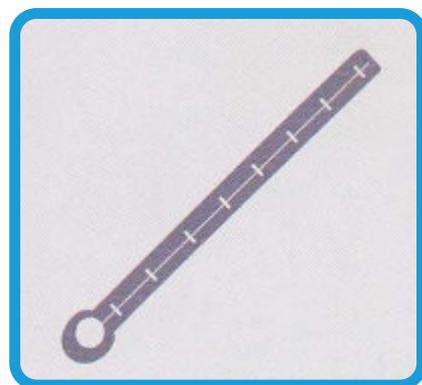
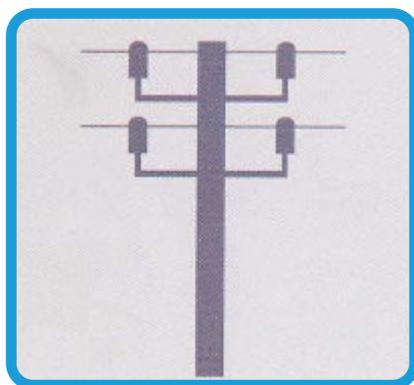
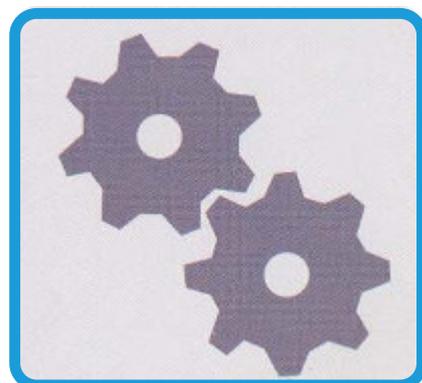
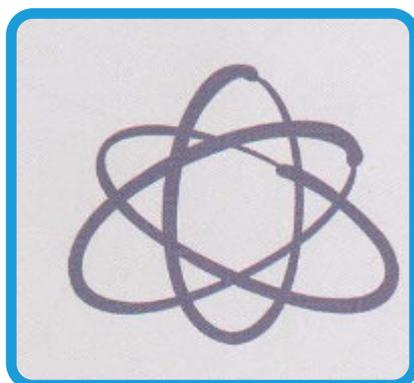
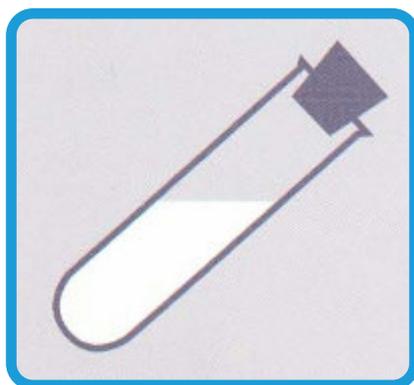
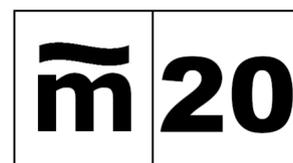


Metrología



PROCEDIMIENTO EL-008 PARA LA
CALIBRACIÓN DE RESISTENCIAS DE
ALTO VALOR EN EL MARGEN
DE 100 MΩ a 100 TΩ



PROCEDIMIENTO EL008

PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE RESISTENCIAS DE ALTO VALOR EN EL MARGEN DE 100 MΩ a 100 TΩ)

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 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
PÁGINA	2
1. OBJETO	3
2. ALCANCE	3
3. DEFINICIONES	3
4. GENERALIDADES	5
4.1. Resistencias de alto valor	5
4.2. Calibración por medida directa	7
4.3. Calibración por medida directa por sustitución	7
5. DESCRIPCIÓN	8
5.1 Equipos y materiales	8
5.2. Operaciones previas	9
5.3. Proceso de calibración	10
5.4. Toma y tratamiento de datos	12
6. RESULTADOS	13
6.1. Cálculo de incertidumbre	13
6.2. Interpretación de los resultados	17
7. REFERENCIAS	18
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración	18
7.2. Otras referencias para consulta	18
8. ANEXOS	18

1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto definir los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de resistencias fijas de referencia de alto valor, en el margen de 100 M Ω a 100 T Ω , utilizadas posteriormente para la calibración de medidores de resistencias de alto valor, tal como medidores de resistencia de aislamiento, megaohmímetros o teraohmímetros, en función de su precisión, así como medidores de intensidades de bajo valor tales como microamperímetros o electrómetros.

