^2(cM_{Pcal}) + u^2(cM_{Pder}) + u^2(cM_{Pres}) + u^2(cM_{PT}) + (-1)^2 \cdot u^2(M_C) \quad (5)$$

- c) Se evalúan a continuación todas las componentes que aparecen en esta ecuación:

$u(\overline{M}_P)$: Esta componente corresponde a la incertidumbre de tipo A de las medidas y se estima como la desviación típica de la media de sus lecturas.

$$u(\overline{M}_P) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (M_{Pj} - \overline{M}_P)^2}{n(n-1)}} \quad (6)$$



En el caso de que la variación de las lecturas sea muy pequeña (del orden de uno o dos dígitos) se tomarán los límites dentro de los que varía la lectura en el entorno de su valor medio en forma de dígitos, ($\pm d_P$), en lugar, de los diez valores individuales. La incertidumbre típica corresponderá a la de una distribución rectangular y su valor será $d_P/\sqrt{3}$. El valor de esta contribución se expresará en unidades homogéneas con el resto de contribuciones. Por ejemplo si al aplicar al multímetro 100 V, las lecturas varían entre 100,000 01 V y 100,000 03 V El valor sería 100,000 02 V $\pm 1 d_P$. La incertidumbre típica correspondiente a esta a contribución será 0,000 01 V / $\sqrt{3}$.

$u(cM_{Pcal})$: Incertidumbre de calibración del valor proporcionado por el multímetro patrón. Se obtiene de sus registros o certificado de calibración, dividiendo por el correspondiente factor de cobertura, k (normalmente 2).

$$u(cM_{Pcal}) = U_{Pcal}/k_P \quad (7)$$

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_{Pcal} y k_P el valor máximo de U_{Pcal}/k_P , en valor absoluto o si resultase más conveniente trabajando con valores relativos, de los indicados en el certificado de calibración del patrón. En este caso se sumará a $k \cdot u$ la máxima corrección que aparezca en el certificado de calibración.

$u(cM_{Pder})$: Incertidumbre del valor proporcionado por el patrón debido a la deriva. Se obtiene a partir de las especificaciones del fabricante, tomando el valor de exactitud dado por éste, como un límite máximo suponiendo una distribución rectangular.

Si existe historial del instrumento, entonces se aplica la mayor desviación, en valor absoluto, que se haya obtenido entre calibraciones y se considera como el semi-intervalo de una distribución rectangular.

$$u(cM_{Pder}) = \frac{|\Delta M_{Pmax}|}{\sqrt{3}} \quad (8)$$



$u(cM_{Pres})$: Esta componente, corresponde a la incertidumbre de los valores medidos debida a la resolución del multímetro. Se estiman suponiendo una distribución rectangular de amplitud igual a un dígito de resolución y centrada en el valor leído.

$$u(cM_{Pres}) = \frac{d_p}{\sqrt{12}} \quad (9)$$

$u(cM_{PT})$: Esta componente corresponde a la incertidumbre de los valores medidos debido al efecto de la temperatura sobre los instrumentos de medida. Se estima a partir de las especificaciones del fabricante o del certificado de calibración del patrón. Esta se determinará multiplicando el intervalo de variación de temperatura por el coeficiente de temperatura del patrón.

$$u(cM_{PT}) = \frac{c_{PT} |T_{ref} - T_{cal}|}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

NOTA 1: Para el caso de un multímetro, el fabricante da normalmente un coeficiente en función de variaciones de temperatura en un rango o fuera de él. De manera que si la calibración se realiza dentro de ese rango, la incertidumbre por esta contribución sería cero.

NOTA 2: El coeficiente de temperatura se da a veces en valor relativo, en cuyo caso, habría que multiplicar por el valor medio patrón o el valor indicado por la fuente.

$u(M_C)$: La incertidumbre debida a la fuente se considera cero, ya que las variaciones debida a la inestabilidad de ésta y al gradiente de temperatura, se verán reflejadas en las lecturas del multímetro. Por otro lado, no se considera incertidumbre debida a la resolución de la fuente, ya que el valor generado por ésta es un valor fijo.

