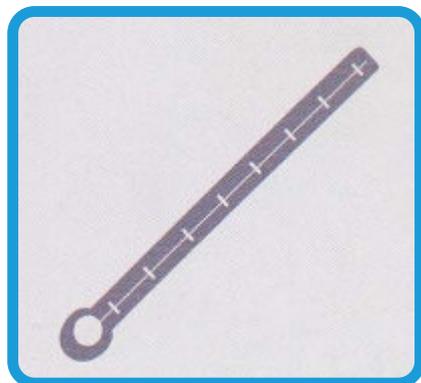
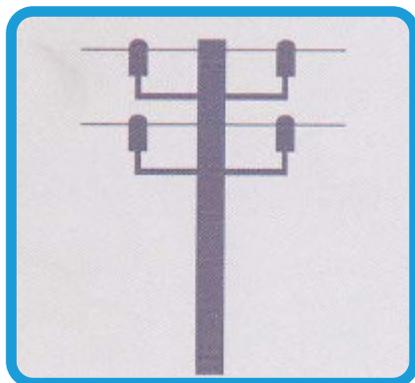
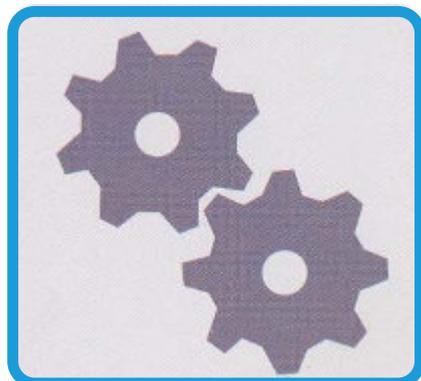
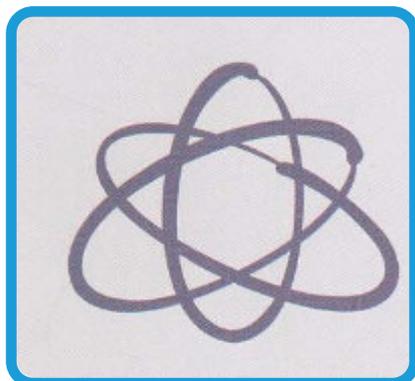
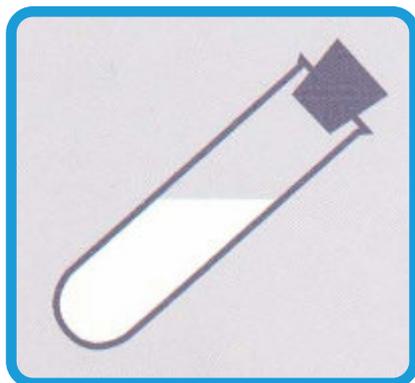
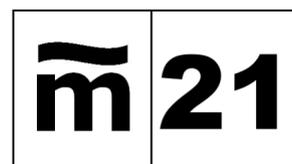


# Metrología



PROCEDIMIENTO EL-020 PARA LA  
CALIBRACIÓN DE MULTÍMETROS  
DIGITALES CON MÁS DE 5 ½  
DÍGITOS DE RESOLUCIÓN



## PROCEDIMIENTO EL-020

### PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE MULTÍMETROS DIGITALES CON MAS DE 5 ½ DÍGITOS DE RESOLUCIÓN

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

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

Los procedimientos editados por el CEM presentan modelos de calibración, en línea con documentos clave universales como son el Sistema Internacional de unidades (SI), el Vocabulario internacional de metrología (VIM) o la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Como modelos que son, los usuarios de los mismos pueden, bajo su responsabilidad, modificarlos para adecuarlos a sus necesidades específicas (instrumentación, condiciones ambientales, etc.). En tal caso, siempre deberá primar el sentido crítico y la ética profesional.

El CEM no acepta ninguna responsabilidad derivada de la interpretación y/o uso de este procedimiento.

El CEM no mantiene correspondencia sobre el contenido de los procedimientos.

## ÍNDICE

	Página
1. OBJETO .....	3
2. ALCANCE .....	3
3. DEFINICIONES .....	4
4. GENERALIDADES .....	7
5. DESCRIPCIÓN .....	8
5.1 Equipos y materiales.....	8
5.2 Operaciones previas.....	8
5.3 Proceso de calibración .....	10
5.3.1 Secuencias posibles de calibración.....	10
5.3.2 Definición de los puntos de medida.....	11
5.3.3 Conexiones y realización de las medidas .....	12
5.3.3.1 Tensión continua .....	14
5.3.3.2 Tensión alterna.....	15
5.3.3.3 Intensidad continua.....	15
5.3.3.4 Intensidad alterna .....	16
5.3.3.5 Resistencia.....	17
5.4 Toma y tratamiento de datos .....	17
6. RESULTADOS.....	18
6.1 Cálculo de incertidumbre.....	18
6.1.1 Asignación de las componentes de incertidumbre .....	19
6.1.2 Balance de las componentes.....	23
6.1.3 Cálculo de la incertidumbre expandida.....	24
6.2 Interpretación de los resultados.....	24
7. REFERENCIAS .....	25
7.1 Documentos necesarios para realizar la calibración.....	25
7.2 Otras referencias para consulta.....	25
8. ANEXO: EJEMPLO NUMÉRICO .....	25
8.1 Datos de partida.....	25
8.2 Determinación del error asociado a la calibración .....	26
8.3 Asignación de las componentes de la incertidumbre .....	27
8.4 Balance de las componentes .....	28
8.5 Cálculo de la incertidumbre expandida .....	29
8.6 Expresión del resultado de la calibración .....	29

## 1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de multímetros digitales cuya resolución sea mayor de  $5 \frac{1}{2}$  dígitos.

Según la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica [6] este equipo se denomina técnicamente multímetro numérico y su código de identificación es el 13.03, no obstante se empleará la denominación de multímetro digital a lo largo de este procedimiento, por ser esta última mayoritariamente empleada tanto en empresas como en laboratorios.

## 2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se limita a la calibración de multímetros digitales de elevada exactitud en la que se utiliza un calibrador multifunción como elemento de transferencia de la tensión e intensidad, tanto alterna como continua, aprovechando su alta estabilidad a corto plazo. Para materializar la resistencia eléctrica se utilizan resistencias patrón o bien podría emplearse la resistencia sintetizada por el calibrador multifunción, si bien para el uso de este último serían de aplicación los mismos condicionantes que se establezcan con el resto de las magnitudes antes mencionadas.

Sería recomendable que se satisficiera el principio básico de que la incertidumbre de calibración se encuentre preferiblemente entre un tercio y una décima parte del error de utilización permitido para el instrumento a calibrar [7], empleándose el procedimiento de calibración aquí descrito, dependiendo en cualquier caso de las características del calibrador multifunción, de las resistencias patrón utilizadas y del multímetro digital a calibrar. En la siguiente tabla se recoge la relación entre la incertidumbre de uso de un calibrador multifunción en diferentes momentos tras su calibración y la exactitud de un multímetro digital utilizando las especificaciones entregadas por su fabricante a un año:

Calibrador multifunción		Resolución del multímetro	
		$6 \frac{1}{2}$	$7 \frac{1}{2}$ ó $8 \frac{1}{2}$
Tiempo desde su calibración	24 horas	10:1	4:1
	90 días	4:1	2:1
	1 año	2:1	1:1

Esta tabla pretende ser orientativa ya que, obviamente, depende de la magnitud considerada, del calibrador multifunción a utilizar y del multímetro digital bajo prueba. No obstante, tal y como se deduce de la tabla, por ejemplo, para calibrar un multímetro de  $8 \frac{1}{2}$  dígitos, considerando como límites máximos de error permitido sus especificaciones a un año, manteniendo una relación de 4:1, es necesario calibrar el calibrador multifunción y utilizarlo dentro de las 24 horas siguientes a este proceso para aprovechar su buena estabilidad durante ese intervalo de tiempo. También es evidente que si se utilizan límites más restrictivos para el multímetro digital, la relación puede ser inferior llegando incluso a relaciones del tipo 1:1.

Este procedimiento es aplicable a la calibración de multímetros digitales con capacidad para medir las magnitudes antes citadas en los siguientes rangos:

- Tensión continua: 10 mV a 1000 V
- Tensión alterna: 10 mV a 1000 V (10 Hz a 1 MHz)
- Intensidad continua: 100  $\mu$ A a 2 A
- Intensidad alterna: 10 mA a 2 A (10 Hz a 10 kHz)
- Resistencia: 1  $\Omega$  a 100 M $\Omega$

### 3. DEFINICIONES

La terminología que se utiliza en este procedimiento es la del VIM, referencia [1]. No obstante se recogen a continuación algunas definiciones específicas útiles para la comprensión del mismo.

#### **Ajuste de un instrumento 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.

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 la ganancia).

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

Después de su ajuste, generalmente un sistema de medida debe ser calibrado nuevamente. El ajuste puede ser automático, semiautomático o manual.

#### **Autocalibración [4]:**

Proceso de calibración interna de un instrumento con el propósito de mejorar su exactitud.

#### **Calibración [1] (2.39):**

Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.

El resultado de una calibración permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando o bien determinar las correcciones a aplicar en las indicaciones.

Una calibración puede servir también para determinar otras propiedades metroológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.

Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento denominado a veces certificado de calibración o informe de calibración.

#### **Calibrador multifunción [6]:**

Instrumento que suministra en sus bornes de salida las magnitudes: tensión continua y alterna, intensidad continua y alterna y resistencia, en distintos rangos y que son necesarias para la calibración tanto de multímetros digitales como analógicos, así como otros instrumentos eléctricos de aplicación más específica. Por sus características constituye por sí sólo un pequeño laboratorio de calibración.