Según la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica [1], este elemento de referencia, se denomina técnicamente "Resistencia de alto valor", y su código de identificación es el EE-01.02.

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se limita a la calibración de resistencias de alto valor en el margen indicado, mediante la utilización de dos métodos distintos en función de la instrumentación disponible y la precisión de las resistencias calibradas.

Los procedimientos descritos permiten calibrar las resistencias mencionadas con distintos valores de tensión aplicados, estableciéndose un límite superior de 1 000 V en cc.

Este procedimiento es aplicable a la calibración de resistencias cuyos valores estén entre 100 M Ω y 100 T Ω , por cualquiera de los dos métodos indicados (ver apartado 5.3.3):

Este procedimiento es aplicable también a calibradores o cajas de resistencias de muy alto valor.

3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [7] que se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

Ajuste (de un sistema de medida) [7] (4.30)

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

NOTAS

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 la 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 [7] (6.11)

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

NOTAS

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.

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.

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

Incertidumbre de medida [7] (3.9)

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

NOTAS

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.

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 la semiamplitud de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada.

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.

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) [7] (4.15)

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

Trazabilidad metrológica [7] (6.10)

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.

NOTAS

- 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.
- 2 La trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración establecida.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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).
- 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.

4. GENERALIDADES

4.1. Resistencias de alto valor

Las resistencias de alto valor son elementos resistivos fijos que pueden constituir un elemento único por cada valor disponible, o constituir una caja de resistencias o calibrador cuando se conjuntan varios de estos valores. Se encuentran dentro de un recinto apantallado con terminal de guarda, según se muestra en la Figura 1 adjunta. Algunas de ellas poseen un diseño con guarda dividida para aplicar diferentes tensiones en cada lado. Suelen estar en un recinto herméticamente sellado que las protege de las condiciones ambientales como la presión y la humedad.

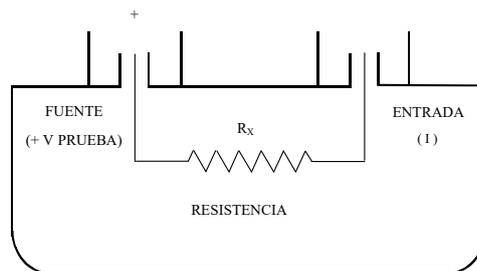


Figura 1. Esquema de una resistencia de alto valor

Sus características más importantes, junto a su valor y precisión, son las siguientes:

Coefficiente de temperatura $\alpha(R_x)$: Variación del valor óhmico de la resistencia “ R_x ” con la temperatura.

Un valor positivo $\alpha(R_x)$ indica que la resistencia aumenta al aumentar la temperatura. Los valores del coeficiente α pueden variar ampliamente en función del tipo de resistencia y su valor.

Coefficiente de tensión $\Delta_V(R_x)$: Variación del valor óhmico de la resistencia con la tensión aplicada:

Un valor positivo $\Delta_V(R_x)$ indica que la resistencia aumenta al aumentar la tensión aplicada y viceversa.

El valor de la resistencia depende de la polaridad de la tensión aplicada, por lo que su calibración y certificación se puede realizar con ambas polaridades, aunque lo normal es indicar un valor medio entre las dos polaridades, considerando una componente adicional de la incertidumbre por este concepto.

Tipo de conectores:

Las resistencias están fabricadas con el tipo de conectores apropiados a su uso y especificaciones, son los que se deben utilizar. Los conectores más comúnmente vistos son los de tipo banana, tipo N o tipo musa. Todos ellos permiten conexiones a guarda o tierra y la utilización de cables coaxiales y/o apantallados.