- d) La incertidumbre típica de la magnitud de salida, $u(c_C)$, se hallará como la raíz cuadrada de la suma cuadrática de todas las contribuciones de las magnitudes de entrada.
- e) Deben calcularse los grados de libertad efectivos del proceso de medida usando para ello la fórmula de Welch-Satterthwaite:



$$v_{eff} = \frac{u^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (11)$$

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 $n-1$ [2]. Para incertidumbres tipo B, los grados de libertad se pueden calcular como [2]:

$$v_i \cong \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad (12)$$

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. Si la contribución de tipo B se ha supuesto como rectangular y se ha estimado a partir de un límite superior fiable del máximo error debido a esa causa, el v_i se considerará infinito; en el caso de la contribución por calibración, el v_i se obtendrá a partir de la tabla de la t de Student (si no se especifica en el certificado) en función del valor de k y del nivel de confianza para el que se haya dado.

Una vez calculado el número efectivo de grados de libertad, se determina el factor de cobertura k que corresponde a un intervalo de confianza de aproximadamente el 95 % según la distribución de Student.

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

$$U(c_c) = k \cdot u(c_c) \quad (13)$$

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 la referencia [2], sumándose linealmente a $k \cdot u(c_C)$ el valor máximo, b_{\max} , de dicha corrección no realizada (expresado en las unidades adecuadas)

$$U = k \cdot u(c_C) + b_{\max} \quad (14)$$

Si la corrección sobre la lectura del multímetro se realiza en puntos distintos a los de calibración, habría que sumar aquí la corrección residual estimada como la máxima diferencia entre los valores dados por la recta o curva de interpolación y los valores dados por los puntos de calibración.

En el caso de utilizar multímetro y shunt, b_{\max} sería el valor máximo en valor absoluto de V_P/R_P con correcciones de V_P y R_P (este último, si no se utiliza el valor certificado) y V_P/R_P utilizado para dar el resultado del valor patrón de la calibración.

Calibración en intensidad de corriente alterna con un voltímetro y un juego de resistencias o shunts:

- a) Para este caso el cálculo sería muy similar, pero teniendo en cuenta que $I_P = \frac{V_P}{R_P}$ y añadiendo las componentes de incertidumbre debidas a la resistencia patrón utilizada.

El modelo matemático a aplicar será,

$$c_C = \frac{\left(\overline{V_P} + cV_{Pcal} + cV_{Pder} + cV_{Pres} + cV_{PT} \right)}{\left(R_P + cR_{Pder} + cR_{PT} \right)} - (I_C) \quad (15)$$

- b) Aplicando la ley de propagación de incertidumbres, considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 u^2(c_C) = & \left(\frac{1}{R_P}\right)^2 u^2(\overline{V}_P) + \left(\frac{1}{R_P}\right)^2 u^2(cV_{Pcal}) + \left(\frac{1}{R_P}\right)^2 u^2(cV_{Pder}) + \left(\frac{1}{R_P}\right)^2 u^2(cV_{Pres}) + \left(\frac{1}{R_P}\right)^2 u^2(cV_{PT}) \\
 & \left(\frac{-\overline{V}_P}{R_P^2}\right)^2 u^2(R_P) + \left(\frac{-\overline{V}_P}{R_P^2}\right)^2 u^2(cR_{Pder}) + \left(\frac{-\overline{V}_P}{R_P^2}\right)^2 u^2(cR_{PT}) + (-1)^2 u^2(I_C)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

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

- c) Los términos de esta ecuación asociados a V_P , ya se han evaluado en el apartado anterior. Los términos asociados a R_P se estimarían como:

$u(R_P)$: Incertidumbre de calibración del valor proporcionado por el certificado de la resistencia o shunt patrón. Se obtiene de sus registros o certificado de calibración, dividiendo por el correspondiente factor de cobertura, k (normalmente 2).

$$u(R_P) = U_{Pcal}/k_P \tag{17}$$

NOTA: Si no se utilizara el valor certificado de R_P , sino su valor nominal, se debería corregir a la incertidumbre final el error cometido al hacer esta aproximación, sumando en este caso a $k \cdot u$ la corrección que aparezca en el certificado de calibración.

$u(cR_{Pder})$: Incertidumbre del valor proporcionado por la resistencia debido a la deriva. Se obtiene a partir de las especificaciones del fabricante, tomando el valor de exactitud dado por éste, como un límite máximo suponiendo una distribución rectangular.