#### **Desviación típica experimental:**

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  $\bar{x}$  la media aritmética de las  $n$  mediciones consideradas

Considerando la serie de  $n$  valores como muestra de una distribución,  $\bar{x}$  es un estimador insesgado de la media  $\mu$ , y  $s^2$  es un estimador insesgado de la varianza  $\sigma^2$  de dicha distribución.

La expresión  $s / \sqrt{n}$  es una estimación de la desviación estándar de la distribución de la media de  $x$  y se denomina desviación estándar experimental de la media.

La desviación típica experimental de la media en ocasiones se denomina, incorrectamente, error de la medida.

**Error de indicación de un instrumento de medida [1] (2.16):**

Indicación de un instrumento de medida menos un valor verdadero de la magnitud de entrada correspondiente.

Este concepto se aplica principalmente cuando se compara el instrumento con un patrón de referencia.

Dado que un valor verdadero no puede determinarse, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero.

Para una medida materializada la indicación es el valor que le ha sido asignado.

**Incertidumbre de medida [1] (2.26):**

Parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

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 típicas experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por sus desviaciones típicas, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.

El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica (o un múltiplo de esta) o la semiamplitud

Se entiende que el resultado de una 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.

**Linealidad [8]:**

Descripción de cómo la ganancia de un instrumento basado en un conversor analógico/digital puede variar con la amplitud de la señal medida. Este término no debe ser confundido con el coeficiente de potencia, que es una medida del autocalentamiento en los atenuadores resistivos.

**Rechazo al modo común [8]:**

Es una medida de cómo un multímetro digital responde a la presencia de un tipo particular de interferencia producida por una señal continua o alterna. Si una tensión se aplica simultáneamente a ambas entradas de un amplificador operacional no debería percibirse ningún cambio en la señal de salida. En la práctica debido a pequeñas variaciones en la ganancia de las etapas complementarias internas del amplificador con la amplitud, habrá un cambio en la salida, incluso aunque las entradas estén al mismo nivel común.

**Resistencia de entrada [8]:**

Es un parámetro de suma importancia en un multímetro porque describe el potencial efecto de carga del multímetro sobre el circuito de medida. Suele ser de gran valor en medidas de tensión continua y de un valor más reducido en medidas de tensión alterna, acompañado en estas últimas de una capacidad en paralelo.

**Guarda [8]:**

Una guarda es un circuito que puede ser utilizado para interceptar, desviar o controlar las corrientes de fugas. Puede ser pasivo, donde es simplemente un apantallamiento alrededor de los componentes más sensibles y circuitos, o activo, donde amplificadores miden y controlan el potencial de la pantalla.

**Resistencia patrón:**

Elemento de referencia de resistencia eléctrica. Lo más frecuente es que sus nominales sean potencias enteras de diez, construyéndose valores desde 100  $\mu\Omega$  a 100 M $\Omega$ . Se suelen construir con cuatro terminales, dos para las tomas de corriente y otros dos para las de tensión, de forma que se disminuya el efecto de las conexiones. Algunas pueden sumergirse en baños de aceite que minimizan los gradientes de temperatura y los efectos de autocalentamiento durante su utilización.

**Resolución (de un dispositivo visualizador) [1] (4.15):**

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

Para un dispositivo visualizador digital, diferencia de la indicación que corresponde al cambio de una unidad en la cifra menos significativa.

Este concepto se aplica también a un dispositivo registrador.

La resolución de un multímetro digital se expresa muy frecuentemente como un número entero y una fracción, donde el primer número representa el número de dígitos que pueden variar de 0 a 9; la fracción expresa que el primer número puede tomar uno o más valores distintos de cero. La fracción se determina indicando en el numerador el número de valores posibles del primer dígito, excluyendo el cero, siendo el denominador el número total de valores incluido el cero.

**Respuesta en frecuencia [8]:**

Tradicionalmente, la respuesta en frecuencia se interpreta como el punto a 3 dB, es decir, el punto de alta frecuencia para el cual la lectura se ha reducido un 70,7 % de su nominal en baja frecuencia. El fabricante del multímetro utilizará diferentes técnicas tanto hardware como software para hacer que el punto de - 3 dB sea lo más alto posible. Una característica, quizás de mayor importancia, es su planitud, que es una medida de la desviación de la respuesta esperada plana y la real y que depende de la técnica de conversión RMS utilizada.

**Trazabilidad [1] (2.41):**

Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

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.

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.

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.

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.

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. A menudo este concepto se expresa por el adjetivo trazable.

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) [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. La cadena ininterrumpida de comparación se denomina cadena de trazabilidad.

#### 4. GENERALIDADES

El multímetro digital es un instrumento con capacidad para medir tensión e intensidad tanto en corriente continua como en alterna; igualmente tiene capacidad de medida de resistencia y cuenta con representación numérica de los resultados. El sistema básico de medida de un multímetro digital lo constituye un convertidor analógico digital y las restantes capacidades de medida se obtienen mediante circuitos auxiliares que se adicionan a este circuito básico. La diferencia entre los distintos modelos radica principalmente en la exactitud conseguida, siendo ésta consecuencia del método de medida utilizado y del diseño. Otro factor importante a considerar es la resolución o número de dígitos de su pantalla de representación y que normalmente se utiliza para definir el multímetro (8 ½, 7 ½, 6 ½ dígitos, etc).

La siguiente figura se muestra el diagrama de bloques de un multímetro digital. En él puede observarse que el sistema básico de medida lo constituye el bloque que realiza la medida de tensión continua (convertidor analógico/digital) y que las restantes medidas se fundamentan en ésta.

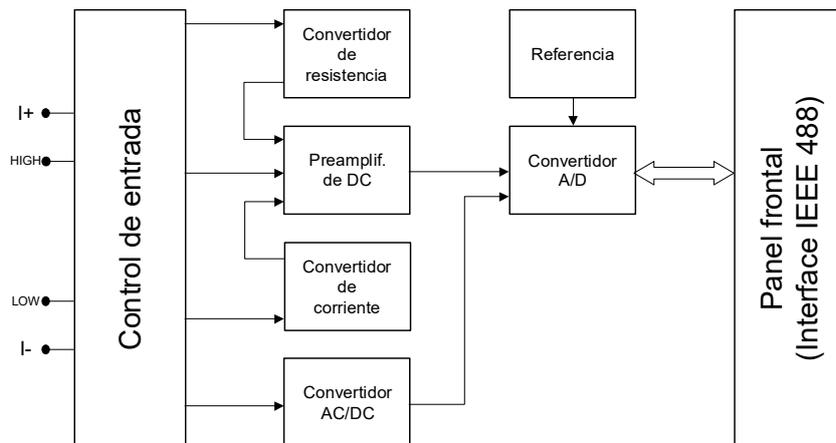


Figura 1. Diagrama de bloques de un multímetro digital.

El convertidor analógico/digital convierte la entrada analógica de tensión continua en una salida digital utilizando la información del tiempo en forma de cuentas de reloj, y es el responsable de muchas de las características del multímetro (velocidad de lectura, linealidad, resolución, rechazo al modo común, y exactitud). La forma más común de realizar el proceso de conversión en multímetros de alta resolución es mediante la utilización de métodos multirampa y los integradores multiciclo. La salida digital se puede enviar a una o varias puertas, incluyendo la pantalla principal o salidas IEEE 488 y RS232.

Las medidas de intensidad se realizan mediante unas resistencias o shunts por las que circula la intensidad a medir provocando una caída de tensión. Las medidas de tensión, tanto alterna como continua pasan a través de atenuadores para adaptar el nivel de tensión a la entrada del convertidor. Las medidas de tensión alterna se realizan mediante una conversión alterna/continua y medida posterior de la tensión continua con el convertidor analógico/digital. Para la medida de resistencia el instrumento dispone de una fuente de intensidad de continua (convertidor de ohmios) que se hace circular por la resistencia, midiendo la tensión resultante con los atenuadores y convertidor analógico/digital ya mencionados escala.

Muchos multímetros actuales (típico en los multímetros digitales de alta resolución considerados en este procedimiento) se pueden controlar por software con un ordenador a través de un bus RS232 o IEEE 488. Esta capacidad presenta una serie de ventajas importantes como la facilidad de manejo, y la posibilidad de aplicar técnicas estadísticas o de tratamiento posterior de las mediciones realizadas escala.

Por otra parte, los multímetros digitales suelen tener posibilidad de ajuste, bien a través de potenciómetros y condensadores variables (para multímetros no basados en tecnología de microprocesador), bien en otros casos a través del almacenamiento en memoria no volátil de nuevas constantes de calibración introducidas con el teclado o mediante bus de comunicación IEEE 488.

## 5. DESCRIPCIÓN

### 5.1 Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario disponer de un calibrador multifunción de alta exactitud adecuado para la calibración de multímetros con resolución hasta  $8 \frac{1}{2}$  dígitos siguiendo los criterios indicados anteriormente y un juego de resistencias patrón con valores que cubran el rango de medida de esta magnitud.

Además el laboratorio deberá contar con un termómetro con una incertidumbre mejor de  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  en el rango de temperatura indicado para la realización de esta calibración, así como un higrómetro con una incertidumbre máxima del 5%.

Para realizar la calibración de multímetros en intensidad continua o alterna por encima de 2A es necesario utilizar en ocasiones amplificadores de transconductancia que suministran una intensidad de salida proporcional a la tensión aplicada con el calibrador a su entrada. En otros casos los propios calibradores son capaces de generar intensidades de hasta 10 A o 20 A, sin tener que recurrir a amplificadores de transconductancia por encima de 2A.