La resistencia consta de tres terminales, dos de ellos unidos a la resistencia y el tercero unido al chasis o caja de protección.

Para resistencias de precisión alta, se suelen emplear conectores tipo N. La resistencia tiene dos conectores cuyos terminales centrales están unidos a la resistencia y los terminales exteriores a la caja de protección (ver Figura 1).

En ambos tipos de conectores se utiliza como aislante “teflón” con objeto de obtener resistencias de aislamiento muy elevadas. Las especificaciones de los conectores indican un límite inferior para la resistencia de aislamiento, por ejemplo $\geq 5 \text{ G}\Omega$ para conectores tipo N, aunque normalmente es muy superior y si se necesita este parámetro es necesario medirlo.

Cables utilizados y resistencia de aislamiento:

Los cables utilizados para realizar las conexiones son cables coaxiales de alta resistencia de aislamiento como parámetro más característico. Con este fin se utiliza casi exclusivamente como aislante el teflón, con lo que se obtienen resistencias de aislamiento superiores a $10^{16} \Omega$ ($10^4 \text{ T}\Omega$). Dado que los cables de medida son elementos que no se mantienen normalmente después de la medida es importante que esta resistencia sea elevada, para evitar que su valor influya en el resultado.

Estabilidad:

Estas resistencias se someten a ciclos acelerados de envejecimiento antes de su puesta en mercado, no obstante durante los dos primeros años de uso se puede presentar una deriva apreciable por envejecimiento, con valores que pueden alcanzar el 1 % de su valor inicial. Con el fin de controlar esta deriva se recomienda disminuir el intervalo de calibración inicial aproximadamente a la mitad del que se aplique posteriormente. También es posible solicitar del fabricante un envejecimiento adicional hasta que la estabilidad se encuentre dentro de unos márgenes establecidos.

Tolerancias permitidas respecto al valor nominal:

Aunque este es un factor que depende del usuario, los valores iniciales se suelen establecer dentro del 1% para los valores inferiores (1 GΩ), y alcanzar hasta el 10 % para valores superiores (100 TΩ).

La incertidumbre de calibración de estas resistencias aumenta con su valor de forma apreciable, pudiendo alcanzar valores de $2 \times 10^{-4} \times R$ para 1 GΩ y $10^{-3} \times R$ para 100 TΩ.

A continuación se describen los dos métodos de calibración aplicados en este procedimiento de calibración. No se describen los métodos de calibración indirectos, tales como el potenciométrico, el puente de Wheatstone modificado, o el basado en un sistema integrador, dado que la metodología aplicada es totalmente distinta a la descrita en este procedimiento y deben ser objeto de un procedimiento separado.

4.2. Calibración por medida directa

Se basa este método en la medida directa con un instrumento para la medida de resistencias de alto valor, megaohmímetro o teraohmímetro, según se muestra en la Figura 2. La función que relaciona la variable de salida, o resistencia calibrada, con las variables de entrada es:

$$R_{x,c} = R_{x,m} + \delta R_{x,m}$$

4.3. Calibración por medida directa por sustitución

Este método se basa en calibrar el megaohmímetro o teraohmímetro previamente a su utilización, utilizando con este fin un grupo de resistencias de referencia certificadas, según se muestra en la Figura 3. El proceso se conoce como normalización del instrumento mediante la medida de un patrón de valor certificado conocido y permite establecer la diferencia entre este patrón y la resistencia calibrada en el momento de la calibración con una incertidumbre mínima debido a la correlación que existe entre las dos mediciones realizadas, consiguiéndose de esta forma disminuir considerablemente la incertidumbre de calibración.