Si existe historial del instrumento, entonces se aplica la mayor desviación, en valor absoluto, que se haya obtenido entre calibraciones y se considera como el semi-intervalo de una distribución rectangular.

$$u(cR_{Pder}) = \frac{|\Delta R_{Pmax}|}{\sqrt{3}} \tag{18}$$



$u(cR_{PT})$: Esta componente corresponde a la incertidumbre de los valores medidos debido al efecto de la temperatura sobre la resistencia patrón. Esta se determinará multiplicando el intervalo de variación de temperatura por el coeficiente de temperatura de la resistencia y suponiendo una distribución rectangular.

$$u(cR_{PT}) = \frac{c_{RpT} |T_{ref} - T_{cal}|}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

NOTA: El coeficiente de temperatura se da a veces en valor relativo, en cuyo caso, habría que multiplicar por el valor de la resistencia o shunt.

- d) La incertidumbre típica de la magnitud de salida, $u(c_C)$, se hallará como la raíz cuadrada de la suma cuadrática de todas las contribuciones de las magnitudes de entrada.
- e) Se aplicará lo expuesto en el caso anterior.
- f) Se aplicará lo expuesto en el caso anterior.



ANEXO 2

EJEMPLO NUMÉRICO

Se han realizado las medidas de la calibración de una fuente en tensión alterna a 100 V y 10 kHz utilizando un multímetro de 7½ dígitos, siguiendo las instrucciones de este procedimiento.

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

Para la calibración se dispone de la siguiente información:

- Del certificado de calibración del multímetro se obtiene que la corrección es de $20 \cdot 10^{-6}$, con una incertidumbre para $k = 2$, en el rango de 200 V de $\pm (6 \cdot 10^{-6} + 10 \mu\text{V})$.
- El fabricante del multímetro, asegura que para una temperatura comprendida en el rango de (23 ± 5) °C y siempre que se sigan las instrucciones correctas de funcionamiento, no será necesario corrección por efecto de deriva debida a variaciones de la temperatura ambiente.
- Las lecturas obtenidas en el multímetro, en el rango de 200 V son:

Salida del generador	Indicaciones del multímetro
V_C	V_P
100, 000 V	100, 000 83 V
100, 000 V	100, 000 77 V
100, 000 V	100, 000 79 V
100, 000 V	100, 000 82 V
100, 000 V	100, 000 80 V
100, 000 V	100, 000 80 V
100, 000 V	100, 000 79 V
100, 000 V	100, 000 78 V
100, 000 V	100, 000 82 V
100, 000 V	100, 000 84 V

Tabla 3. Lecturas obtenidas por el multímetro

- a) En primer lugar se determinará la expresión de la magnitud de salida, c_C , en función de las distintas magnitudes de entrada.

$$c_C = (\overline{V_P} + cV_{P_{cal}} + cV_{P_{der}} + cV_{P_{res}} + cV_{P_T}) - (V_C).$$



- b) Aplicando la ley de propagación de incertidumbres, considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, se obtiene:

$$u^2(c_C) = u^2(\overline{V_P}) + u^2(cV_{Pcal}) + u^2(cV_{Pder}) + u^2(cV_{Pres}) + u^2(cV_{PT}) + (-1)^2 \cdot u^2(V_C),$$

donde:

- $u(\overline{V_P})$: Los datos se han obtenido a partir de cinco mediciones y, por tanto, la incertidumbre típica asociada a la media aritmética de estas medidas será:

Media aritmética de V_P : 100,000 80 V.

Desviación típica experimental: $s(V_P)$: 0,000 027 V.

Desviación típica de la media: $s(\overline{V_P}) / \sqrt{10} = u(V_P) = 0,000 007$ V.

- $u(cV_{Pcal})$: Del certificado de calibración del multímetro se obtiene que para el rango de 200 V la incertidumbre para $k = 2$, es:

$$u(V_{Pcal}) = (6 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \text{ V} + 10 \cdot 10^{-6} \text{ V})/2 = 0,000 31 \text{ V}.$$

- $u(cV_{Pder})$: Del histórico del instrumento, se obtiene que la mayor desviación que se ha obtenido entre calibraciones es, para este punto, de $5 \cdot 10^{-6}$ y considerándolo como el semi-intervalo de una distribución rectangular, se tiene:

$$u(cV_{Pder}) = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ en valor relativo y por tanto } 0,000 29 \text{ V}.$$

- $u(cV_{Pres})$: Un multímetro digital de $7^{1/2}$ dígitos, usado en el rango de 200 V, tiene una incertidumbre de $\pm 0,000 005$ V, que corresponde a una resolución de 0,000 01 dígito en cada indicación. Suponiendo una distribución rectangular tendríamos:

$$u(cV_{Pres}) = (0,000 01/\sqrt{12}) \text{ V} = 0,000 002 9 \text{ V}.$$

- $u(cV_{PT})$: Se considera cero ya que el intervalo de variación de temperatura del laboratorio es inferior al especificado por el fabricante.