### 5.2. Operaciones previas

Antes de iniciar la calibración se realizarán las siguientes operaciones previas:

a) Se comprobará que el multímetro digital está identificado de forma permanente con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno del propietario del multímetro unívoco. Si no fuera así se le asignará un código de identificación que se adherirá o fijará de forma segura sobre el multímetro.

b) Se estudiará el manual de operación del multímetro a calibrar, de forma que la persona que realice la calibración esté familiarizada con su manejo. Se dispondrá también de las instrucciones de ajuste del fabricante, por si en el transcurso de la calibración se determinara la necesidad de realizar ajustes al multímetro.

c) Se comprobará que el multímetro digital no tiene fundidos ninguno de los fusibles internos de protección, y que los calibres y curvas de fusión son los indicados por el fabricante. En ocasiones en el manual del multímetro se indica un procedimiento para comprobar el estado de los fusibles sin desmontar la tapa del mismo.

d) Se fijará cuál es la tolerancia de uso asignada al multímetro digital, pudiendo coincidir con las especificaciones del fabricante, o estar calculada en función del uso concreto al que se destina el multímetro digital. Los errores obtenidos en la calibración se compararán con esta tolerancia permitida de forma que siguiendo los criterios del apartado 5.3.1 se determinará la necesidad o no de realizar ajustes en el multímetro.

e) Se comprobará el estado de calibración de las resistencias patrón, así como del calibrador multifunción, si disponen de un certificado de calibración en vigor, y si dichos certificados garantizan la trazabilidad e incertidumbre apropiadas a las medidas que se van a realizar en el transcurso de la calibración.

f) Se comprobará que el valor de la tensión de red en el laboratorio y las posibles variaciones son adecuadas para el funcionamiento del multímetro a calibrar y del calibrador multifunción. Normalmente una tensión de  $230\text{ V} \pm 10\%$  es adecuada para el funcionamiento de la mayoría de la instrumentación eléctrica en Europa.

g) Se conectarán a la red de alimentación eléctrica el multímetro objeto de calibración y el calibrador multifunción 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, pero como regla general es un mínimo de 4 horas, salvo indicación contraria indicada en los manuales del equipo.

h) La calibración se realizará manteniendo preferiblemente una temperatura ambiente comprendida entre  $21\text{ °C}$  y  $25\text{ °C}$  y una humedad relativa por debajo del 60 %, que es un margen en el que el efecto de estas magnitudes de influencia se minimiza. Aunque la utilización de este tipo de instrumentos se centra en aplicaciones de laboratorio con condiciones ambientales bien definidas y controladas, es posible realizar la calibración a temperaturas distintas de las anteriormente indicadas, pero en este caso será necesario tener en cuenta este hecho en la asignación de incertidumbres de calibración.

i) Además, si las resistencias patrón lo permiten, éstas se mantendrán sumergidas en un baño de aceite a su temperatura de calibración para evitar tanto el calentamiento sobre el elemento resistivo por paso de intensidad, como minimizar el efecto de la temperatura por encontrarse sumergidas en un medio isoterma controlado.

j) Tanto el multímetro bajo prueba como el calibrador multifunción se situarán alejados de cualquier fuente de calor o de otros instrumentos que puedan inducir interferencias electromagnéticas.

k) Se comprobará que el multímetro a calibrar está conectado a una base de enchufe que incluya un conductor de protección o toma de tierra como medida elemental de protección frente a contactos indirectos.

l) Si es posible, los siguientes procesos deberían ejecutarse antes de comenzar la calibración: prueba funcional (*TEST*) y si el instrumento lo tiene implementado su autocalibración (*ACAL*, *SEFCAL*, etc) de forma que situemos al equipo en una condición de utilización definida.

**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 riesgo eléctrico, siguiendo de forma ordenada la

**secuencia de operaciones indicadas en el procedimiento. En cualquier caso, tomar como referencia las instrucciones facilitadas por el fabricante en el manual técnico, para evitar riesgos al personal que realiza la calibración.**

Como medidas elementales de seguridad se señalan las siguientes:

- Utilizar cables con el nivel de aislamiento adecuado para evitar la perforación de su aislamiento (usar cables que soporten como mínimo 2000 V a 50 Hz) y con terminales o bananas que una vez introducidas en los bornes correspondientes del calibrador o multímetro a calibrar no presenten partes activas accesibles. Dado que para las medidas es alterna es recomendable el uso de cables apantallados, para minimizar interferencias electromagnéticas, las consideraciones de aislamiento serán de aplicación también para estos.
- No se realizará ninguna conexión a los bornes de salida del calibrador multifunción si hay tensión presente en éstos. Por lo tanto antes de realizar cualquier conexión eléctrica a los bornes, presionar la tecla de borrado del generador (*RESET* o similar), y comprobar que la señalización que indica que no hay señal en bornes del calibrador está activa (señalización *STANDBY*, *OUTPUT OFF* o similar).

### 5.3. Proceso de calibración

#### 5.3.1- Secuencias posibles de calibración

El proceso de calibración seguirá una de las tres secuencias descritas a continuación:

- 1) Calibración inicial → Ajuste → Calibración final
- 2) Calibración sin ajuste
- 3) Ajuste → Calibración final

La secuencia 1) es la secuencia normal: primero se realiza una calibración inicial, y si como consecuencia de esta primera calibración el equipo requiere ajuste, se realiza dicho ajuste seguido de una calibración final. De esta forma la primera calibración nos proporciona información del estado del instrumento durante el período de tiempo transcurrido desde la última calibración. La calibración final comprueba que los ajustes realizados son correctos y nos asegura la trazabilidad. En este caso se conservarán registros tanto de la calibración inicial como final.

La secuencia 2) se puede considerar como una variante de la secuencia 1) aplicable cuando los errores encontrados en la calibración sean inferiores a unos límites establecidos.

La secuencia 3) solamente se debe aplicar cuando el estado del multímetro antes de la calibración no sea importante, por ejemplo, porque se acaba de reparar, porque es nuevo, porque estaba previamente fuera de uso, etc.

Se deberán establecer en función del uso previsto para el multímetro unos límites de tolerancia a partir de los cuales se realizará el ajuste del instrumento o se limitará el uso del multímetro. Se procederá al ajuste cuando la desviación obtenida sea mayor que el límite de tolerancia establecido disminuido en la incertidumbre de calibración. Algunas guías establecen como criterio de ajuste, para una relación entre tolerancia e incertidumbre comprendida entre 3 y 10, unos límites entre el 50% y el 70% de la tolerancia de uso.

El ajuste se debe realizar siempre siguiendo el manual del fabricante del multímetro, en el orden y en los puntos indicados.

### 5.3.2.- Definición de los puntos de medida.

Al no ser posible la calibración para todos los valores posibles de medida del multímetro digital, hay que limitar ésta en un número que garantice de forma razonable la trazabilidad del instrumento en todas sus magnitudes y rangos de utilización. Si el equipo se destina a una única aplicación determinada que requiera realizar medidas en una serie de puntos determinados, la calibración más apropiada será en dichos puntos, quedando el instrumento limitado a dicha aplicación.

La definición del conjunto de puntos de medida para la calibración de un multímetro digital genérico debería ser suficientemente flexible como para ser de aplicación a diferentes modelos. Muchas veces, la selección de los puntos de calibración puede obtenerse de las propias instrucciones del fabricante, aunque los puntos contenidos no deben ser necesariamente considerados como exhaustivos.

Los puntos a considerar en la calibración de multímetros cuya resolución sea mejor de 5 ½ dígitos, se recogen en la siguiente tabla:

RANGOS	Nº DE PUNTOS	VALORES DE PRUEBA (% FONDO DE ESCALA)
<b>TENSIÓN CONTINUA</b>		
TODOS	4	10 %, 50 %, 90 %, -90 %
UN RANGO INTERMEDIO	7	10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 %, -10 %, -90 %
RANGO MAYOR DE 200 V	4	10 %, 50 %, 90 %, -90 %
<b>INTENSIDAD CONTINUA</b>		
TODOS	3	10 %, 90 %, -90 %
RANGO MAYOR O IGUAL DE 1 A	3	10 %, 50 %, 90 %
<b>RESISTENCIA</b>		
TODOS	2	10 %, 90 %
<b>TENSIÓN ALTERNA</b>		
TODOS	8	10 % a 50 Hz, 1 kHz, 20 kHz 90 % a 50 Hz, 1 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz
RANGOS MENORES DE 0,5 V	6	10 %, 90 % a 50 Hz, 1 kHz, 20 kHz
UN RANGO INTERMEDIO	13	10 % a 50 Hz, 1kHz, 20 kHz 30 %, 50 %, 70 % a 1 kHz 90 % a 50 Hz, 1 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 1 MHz
RANGO MAYOR DE 200 V	8	10 % a 50 Hz, 1kHz, 20 kHz 50 % a 1kHz, 50 kHz 90 % a 50 Hz, 1kHz, 30 kHz
<b>INTENSIDAD ALTERNA</b>		
TODOS	4	10% a 1 kHz 90 % a 50 Hz, 1 kHz, 5 kHz

Las siguientes observaciones sirven para interpretar las dos tablas:

- Los puntos de calibración están indicados en tanto por ciento del fondo de escala. Los valores propuestos para cada rango deben ser entendidos como el límite inferior de puntos posibles de calibración.
- El valor del 10% indica un punto arbitrario situado al principio de la escala, el valor real puede variar desde el 0% hasta el 10% en continua, y desde el 0,5% al 10% en alterna.
- El valor del 90% indica un punto arbitrario situado próximo del fondo de escala, el valor real puede variar del 50% al 99 % del fondo de escala. En el caso de resistencias, el valor mínimo se puede reducir hasta el 30%. No obstante, cuando se trata de un rango en el que se está comprobando la linealidad (midiendo cinco puntos en el mismo rango), el valor del 90% se debe entender en sentido estricto.
- El valor de frecuencia de 50 Hz está pensado para comprobar el funcionamiento del multímetro a frecuencia industrial, aunque el valor de la frecuencia de prueba puede variar entre 40 y 60 Hz. Es recomendable evitar una frecuencia de prueba de 50 Hz para eliminar un posible acoplamiento con la frecuencia de la red de alimentación.
- El valor de frecuencia de 1 kHz está pensado como una frecuencia de prueba central, el valor de prueba real puede variar entre 200 Hz y 1 kHz en función del modelo de multímetro a calibrar.
- Para medidas de tensión alterna debe cuidarse no alcanzar los valores límites de tensión de pico máxima admisible por el instrumento.
- En cada punto de calibración considerado se realizarán diez medidas independientes. Esta práctica es de fácil ejecución si se dispone de un software que permita automatizar el proceso de recogida de datos; de no ser así, puede optarse por tomar medidas repetidas únicamente en un punto en cada magnitud y extrapolar los valores de repetibilidad al resto.