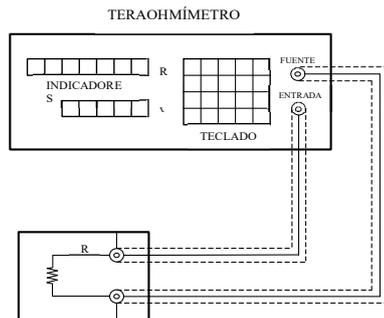


Figura 2.- Medida directa

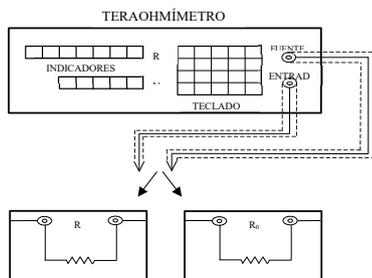


Figura 3.- Medida directa por sustitución

5. DESCRIPCIÓN

5.1 Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario disponer, en función del método aplicado, de la siguiente instrumentación:

Método directo:

- a) Teraohmmetro o megaohmmetro

Método directo por sustitución (o transferencia):

- a) Teraohmmetro o megaohmmetro
- b) Grupo de resistencias de referencia de valores nominales iguales a los que se calibran, de especificaciones superiores y calibradas a los mismos valores de tensión o disponer de los coeficientes de tensión aplicables.

Así como de un conjunto de cables de medida, independiente del método utilizado, con las siguientes características:

- * Baja f.e.m de origen térmico
- * Apantallados
- * Alta resistencia de aislamiento
- * Si es posible trenzados
- * Conectores de alta resistencia de aislamiento, según se ha indicado ya en el capítulo 4.

Utilizar también cables con el nivel de aislamiento adecuado para evitar su perforación (cables que soporten como mínimo 2000 voltios a 50 Hz). Así mismo los cables deben disponer, si es posible, de terminales o bananas que una vez introducidas en las bornes correspondientes de la instrumentación no presenten partes activas accesibles.

Se recomienda que la incertidumbre de calibración de esta instrumentación de referencia sea al menos cuatro veces menor que la incertidumbre especificada para las resistencias a calibrar para su utilización habitual.

5.2. Operaciones previas

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 el fabricante en el manual técnico, para evitar riesgos al personal que realiza la calibración.

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

- a) Comprobar que la resistencia a calibrar está identificada de forma permanente con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno de su propietario de forma inequívoca. Si no fuera así asignar un código de identificación y adherirlo o fijar de forma segura sobre la resistencia.
- b) Analizar las especificaciones de la resistencia a calibrar, de forma que la persona que realice la calibración esté familiarizada con dichas especificaciones.
- c) Disponer los manuales técnicos de la instrumentación utilizada en la calibración y comprobar que la persona que realice la calibración estará familiarizada con su manejo.
- d) Comprobar el estado de calibración de la instrumentación utilizada en la calibración. Para ello analizar su certificado de calibración en vigor, y si dicho certificado garantiza la trazabilidad e incertidumbre apropiadas a las medidas que se van a realizar en el transcurso de la calibración.
- e) Conectar a la red de alimentación eléctrica la instrumentación utilizada en la calibración que lo necesite 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 si es de relevancia se indica en su manual.
- f) Comprobar que la temperatura del laboratorio se mantiene dentro de los márgenes especificados para el laboratorio.
- g) Comprobar que la humedad relativa del laboratorio se mantiene dentro de los márgenes especificados para el laboratorio. En este tipo de calibraciones bajo ningún concepto se

sobrepasara el límite superior del 70%, recomendándose valores inferiores del orden del 50 % o el 60 %.

- h) Mantener la resistencia a calibrar un tiempo mínimo de 24 horas en el laboratorio o si procede en un baño de temperatura a la temperatura de referencia de la resistencia antes de iniciar la calibración.
- i) Como mínimo 24 horas antes de comenzar la calibración, limpiar los conectores del teraohmímetro y de las resistencias de referencia y a calibrar junto con los de los cables de medida utilizados. Utilizar con este fin el producto recomendado por el fabricante, normalmente isopropanol.
- j) Comprobar que la instrumentación utilizada en la calibración está conectada a una base de enchufe que incluya un conductor de protección o toma de tierra como medida elemental de protección frente a contactos indirectos.
- k) No realizar ninguna conexión a las bornes de salida de la instrumentación si hay tensión presente en esas bornes. Por lo tanto antes de realizar cualquier conexión eléctrica, presionar la tecla que lleva a la instrumentación a situación de espera (STANDBY) y comprobar que la señalización indica que no hay señal en sus bornes.