- $u(V_C)$: La incertidumbre debida a la fuente, se considera cero, ya que las variaciones debida a la inestabilidad de ésta y al gradiente de temperatura, se verán reflejadas en las lecturas del multímetro. Por otro lado, no se considera incertidumbre debida a la resolución, ya que el valor generado por la fuente es un valor fijo.

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

$$u^2(c_C) = u^2(\overline{V_P}) + u^2(cV_{Pcal}) + u^2(cV_{Pder}) + u^2(cV_{Pres}) + u^2(cV_{PT}) + (-1)^2 \cdot u^2(V_C).$$

Aplicando la fórmula anterior y extrayendo la raíz cuadrada, se obtiene:

$$u(c_C) = 0,000\ 42\ V.$$

- d) Para calcular la incertidumbre expandida, aplicamos la fórmula de Welch-Satterthwaite y considerando lo expuesto sobre distribuciones rectangulares y grados efectivos de libertad en el procedimiento y el certificado de calibración de el patrón corresponde a una distribución normal con $k = 2$, se obtiene:

$$v_{eff} = \frac{u(c_C)^4}{\frac{u(\overline{V_P})^4}{9}} = \frac{(0,00042)^4}{\frac{(0,000007)^4}{9}} = 1,16 \cdot 10^8.$$

Se obtiene una v_{eff} muy alta (> 50) y por lo tanto podemos suponer $k = 2$, para un nivel de confianza de aproximadamente el 95 %.

- e) Al no haber realizado la corrección sobre las lecturas del multímetro, debemos añadir a la incertidumbre el valor de b_{max} :

Según el certificado, la corrección en este punto sería de $20 \cdot 10^{-6}$, sobre las lecturas del multímetro, con lo que se obtiene:

$$b_{max} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot (100\ V) = 0,002\ V.$$

La incertidumbre expandida, es $U(c_C) = 0,000\ 84\ V + 0,002\ V = 0,002\ 84\ V$ con $k = 2$.

A continuación se facilita un resumen del análisis de incertidumbres en forma de tabla:

Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distrib. De Prob.	Coef. de Sens c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
$\overline{V_P}$	100,000 80 V	$0,7 \times 10^{-5}\ V$	Norm.	1	$0,7 \times 10^{-5}\ V$
cV_{Pcal}	0	0,000 31 V	Norm.	1	0,000 31 V
cV_{Pder}	0	0,000 29 V	Rect	1	0,000 29 V
cV_{Pres}	0	$2,9 \times 10^{-6}\ V$	Rect	1	$2,9 \times 10^{-6}\ V$



c_c	0,000 080 V	Incertidumbre combinada	0,000 42 V
Número de grados efectivos de libertad $v_{ef} =$			$1,16 \cdot 10^8$
Factor de cobertura $k =$			2
Incertidumbre expandida ($k = 2$)			0,000 84 V
Corrección no realizada máxima			0,002 V
Incertidumbre global de calibración			0,002 84 V

Tabla 4. Resumen del análisis de incertidumbre

Expresión del resultado de la calibración:

La corrección de indicación de la fuente calibrada para este punto es:
teniendo en cuenta que $c_c = V_p - V_c = 100 \text{ V} - 100,000 80 \text{ V}$ y por tanto $c_c = 0,000 80 \text{ V}$.

$$c_c = (0,000 8 \pm 0,002 8) \text{ V}.$$

La incertidumbre de calibración indicada, corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura de $k = 2$, que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95 % aproximadamente.

A la fuente, se le ha establecido un periodo de calibración de un año y unos límites de tolerancia para el ajuste de sus especificaciones a un año. El fabricante establece para este instrumento en su función de tensión, y para el campo de 200 V una especificación relativa de $\pm 0,008 \text{ V}$. Por consiguiente y teniendo en cuenta la corrección obtenida con su incertidumbre asociada, no es necesario realizar el ajuste del mismo.