### 5.3.3.- Conexiones y realización de las medidas.

Los multímetros digitales de alta resolución están diseñados para conseguir altos niveles de exactitud en la medida, aunque para que esto sea posible es necesario tener gran cuidado en la interconexión entre estos y el calibrador multifunción y las resistencias patrón.

Las señales eléctricas no deseadas que degradan la medida son de dos tipos: modo común donde la señal no deseada está igualmente presente en ambas entradas (*HIGH* y *LOW*), y modo normal o serie donde la señal no deseada aparece a través de las entradas de medida, es decir, en serie con la señal deseada. Los diseñadores de instrumentación toman acciones para reducir el efecto de ambos, el normal y el común, mediante el uso de integración, filtrado, aislamiento de las entradas, y apantallamiento. Además, el uso apropiado de cables de medida puede contribuir significativamente a la reducción de señales indeseadas con las que los instrumentos tienen que convivir.

Entre las fuentes de error más reseñables y significativas se pueden enumerar las siguientes:

- Fuerzas electromotrices parásitas: es una fuente de errores común en medidas de bajos valores en continua. Aparecen cuando dos conductores de distintos materiales se conectan juntos o cuando dos partes diferentes del circuito de medida están a distintas temperaturas. Para minimizar su efecto es necesario reducir el número de conexiones, utilizar el mismo tipo de metal para todos los cables y conectores, minimizar las variaciones de temperatura a lo largo del cableado de medida, y tratar de mantener a la misma temperatura tanto el multímetro como el

calibrador multifunción como el cableado, evitando en la medida de lo posible ambientes con alta temperatura.

- Interferencias electromagnéticas: este tipo de interferencia es generalmente originada por campos magnéticos o altos niveles de energía de radio frecuencia. Los campos magnéticos rodean cualquier tipo de equipo y proceden de la propia línea de suministro eléctrico como de elementos externos como puede ser la presencia de motores eléctricos cercanos. La energía de radio frecuencia puede proceder de estaciones de radio o televisión cercanas, así como de equipos de comunicaciones. Para reducir su influencia es necesaria la utilización de cables apantallados, alejarse de toda fuente de perturbación e incluso realizar las medidas dentro de una cámara apantallada.
- Lazos de tierra: su presencia se debe a que el multímetro y el calibrador multifunción están puestos a tierra en puntos diferentes físicamente. Esto facilita que la corriente fluya a lo largo del lazo entre los distintos puntos de tierra, generando una tensión no deseada en serie con el circuito de medida. Para eliminar este efecto es necesario poner a tierra todos los equipos en el mismo punto.
- Fugas por bajo aislamiento de los cables: en este caso aparecerán corrientes de fuga que causarán errores significativos en circuitos de medida de alta tensión o altos valores de resistencia. Para evitarlo es necesario utilizar cables con un nivel de aislamiento adecuado como por ejemplo el del teflón.
- Impedancia de los cables: la impedancia de los cables de conexión puede causar caídas de tensión significativas entre la fuente y el equipo de medida, particularmente si los cables son largos y la corriente que manejan es grande. Igualmente la capacidad y la inductancia que estos presentan pueden originar problemas de carga a altas frecuencias. Para minimizar los efectos se deben utilizar cables tan cortos como sea posible, con conductores con margen suficiente para la corriente que van a transportar y se utilizará conexión a cuatro terminales siempre que sea posible.

Dependiendo de la magnitud considerada la conexión del apantallamiento de los cables y las guardas de los instrumentos debe hacerse de forma adecuada para garantizar su efectividad. No hay una forma única de conexión, ya que existen distintas configuraciones de medida, por lo que en cada caso debe analizarse y nunca realizarla de forma aleatoria. Los fabricantes de los multímetros suelen dar unas pautas de conexión en los manuales, no obstante de forma genérica deben cumplirse las siguientes reglas:

- Las pantallas de los cables deben estar conectadas en un único punto de tierra al mismo potencial.
- La guarda debe conectarse siempre, ya que puede producirse una diferencia de potencial excesiva entre el terminal del guarda y el terminal de entrada *LOW* que podría dañar el instrumento.
- La guarda debe conectarse de forma que esté al mismo potencial o muy próximo al potencial *LOW* del calibrador o del multímetro.
- La guarda debe conectarse al potencial *LOW* en un solo punto, normalmente en el punto en el que el terminal *LOW* se conecta al potencial de tierra (*GROUND*).
- Cuando el calibrador multifunción y el multímetro disponen ambos de terminal de guarda, las dos guardas han de conectarse entre sí, para ello puede utilizarse el apantallamiento de los cables, el terminal *LOW* del calibrador se conecta al terminal de guarda, y la guarda ha de conectarse al terminal de tierra (*GROUND*) en el calibrador multifunción o en el multímetro, siendo siempre preferible hacerlo en la fuente, pero nunca en los dos.

A continuación se describe la operativa para cada una de las magnitudes consideradas. Hay que tener en cuenta que para cada una de las magnitudes el multímetro se configurará de forma que trabaje en su modo mejor de funcionamiento, es decir, mejor resolución, impedancia de entrada más adecuada, ciclos de integración, etc, tal y como se

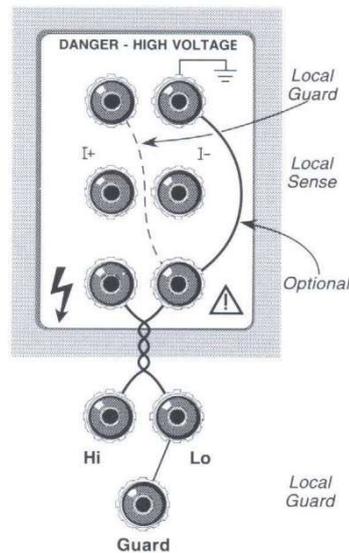
describe en su manual de usuario y bajo las condiciones en las que se declara su mejor exactitud:

### 5.3.3.1- Tensión continua

En primer lugar, antes de iniciar la calibración en tensión continua se debe realizar un ajuste de cero en el multímetro ya que en algunos es necesario para obtener sus mejores especificaciones de medida, (los multímetros suelen disponer de funciones automáticas de ajuste de cero, "ZERO", "MATHNULL", etc.). En cualquier caso, hay que seguir siempre el manual de instrucciones donde se describe la forma de realizar estos ajustes, aplicando un cortocircuito de cobre limpio entre los terminales de medida de tensión del multímetro.

Para realizar la calibración, se conectará la salida de tensión del calibrador (*HIGH*, *LOW*), a los bornes de medida de tensión del multímetro tal y como se representa en la siguiente figura. Para evitar errores inducidos por fuerzas electromotrices de origen térmico, especialmente importantes en las medidas de pequeñas tensiones en continua, es necesario usar conductores y conectores de cobre u otros materiales que generen bajas fuerzas termo electromotrices en su unión con el material de los contactos del calibrador y del multímetro. No usar, por ejemplo, conectores niquelados.

CALIBRADOR MULTIFUNCIÓN



MULTÍMETRO DIGITAL

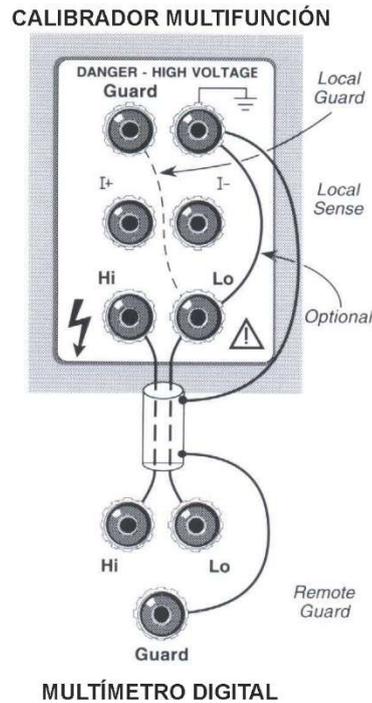
Para calibración de multímetros digitales en tensión no es necesario utilizar conexiones a cuatro hilos que eviten caídas de tensión, ya que su impedancia de entrada es normalmente mayor de 100 M $\Omega$ , y por tanto las caídas de tensión en los cables de conexión son insignificantes para los niveles de incertidumbre asociados a este tipo de equipos.