5.3. Proceso de calibración

5.3.1- Secuencias posibles de calibración

Dado que el instrumento a calibrar es un elemento pasivo de valor único y sin posibilidad de ajuste, el proceso de calibración seguido es único, consistente en establecer el valor certificado de la resistencia y su incertidumbre. Los resultados de sucesivas calibraciones permitirán establecer la deriva de la resistencia calibrada y aplicar las correcciones que procedan cuando se utilice.

En función de los resultados obtenidos en la calibración y la incertidumbre resultante se puede determinar si la resistencia se comporta adecuadamente, comprobando si los resultados se encuentran o no dentro de los márgenes de estabilidad establecidos en sus especificaciones.

5.3.2.- Conexiones y realización de las medidas.

Conectar los instrumentos utilizados en la calibración a la resistencia a calibrar según se indique en la figura que corresponde al método de calibración aplicado, figuras 2 y 3, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Conexiones cortas.
- b) Mantener cables y conectores limpios.
- c) Efectuar las conexiones de forma correcta evitando el doblar excesivamente los cables.
- d) Comprobar que no existe tensión en los distintos bornes utilizados para realizar el montaje.
- e) Evitar focos de calor que afecten a la temperatura de la resistencia calibrada, bien por radiación próxima o por conducción.
- f) Esperar a que la lectura se estabilice antes de anotar su valor.
- g) Salvo que la inversión de polaridad se realice de forma automática, retirar la tensión aplicada de los terminales de medida y actuar según se indique en los manuales técnicos de cada instrumento.

h) Cuando se invierta la polaridad, esperar hasta que la medida se estabilice antes de tomar su valor.

i) En el supuesto de que la resistencia calibrada no disponga de conexión de guarda, como es el caso de la medida de las resistencias base, si es posible introducir la resistencia en una caja metálica cerrada para proteger la medida de posibles interferencias externas, y fijar los terminales de medida sobre una superficie de metacrilato o similar para incrementar la resistencia de aislamiento.

j) Evitar lazos de tierra y ruido que distorsionen los resultados de la calibración. Para ello disponer solo un punto de conexión a tierra. Esta conexión a tierra se puede realizar en el terminal bajo (LO) de alguno de los instrumentos utilizados en la calibración o en el conector de guarda de la propia resistencia a calibrar, asegurándose entonces de que el terminal bajo (LO) de las fuentes de tensión utilizadas estén aislados.

k) Para evitar interferencias, procurar que no haya personas en movimiento alrededor del sistema de medida.

l) Mantener los instrumentos utilizados en la calibración encendidos un tiempo mínimo de 30 minutos para que se estabilicen térmicamente.

5.3.3.- Métodos de calibración aplicados.

A continuación se describen las operaciones necesarias para desarrollar los dos métodos descritos en 4.2 y 4.3. La aplicación de uno u otro método será función de las especificaciones de la resistencia calibrada y de la instrumentación disponible en cada laboratorio.

5.3.3.1.- Medida directa

a) Conectar el medidor de resistencia de alto valor, en adelante calibrador, a la resistencia a calibrar según se muestra en la Figura 2.

b) Anotar en las tablas de toma de datos el valor de la resistencia a calibrar y los valores de tensión de calibración aplicados.

c) Siguiendo las instrucciones indicadas en el Manual Técnico del calibrador para realizar la medida, anotar el valor medido por el calibrador para los distintos valores de tensión indicados en la Tabla 1 (Anexo 1) como medida número 1.

d) Completar las tablas de toma de datos realizando el número de medidas previamente establecido. Realizar cada medida de forma secuencial para los distintos valores de tensión y las dos polaridades indicadas.