Cuando se realicen las medidas de los valores de tensión continua mayores de 100 V es necesario mantener aplicada la tensión al multímetro bajo prueba un tiempo, hasta observar que la medida se estabiliza, debido al autocalentamiento de las etapas de entrada de éste.

### 5.3.3.2- Tensión alterna

En este caso no suele ser necesario realizar el ajuste del cero indicado en el punto anterior para tensión continua.

Para realizar el montaje, se conectará de nuevo la salida de tensión del calibrador (*HIGH, LOW*), a los bornes de medida de tensión del multímetro tal y como se representa en la figura. Los cables serán apantallados o coaxiales procurando que su longitud no exceda de 1 m.



Dado que los multímetros digitales presentan una impedancia de entrada relativamente baja cuando se configuran en medida de tensión alterna, por compromiso con el ruido térmico, es necesario en ocasiones para valores altos de tensión y frecuencia recurrir a medidas a cuatro terminales.

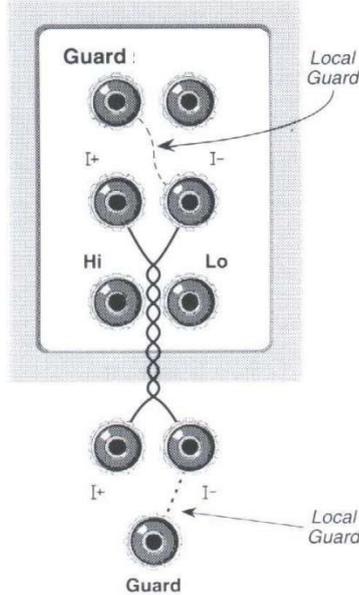
De igual forma que en el caso de tensión continua hay que ampliar el tiempo de medida en valores altos de tensión por efecto del autocalentamiento.

### 5.3.3.3- Intensidad continua

Para realizar la calibración se conectará la salida de corriente del calibrador (*I+*, *I-*) a los bornes de medida de intensidad del multímetro tal y como se ve en la figura. Para evitar errores inducidos por fuerzas electromotrices de origen térmico, especialmente importantes en las medidas de pequeños valores de intensidad, es necesario usar conductores y conectores de cobre u otros materiales que generen bajas fuerzas termo electromotrices en su unión con el material de los contactos del calibrador y del multímetro.

De igual forma que en el caso de tensión continua hay que ampliar el tiempo de medida en valores de intensidad por encima de 1 A por efecto del autocalentamiento.

**MULTÍMETRO DIGITAL**

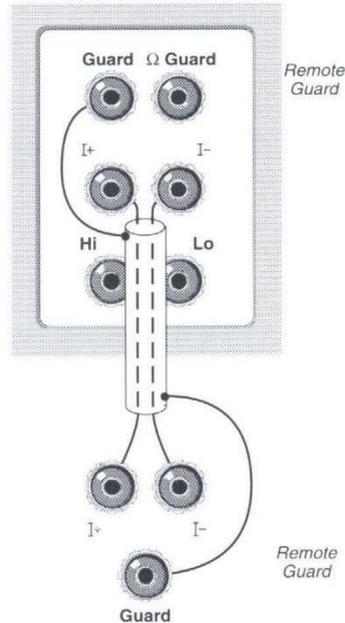


**CALIBRADOR MULTIFUNCIÓN**

5.3.3.4- Intensidad alterna

Se conectará la salida de corriente del calibrador ( $I+$ ,  $I-$ ) a los bornes de medida de intensidad del multímetro tal y como se indica en la figura. Los cables utilizados en el montaje deberán ser apantallados o coaxiales procurando que su longitud no exceda de 1 m.

**MULTÍMETRO DIGITAL**



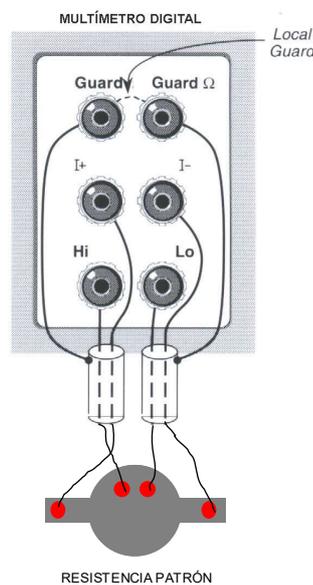
**CALIBRADOR MULTIFUNCIÓN**

De igual forma que par intensidad continua hay que ampliar el tiempo de medida en valores de intensidad por encima de 1 A por autocalentamiento.

### 5.3.3.5- Resistencia

En este caso tal y como se hizo para tensión continua suele ser necesario realizar el ajuste del cero.

Conectar las resistencias patrón al multímetro utilizando la conexión a cuatro terminales, aún cuando la resistencia patrón sólo presentara dos. Los cables serán de cobre para evitar el efecto de las fuerzas electromotrices parásitas. Si las resistencias patrón lo permiten estas se introducirán en baño de aceite de forma que estén en un recinto isoterma a temperatura controlada; si no es posible durante todo el proceso de calibración se monitorizará la temperatura en las resistencias para efectuar las oportunas correcciones por efecto de ésta. En la siguiente figura se representa el diagrama de conexionado.



En vez de utilizar resistencias patrón puede utilizarse la resistencia sintetizada por el calibrador multifunción. En este caso la conexión entre ambos sería equivalente a la de conexión a la resistencia patrón.

La diferencia entre utilizar un método u otro radica en que con las resistencias patrón los valores de incertidumbre de uso son, en general, inferiores a los de las resistencias sintetizadas, por lo que la relación entre los límites de error fijados y la incertidumbre del sistema generador de resistencia será mayor.

### 5.4. Toma y tratamiento de datos

En el registro de calibración deberán aparecer los datos generales sobre la persona que realiza la calibración, la fecha de dicha calibración las condiciones ambientales durante el proceso (temperatura y humedad) y los equipos utilizados.

Además, para cada punto de calibración considerado se anotarán los siguientes datos:

- Valor certificado de la magnitud materializada por el calibrador multifunción o por las resistencias patrón utilizadas.
- Datos de la configuración en la que se ha calibrado el multímetro.
- Lecturas obtenidas en el multímetro objeto de calibración, teniendo en cuenta que se han tomado diez medidas independientes en cada punto de calibración considerado, hallando su media y su desviación típica tal y como se indicó en el apartado 3.

- Error asociado a la calibración en cada punto, definido como la diferencia entre la lectura del multímetro y el valor certificado de la magnitud aplicada (generada por el calibrador multifunción o de las resistencias patrón).

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 al multímetro objeto de calibración, se repetirá la calibración en esos puntos para confirmar la bondad de los resultados obtenidos.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la guía EA-4/02 [3] y de la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” [2]. En primer lugar se determinará la función modelo de la magnitud de salida (que es el error del multímetro digital bajo prueba en cada punto de calibración,  $e_X$ ). Hay dos casos diferentes, uno si se utiliza el calibrador multifunción para generar la magnitud, y otro cuando se utilizan las resistencias patrón. Para el primero se tiene:

$$e_X = (X_M + \delta_{EM} + \delta_{TM}) - (X_C + \delta_{CC} + \delta_{DC} + \delta_{LC} + \delta_{FC} + \delta_{TC} + \delta_{FEM})$$

donde:

$X_M$ : indicación del multímetro digital cuando el calibrador multifunción genera un valor de la magnitud considerada.

$\delta_{EM}$ : corrección debida a la resolución finita del multímetro digital.

$\delta_{TM}$ : corrección en el multímetro debido al efecto de la temperatura durante el proceso de calibración

$X_C$ : valor de la magnitud a generar fijado en el calibrador multifunción.

$\delta_{CC}$ : corrección de calibración obtenido del certificado de calibración para el punto considerado.

$\delta_{DC}$ : corrección debida a la deriva del valor generado por el calibrador multifunción desde la última calibración.

$\delta_{LC}$ : corrección debida a la falta de linealidad en el rango de trabajo en el que está el punto generado.

$\delta_{FC}$ : corrección debida a la falta de planitud en la respuesta en frecuencia de la tensión alterna generada. Sólo se considerará para el caso de tensión alterna.

$\delta_{TC}$ : corrección debido al efecto de la temperatura en el calibrador multifunción.

$\delta_{FEM}$ : corrección debida a fuerzas electromotrices no compensadas.

En el segundo caso utilizando las resistencias patrón la función modelo sería:

$$e_X = (R_M + \delta_{EM} + \delta_{TM}) - (R_S + \delta_{DR} + \delta_{TR} + \delta_{CR})$$

siendo en este caso:

$R_M$ : indicación del multímetro digital cuando está conectada la resistencia patrón.

$\delta_{EM}$ : corrección debida a la resolución finita del multímetro digital.

$\delta_{TM}$ : corrección en el multímetro debido al efecto de la temperatura durante el proceso de calibración.

$R_s$ : valor certificado de la resistencia patrón.

$\delta_{DR}$ : corrección debida a la deriva de la resistencia patrón desde su última calibración.

$\delta_{TR}$ : corrección debido al efecto de la temperatura en la resistencia patrón.

$\delta_{CR}$ : corrección debida a la utilización de la resistencia patrón a un régimen de potencia distinto al de calibración.

#### 6.1.1.- Asignación de las componentes de la incertidumbre.

En el caso de utilización del calibrador multifunción se considerarán las siguientes componentes:

- a) Incertidumbre debido a la falta de repetibilidad del multímetro digital,  $u(X_M)$ : se tomarán diez lecturas en las mismas condiciones de medida, siempre que existan variaciones en la indicación del equipo. En caso contrario esta contribución no se considerará, por tener un valor nulo. Se calcularán los estimadores estadísticos que caracterizan la muestra. En particular se calcularán la media aritmética de los valores de  $X_{Mi}$ :

$$X_M = \frac{\sum_{i=1}^n X_{Mi}}{n}$$

y la desviación estándar experimental,  $s_{X_M}$  :

$$s_{X_M} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{Mi} - X_M)^2}{n-1}}$$

La componente de incertidumbre tipo A vendrá dada por el estimador de la desviación estándar experimental de la media:

$$u(X_M) = \frac{s_{X_M}}{\sqrt{n}}$$

Siendo en este caso  $n = 10$

- b) Incertidumbre asociada a la resolución del multímetro objeto de calibración,  $u(\delta_{EM})$ : una de las fuentes de incertidumbre de un dispositivo digital es la resolución del indicador. Si la resolución del dispositivo indicador es  $E$  el valor de señal de entrada que produce una indicación dada  $X_M$  puede situarse con igual probabilidad dentro del intervalo que va de  $X_M - E/2$  y  $X_M + E/2$ . La señal de entrada puede describirse entonces por medio de una distribución rectangular de rango  $E$ , lo que supone una incertidumbre típica.

$$u(\delta_{EM}) = \frac{E}{2\sqrt{3}}$$

- c) Componente de incertidumbre debida a la variación de temperatura durante el proceso de calibración en el multímetro. La temperatura del laboratorio se monitoriza durante todo el proceso de calibración para garantizar que se encuentra dentro de los límites

declarados,  $T \pm \Delta T$ . De las especificaciones del fabricante conocemos el coeficiente de temperatura del multímetro para la magnitud considerada,  $\alpha_M$ , por lo que suponiendo una distribución uniforme la componente de incertidumbre asociada sería:

$$u(\delta_{TM}) = \frac{\alpha_M \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$$

- d) Muchos laboratorios deciden no aplicar corrección alguna a los valores de salida del calibrador, lo cual es admisible siempre que las desviaciones obtenidas en el certificado de calibración sean, en general, menores que las especificaciones del fabricante. Esta sistemática se debe completar con un criterio de ajuste, de forma que cuando la máxima desviación obtenida en la calibración sea superior a un porcentaje de las especificaciones (50 %, 70 %), se realizará el ajuste del calibrador seguido de una nueva calibración. Sin embargo la componente de incertidumbre asociada a esta corrección proviene del certificado de calibración del calibrador para la generación de la magnitud considerada y en las condiciones en él incluidas: como el valor certificado de la incertidumbre viene recubierto por un factor  $k_n$  (en la mayoría de los casos  $k_n = 2$ , o lo que es lo mismo, una probabilidad de encontrar el verdadero valor de la magnitud en el intervalo señalado por la incertidumbre ampliada del 95,45 %) la componente de incertidumbre estándar quedará:

$$u(\delta_{CC}) = \frac{U_{CC}}{k_n}$$

donde  $U_{CC}$  es la incertidumbre expandida certificada.

En el caso de que no se hubiesen realizado sobre el calibrador correcciones conocidas no nulas, como la corrección derivada del certificado de calibración, ésta deberá incorporarse a la incertidumbre de acuerdo con lo indicado en el apartado F.2.4.5 de la referencia [5].

- e) La corrección debida a la deriva que sufre el calibrador en la generación de la magnitud considerada,  $u(\delta_{DC})$ . Para ello se utilizará bien lo especificado por el fabricante para un periodo de un día, tres meses o un año según proceda o los datos de estabilidad inferidos de sucesivas calibraciones. Si se establecen unos límites máximos de deriva  $\pm D$ , y se supone una distribución de valores uniforme dentro de este intervalo la componente de incertidumbre asociada será:

$$u(\delta_{DC}) = \frac{D}{\sqrt{3}}$$

- f) Componente de incertidumbre debida a la falta de linealidad del calibrador, ya que los valores generados en general no coinciden con aquellos para los que se calibró, sino que se distribuyen aleatoriamente en las escalas calibradas. A priori se puede considerar despreciable, pero si fuera necesario realizar alguna corrección por falta de linealidad, de las especificaciones del fabricante, conocemos su límite de variación máximo para la generación de las magnitudes consideradas,  $\pm L$ , que puede inferirse también de la tabla de comprobación de la linealidad en las hojas de resultados de calibración del calibrador, por lo que suponiendo una distribución uniforme la componente de incertidumbre asociada sería:

$$u(\delta_{LC}) = \frac{L}{\sqrt{3}}$$

- g) Componente de incertidumbre debida a la falta de planitud en la respuesta en frecuencia del calibrador, ya que los valores generados en general no coinciden con aquellos para los que se calibró, sino que se distribuyen aleatoriamente en los rangos de frecuencia considerados. A priori se puede considerar despreciable, pero si fuera necesario realizar alguna corrección por falta de planitud, de las especificaciones del fabricante, conocemos su límite de variación máximo para la generación de tensión alterna,  $\pm F$ , que puede inferirse también de la tabla de comprobación de la planitud en las hojas de resultados de calibración del calibrador, por lo que suponiendo una distribución rectangular la componente de incertidumbre asociada sería:

$$u(\delta_{FC}) = \frac{F}{\sqrt{3}}$$

- h) Al trabajar en las condiciones del laboratorio indicadas anteriormente, la corrección debida a la temperatura,  $\delta_{TC}$ , suele ser despreciable. Si se realizara la corrección por efecto de la temperatura, a partir del coeficiente de temperatura proporcionado en las especificaciones del calibrador multifunción,  $\alpha_C$ , se valoraría la componente de incertidumbre asociada suponiendo una distribución rectangular sobre el intervalo de variación de la temperatura y se tendría:

$$u(\delta_{TC}) = \frac{\alpha_C \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$$

- i) Incertidumbre debida a la corrección por fuerzas termoeléctricas,  $\delta_{FEM}$ . Estas tensiones aparecen cuando existen gradientes de temperatura en las distintas partes del circuito. Es de naturaleza aleatoria por lo que resulta difícil aplicar una corrección a las mismas. Si se estima un valor máximo,  $V_{FEM}$ , que dependerá de los conectores utilizados y de los gradientes de temperatura, considerando una distribución de valores uniforme hasta el máximo fijado, la incertidumbre asociada sería:

$$u(\delta_{FEM}) = \frac{V_{FEM}}{\sqrt{3}}$$

Cuando se hacen medidas sobre resistencia patrón las diferentes componentes que aparecen son:

- a) Incertidumbre de calibración de la resistencia patrón,  $u(R_s)$ , en las condiciones incluidas en su certificado de calibración: como el valor certificado de la incertidumbre viene recubierto por un factor  $k_n$  (en la mayoría de los casos  $k_n=2$ , o lo que es lo mismo, una probabilidad de encontrar el verdadero valor de la magnitud en el intervalo señalado por la incertidumbre ampliada del 95,45 %) la componente de incertidumbre estándar quedará:

$$u(R_s) = \frac{U_s}{k_n}$$

donde  $U_s$  es la incertidumbre expandida certificada.

- b) La debida a la deriva que sufre la resistencia desde su calibración hasta el momento de uso  $u(\delta_{DR})$ . Para ello se utilizará lo especificado por el fabricante o se inferirá de los resultados de las anteriores calibraciones. Si la deriva estimada se supone distribuida uniformemente en el intervalo  $\pm D_R$ , la incertidumbre asociada sería:

$$u(\delta_{DR}) = \frac{D_R}{\sqrt{3}}$$

- c) Si se realizara la corrección por efecto de la temperatura a partir del coeficiente de temperatura proporcionado en las especificaciones de la resistencia  $\alpha_R$ , se valoraría la componente de incertidumbre asociada suponiendo una distribución rectangular sobre el intervalo de variación de la temperatura (en el baño de aceite si la resistencia lo permite) centrado en la temperatura para la que se efectúa la corrección y se tendría:

$$u(\delta_{TR}) = \frac{\alpha_R \cdot \Delta T_R}{\sqrt{3}}$$

- d) Si se utiliza la resistencia a un régimen de potencia distinto al de calibración a partir del coeficiente de potencia  $C_W$  declarado por el fabricante de la resistencia se puede corregir el valor, aunque dado que su efecto suele ser pequeño, ya que los multímetros suelen medir con niveles de potencia despreciables semejantes a los de calibración, se prefiere considerar la corrección nula e incluir en la incertidumbre asociada todo este efecto, considerando que se distribuye de forma uniforme sobre el intervalo delimitado por la diferencia de potencias:

$$u(\delta_{CR}) = \frac{C_W \cdot \Delta P}{\sqrt{3}}$$

donde  $\Delta P$  es la diferencia entre la potencia de utilización de la resistencia y la potencia a la que fue calibrada.

### 6.1.2.- Balance de las componentes de la incertidumbre.

Para el caso de utilizar como elemento generador el calibrador multifunción:

Magnitud, $X_i$	Estimador, $x_i$	Incertidumbre típica, $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre, $u_i(y)$
$X_M$	$X_M = \frac{\sum_{i=1}^n X_{Mi}}{n}$	$u(X_M) = \frac{S_{X_M}}{\sqrt{n}}$	Normal	$c_1 = 1$	$u_1(y) = \frac{S_{X_M}}{\sqrt{n}}$
$\delta_{EM}$	0	$u(\delta_{EM}) = \frac{E}{2\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_2 = 1$	$u_2(y) = \frac{E}{2\sqrt{3}}$
$\delta_{TM}$	$\delta_{TM}$	$u(\delta_{TM}) = \frac{\alpha_M \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_3 = 1$	$u_3(y) = \frac{\alpha_M \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$
$X_C$	$X_C$	$u(X_C) = 0$		$c_4 = -1$	$u_4(y) = 0$
$\delta_{CC}$	$\delta_{CC}$	$u(\delta_{CC}) = \frac{U_{CC}}{k_n}$	Normal	$c_5 = -1$	$u_5(y) = \frac{-U_{CC}}{k_n}$
$\delta_{DC}$	$\delta_{DC}$	$u(\delta_{DC}) = \frac{D}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_6 = -1$	$u_6(y) = \frac{-D}{\sqrt{3}}$
$\delta_{LC}$	$\delta_{LC}$	$u(\delta_{LC}) = \frac{L}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_7 = -1$	$u_7(y) = \frac{-L}{\sqrt{3}}$
$\delta_{FC}$	$\delta_{FC}$	$u(\delta_{FC}) = \frac{F}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_8 = -1$	$u_8(y) = \frac{-F}{\sqrt{3}}$
$\delta_{TC}$	$\delta_{TC}$	$u(\delta_{TC}) = \frac{\alpha_C \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_9 = -1$	$u_9(y) = \frac{-\alpha_C \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$
$\delta_{FEM}$	$\delta_{FEM}$	$u(\delta_{FEM}) = \frac{V_{FEM}}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_{10} = -1$	$u_{10}(y) = \frac{-V_{FEM}}{\sqrt{3}}$
$e_X$	$e_X$				$u(e_X)$

Si se utilizan resistencias patrón:

Magnitud, $X_i$	Estimador, $x_i$	Incertidumbre típica, $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre, $u_i(y)$
$R_M$	$R_M = \frac{\sum_{i=1}^n R_{Mi}}{n}$	$u(R_M) = \frac{S_{R_M}}{\sqrt{n}}$	Normal	$c_1 = 1$	$u_1(y) = \frac{S_{R_M}}{\sqrt{n}}$
$\delta_{EM}$	0	$u(\delta_{EM}) = \frac{E}{2\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_2 = 1$	$u_2(y) = \frac{E}{2\sqrt{3}}$
$\delta_{TM}$	$\delta_{TM}$	$u(\delta_{TM}) = \frac{\alpha_M \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_3 = 1$	$u_3(y) = \frac{\alpha_M \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$
$R_S$	$R_S$	$u(R_S) = \frac{U_S}{k_n}$	Normal	$c_4 = -1$	$u_4(y) = \frac{-U_S}{k_n}$
$\delta_{DR}$	$\delta_{DR}$	$u(\delta_{DR}) = \frac{D_R}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_5 = -1$	$u_5(y) = \frac{-D_R}{\sqrt{3}}$
$\delta_{TR}$	$\delta_{TR}$	$u(\delta_{TR}) = \frac{\alpha_R \cdot \Delta T_R}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_6 = -1$	$u_6(y) = \frac{-\alpha_R \cdot \Delta T_R}{\sqrt{3}}$
$\delta_{CR}$	$\delta_{CR}$	$u(\delta_{CR}) = \frac{C_W \cdot \Delta P}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_7 = -1$	$u_7(y) = \frac{-C_W \cdot \Delta P}{\sqrt{3}}$
$e_X$	$e_X$				$u(e_X)$

Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de  $e_x$  respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado. Siempre que se utilice el procedimiento de calibración descrito estos coeficientes tomarán los valores indicados en el cuadro y no intervienen en la estimación de incertidumbres, al tomar valores de +1, y -1, considerando todas las contribuciones independientes.

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$$

### 6.1.3.- Cálculo de la incertidumbre expandida.

Considerando que todas las variables de entrada son independientes y por tanto no es necesario tener en cuenta los coeficientes de correlación, y aplicando la expresión de la ley de propagación de varianzas de la referencia [3], teniendo en cuenta que se han realizado las correcciones debidas a efectos sistemáticos conocidos, la incertidumbre expandida tiene la siguiente expresión:

$$U = k \cdot u(e_x) = k \sqrt{\sum u_i^2(y)}$$

Cuando se puede atribuir una distribución gaussiana al mensurando y la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida tiene suficiente fiabilidad, debe utilizarse el factor de cobertura  $k=2$ . La incertidumbre expandida asociada corresponde a una probabilidad de cobertura de, aproximadamente, un 95 %. La hipótesis de normalidad no siempre puede confirmarse experimentalmente con facilidad. Sin embargo, cuando varios componentes de la incertidumbre derivados de distribuciones de probabilidad bien definidas de magnitudes independientes, realizan contribuciones comparables a la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida, se cumplen las condiciones del teorema Central del Límite y puede suponerse, con un elevado grado de aproximación, que la distribución de la estimación de salida es normal.

Según se ha indicado, en el caso del calibrador multifunción, si no se realizan correcciones en función de su certificado de calibración, según F.2.4.5 de la referencia [2] se deben considerar aquí sumándolas linealmente. Asimismo se debería indicar que si se hace redondeo en el resultado final éste se deberá incrementar linealmente a la incertidumbre.

La fiabilidad de la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida se determina por sus grados efectivos de libertad (Anexo E de la referencia [3]).

Si no se cumple la condición de normalidad o no hay una fiabilidad suficiente, el factor de cobertura usual,  $k=2$ , puede producir una incertidumbre expandida correspondiente a una probabilidad de cobertura inferior al 95 %. En estos casos, para garantizar que el valor de la incertidumbre expandida se corresponde con la misma probabilidad de cobertura que en el caso normal, tienen que utilizarse otros procedimientos (Anexo G de la referencia [2]).

## 6.2. Interpretación de resultados

Se deberán establecer en función del uso previsto para el multímetro digital, unos límites de tolerancia para la calibración a partir de los cuales se realizará el ajuste del instrumento o se limitará su uso. Si se procediera al ajuste es necesario conservar los datos de calibración del equipo antes y después de esta operación.

Una vez terminada la calibración, incluyendo en su caso los ajustes necesarios, se determinarán los errores asociados a la calibración final en cada uno de los puntos; se determinará si dichos errores son inferiores al límite de tolerancia disminuido en la incertidumbre de calibración, y si

es así el multímetro se destinará de nuevo a su uso planificado. En caso contrario se reparará o se estudiará la posibilidad de su empleo en una nueva aplicación que admita una tolerancia de uso mayor.

Un período de tiempo razonable para la recalibración de estos instrumentos puede oscilar entre 3 y 12 meses, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente de las características técnicas comprobadas del multímetro (por ejemplo, su estabilidad), del uso que se realice del mismo, y de su tolerancia asignada. 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 a las tolerancias consideradas.

## 7. REFERENCIAS

### 7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración.

- Manual de funcionamiento del multímetro a calibrar.
- Manual de funcionamiento del calibrador multifunción.
- Especificaciones técnicas de las resistencias patrón utilizadas.

### 7.2. Otras referencias para consulta.

- [1] Vocabulario internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). CEM. 3ª Edición en español. 2008 [2] Norma UNE-EN ISO 10012:2003. Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. (ISO 10012:2003)
- [2] Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Versión Española. Centro Español de Metrología. 3ª Edición. 2008. NIPO: 706-09-002-6.
- [3] Guía EA-4/02. Expression of the uncertainty of measurement in calibration. EA. December 1999.
- [4] Guía EURAMET/cg-15/v.01. (Previously EA-10/15) Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters. July 2007
- [5] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. CEM. Edición 4. 2003
- [6] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía.
- [7] UNE-EN ISO 10012:2003. Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. (ISO 10012:2003)
- [8] A generic DMM test and calibration strategy. Peter B. Crisp. Agosto 1997.
- [9] Calibration of an 8 ½ digit multimeter from only two external standards. Hewlett Packard journal. Abril 1989.

## 8. ANEXO: EJEMPLO NUMÉRICO

### 8.1 Datos de partida

Se realiza la calibración de un multímetro digital de 7 ½ dígitos en el punto de  $100 \Omega$  a una temperatura de  $23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$  en una sala acondicionada para laboratorio de calibración en la que no se sobrepasa el límite de humedad relativa establecido del 60 %. Según el manual de usuario el coeficiente de temperatura para la medida de resistencia del multímetro objeto de calibración

es nulo, en el rango comprendido entre 18 °C y 28 °C. La tensión de alimentación de la red se mantiene dentro de los límites de 230 V ± 10 % durante toda la calibración.

El equipo se ha atemperado en el laboratorio al menos 24 horas antes de comenzar los trabajos de calibración, manteniéndose encendido el tiempo mínimo recomendado por el fabricante antes de realizar las medidas.

Inicialmente se realizó un ajuste del cero para la escala de trabajo en la que se encuentra el punto de calibración elegido, aplicando un cortocircuito de cobre entre los cuatro terminales de medida de resistencia del multímetro y siguiendo las operaciones indicadas por el fabricante en su manual de usuario.

Las indicaciones obtenidas en la pantalla del multímetro digital que utiliza una corriente de prueba de 10 mA y con la resistencia patrón sumergida en un baño de aceite de temperatura controlada en 23 °C ± 0,1 °C fueron las siguientes:

Indicaciones
100,000 21 Ω
100,000 24 Ω
100,000 28 Ω
100,000 56 Ω
100,000 31 Ω
100,000 66 Ω
100,000 52 Ω
100,000 62 Ω
100,000 23 Ω
100,000 22 Ω

El certificado de calibración de la resistencia patrón de nominal 100 Ω indica que el valor óhmico a una corriente de 3,16 mA y a una temperatura de calibración de 23 °C ± 0,1 °C es 100,000 44 Ω con una incertidumbre expandida de 0,2 mΩ (para un factor de cobertura  $k=2$ ).

De las especificaciones del fabricante de la resistencia patrón utilizada se extrae la siguiente información, que se utilizará posteriormente para la estimación de alguna de las componentes de incertidumbre:

- Coeficiente de temperatura de la resistencia:  $\alpha < 0,2 \text{ m}\Omega/\text{°C}$
- Coeficiente de potencia de la resistencia:  $C_W < 0,2 \text{ m}\Omega/\text{W}$

## 8.2. Determinación del error asociado a la calibración

El error  $e_X$  de la indicación obtenida en el multímetro digital a calibrar se obtiene como:

$$e_X = (R_M + \delta_{EM} + \delta_{TM}) - (R_S + \delta_{DR} + \delta_{TR} + \delta_{CR})$$

donde en el caso particular del punto de calibración elegido tenemos:

$R_M = 100,000 \text{ 39 } \Omega$  (media de las diez lecturas obtenidas).

$\delta_{EM} = 0 \text{ } \Omega$  (no se corrige, sólo se considera en el balance de incertidumbres).

$\delta_{TM} = 0 \text{ } \Omega$  (no se corrige, ni se considera en el balance de incertidumbres por encontrarnos en un rango de temperaturas donde el coeficiente de temperatura del multímetro en la medida de resistencia es nulo).

$R_S = 100,000\ 44\ \Omega$  (valor certificado de la resistencia patrón a una intensidad de prueba de 3,16 mA y para una temperatura de  $23\ ^\circ\text{C} \pm 0,1\ ^\circ\text{C}$ ).

$\delta_{DR} = -0,03\ \text{m}\Omega$  (valorada a partir de datos obtenidos de calibraciones anteriores de la resistencia patrón, ajustados linealmente, y calculada para la fecha en que se está utilizando dicha resistencia).

$\delta_{TR} = 0\ \Omega$  (por coincidir la temperatura de la resistencia patrón a la que se están efectuando las medidas con la temperatura a la que fue certificada).

$\delta_{CR} = 0\ \Omega$  (por medirse con un régimen de potencia despreciable semejante al de calibración).

### 8.3. Asignación de las componentes de incertidumbre

Las componentes ya reseñadas son:

- a) Incertidumbre debido a la falta de repetibilidad del multímetro digital. Las lecturas están tomadas en las mismas condiciones de medida. Una vez calculada la desviación típica de las medidas obtenidas la componente de incertidumbre tipo A vendrá dada por:

$$u(R_M) = \frac{s_{R_M}}{\sqrt{n}} = \frac{0,1}{\sqrt{10}} = 0,06$$

- b) Incertidumbre asociada a la resolución del multímetro: si la resolución del dispositivo indicador es 0,01 mΩ el valor de señal de entrada que produce una indicación dada  $R_x$  puede situarse con igual probabilidad dentro del intervalo que va de  $R_x - 0,01\ \text{m}\Omega/2$  y  $R_x + 0,01\ \text{m}\Omega/2$ . La señal de entrada puede describirse entonces por medio de una distribución rectangular de rango 0,01 mΩ, lo que supone una incertidumbre típica:

$$u(\delta_{EM}) = \frac{E}{2\sqrt{3}} = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,003$$

- c) La incertidumbre asociada a la variación de la temperatura durante el proceso de calibración en el multímetro es nula, dado que el coeficiente de temperatura declarado por el fabricante es nulo en el rango de temperaturas considerado.
- d) Incertidumbre de calibración de la resistencia patrón utilizada en las condiciones incluidas en el certificado  $u(R_S)$ : como el valor certificado de la incertidumbre viene cubierto por un factor  $k_n$  (en este caso tal y como nos indica el certificado de la resistencia patrón  $k=2$ ) la componente de incertidumbre típica quedará:

$$u(R_S) = \frac{U(R_S)}{k_n} = \frac{0,2}{2} = 0,1\ \text{m}\Omega$$

- e) La debida a la deriva que sufre la resistencia patrón a lo largo de su periodo de calibración. Se ha evaluado utilizando certificados anteriores que la deriva desde la última calibración hasta la fecha de utilización es  $-0,03\ \text{m}\Omega \pm 0,02\ \text{m}\Omega$ , con lo que la componente de incertidumbre asociada tomará la forma:

$$u(\delta_{DR}) = \frac{0,02}{\sqrt{3}} = 0,012\ \text{m}\Omega$$

El valor de 0,02 mΩ se determina como la máxima desviación entre la recta ajustada y los valores empleados para dicho ajuste.

- f) Componente de incertidumbre debida a la variación de temperatura en la resistencia patrón durante el proceso de calibración. La temperatura del baño de aceite se monitoriza durante todo el proceso de calibración para garantizar que se encuentra dentro de los límites

declarados,  $23\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$ . De las especificaciones del fabricante conocemos el coeficiente de temperatura de la resistencia patrón  $\alpha_R=0,2\text{ m}\Omega/\text{°C}$ , por lo que bajo la suposición de uniformidad la componente de incertidumbre asociada será:

$$u(\delta_{TR}) = \frac{\alpha_R \cdot \Delta T_R}{\sqrt{3}} = \frac{0,2 \cdot 0,1}{\sqrt{3}} = 0,012\text{ m}\Omega$$

- g) Componente de incertidumbre debida a la diferencia en la potencia de uso y la de calibración de la resistencia patrón. Dado que se considera la corrección nula la incertidumbre asociada teniendo en cuenta que la diferencia de potencia es de 9 mW:

$$u(\delta_{CR}) = \frac{C_W \cdot \Delta P}{\sqrt{3}} = \frac{0,2 \cdot 9}{\sqrt{3}} = 0,001\text{ m}\Omega$$

#### 8.4. Balance de las componentes

Magnitud, $X_i$	Estimador, $x_i$	Incertidumbre típica, $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre, $u_i(y)$
$R_M$	100,00039 $\Omega$	$u(R_M) = 0,06\text{ m}\Omega$	Normal	$c_1 = 1$	$u_1(y) = 0,06\text{ m}\Omega$
$\delta_{EM}$	0	$u(\delta_{EM}) = 0,003\text{ m}\Omega$	Rectangular	$c_2 = 1$	$u_2(y) = 0,003\text{ m}\Omega$
$\delta_{TM}$	0	$u(\delta_{TM}) = 0\text{ }\Omega$	Rectangular	$c_3 = 1$	$u_3(y) = 0\text{ }\Omega$
$R_S$	100,00044 $\Omega$	$u(R_S) = 0,1\text{ m}\Omega$	Normal	$c_4 = -1$	$u_4(y) = -0,1\text{ m}\Omega$
$\delta_{DR}$	-0,03 m $\Omega$	$u(\delta_{DR}) = 0,012\text{ m}\Omega$	Rectangular	$c_5 = -1$	$u_5(y) = -0,012\text{ m}\Omega$
$\delta_{TR}$	0	$u(\delta_{TR}) = 0,012\text{ m}\Omega$	Rectangular	$c_6 = -1$	$u_6(y) = -0,012\text{ m}\Omega$
$\delta_{CR}$	0	$u(\delta_{CR}) = 0,001\text{ m}\Omega$	Rectangular	$c_7 = -1$	$u_7(y) = -0,001\text{ m}\Omega$
$e_x$	-0,02 m $\Omega$		Normal		$u(e_x) = 0,12\text{ m}\Omega$

Debido a que al hallar la incertidumbre combinada aparecen dos contribuciones dominantes con distribución normal se puede asumir que la incertidumbre combinada sigue una distribución normal. La fiabilidad de esta última se determina por sus grados efectivos de libertad que se calculan utilizando la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{ef} = \frac{u^4(e_x)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(y)}{v_i}}$$

que particularizando:

$$v_{ef} = \frac{(0,12\text{ m}\Omega)^4}{\frac{(0,06\text{ m}\Omega)^4}{10-1} + \frac{(0,003\text{ m}\Omega)^4}{\infty} + \frac{(-0,1\text{ m}\Omega)^4}{50} + \frac{(-0,012\text{ m}\Omega)^4}{\infty} + \frac{(-0,012\text{ m}\Omega)^4}{\infty} + \frac{(-0,001\text{ m}\Omega)^4}{\infty}} = 60$$

Se han considerado 50 grados de libertad para la componente de incertidumbre de calibración de la resistencia patrón, ya que al no venir declarados en su certificado de calibración para

suponer con una fiabilidad suficiente que con un factor de cobertura  $k=2$  su nivel de confianza sea del 95,45 % en una distribución normal, los grados de libertad deben ser al menos 50.

#### 8.5. Cálculo de la incertidumbre expandida

Considerando que todas las variables de entrada son independientes y por tanto no es necesario tener en cuenta los coeficientes de correlación, y aplicando la expresión de la ley de propagación de varianzas de la referencia [3], teniendo en cuenta que se han realizado las correcciones debidas a efectos sistemáticos conocidos, la incertidumbre expandida queda:

$$U = k \cdot u(e_x) = k \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + u_3^2(y) + u_4^2(y) + u_5^2(y) + u_6^2(y) + u_7^2(y)}$$

$$U = 0,24 \text{ m}\Omega$$

con un factor de cobertura  $k=2$  tal y como se desprende de los grados de libertad obtenidos en el apartado anterior.

#### 8.6. Expresión del resultado de la calibración

El error de indicación del multímetro digital en el punto de calibración considerado de  $100 \Omega$  es el siguiente:

$$e_X = -0,02\text{m}\Omega \pm 0,24\text{m}\Omega$$

La incertidumbre de calibración indicada corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura  $k=2$  (con 60 grados efectivos de libertad), que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95 % aproximadamente.

# Metrología

NIPO: 113-21-002-3