5.3.3.2.- Medida directa por sustitución

a) Disponer en las proximidades del teraohmímetro o megaohmímetro utilizado el conjunto de resistencias de referencia R_0 utilizadas.

b) Anotar en la tabla de toma de datos el valor nominal de la resistencia a calibrar y los valores de tensión de calibración a aplicar.

c) Conectar la resistencia de referencia de igual valor nominal a la resistencia a calibrar al teraohmímetro o megaohmímetro y realizar los pasos necesarios según se indique en su manual técnico para medir dicha resistencia a la tensión seleccionada. Anotar el valor medido de dicha resistencia, $R_{0,m}$.

d) Conectar la resistencia a calibrar R_x de igual forma que para R_0 medir su valor. Anotar el valor medido, $R_{x,m}$.

e) Establecer la diferencia medida entre ambas resistencias, $R_{0,m}$ y $R_{x,m}$:

$$\Delta R_c = R_{0,m} - R_{x,m}$$

f) Establecer el valor de la resistencia a calibrar $R_{x,c}$, como suma del valor certificado de la resistencia de referencia $R_{0,c}$ y la diferencia obtenida en el apartado e) anterior:

$$R_{x,c} = R_{0,c} - \Delta R_c$$

y anotar el valor medido como medida número 1 en la columna que corresponda al valor de tensión aplicado en la tabla de resultados.

g) Completar la tabla de resultados realizando el número de medidas previamente establecido. Realizar cada medida de forma secuencial para los distintos valores de tensión y las dos polaridades indicadas.

5.4. Toma y tratamiento de datos

5.4.1.- Definición de los puntos de medida.

Aunque el valor medido de resistencia es único, no lo es la tensión a la que se realiza la calibración, que puede variar en valor y en polaridad. La Tabla 1, incluida en el Anexo 1, muestra, independientemente del método aplicado en la calibración, para cada resistencia a calibrar " R_x " una forma posible de toma de datos, considerando que para cada resistencia calibrada se realizan 10 medidas a tres tensiones distintas, V_1 , V_2 y V_3 , con polaridad positiva y negativa. Cualquier variación del número de medidas o valores de tensión es posible.

No contempla esta tabla los posibles pasos y cálculos que como consecuencia del método de calibración aplicado son necesarios, que serán desarrollados en tablas diferentes.

Las tablas 2 y 4, incluidas en el Anexo 1, muestran las tablas utilizadas para aplicar cada uno de los métodos de calibración descritos en este procedimiento.

Las tablas 3 y 5, incluidas también en el Anexo 1, muestran la aplicación particular en este procedimiento al cálculo de la incertidumbre de calibración, de lo recomendado en la Guía EA-4/02 [4].

5.4.2.- Criterios de aceptación y rechazo de valores medidos.

La aceptación o rechazo de cada uno de los valores medidos y contenidos en la Tabla 1 sigue el criterio de Chauvenet consiguiendo así eliminar del resultado de la calibración posibles anomalías no controladas ni sistemáticas.

El tratamiento dado a las desviaciones obtenidas con respecto a los valores nominales es objeto del Capítulo 6.

5.4.3.- Cálculos a realizar

Los datos básicos obtenidos de las medidas realizadas son el valor medio de la serie de medidas realizadas, junto con la desviación típica muestral de dicha serie de medidas que se muestran en las filas 11 y 12 de la Tabla 1. Su cálculo y tratamiento posterior se realiza en el capítulo 6.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbre

6.1.1. Introducción

El resultado de la calibración viene establecido por el valor certificado de la resistencia calibrada $R_{x,c}$, establecido en valor absoluto o como diferencia al nominal, junto con la incertidumbre de dicho valor obtenida durante la calibración.

La incertidumbre de calibración se obtiene aplicando la recomendación INC-1 del BIPM, considerando las distintas componentes de la incertidumbre divididas en Tipo A y B, y efectuando su cálculo y composición de conformidad con los criterios establecidos en la guía EA-4/02 [4].

6.1.2.- Valor certificado

a) El valor certificado viene establecido por el valor medio de la serie de “n” medidas realizadas, por cualquiera de los dos métodos descritos, para cada valor de tensión y polaridad aplicados.

b) Calcular el valor medio indicado aplicando la expresión:

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

, para la resistencia a calibrar y para las distintas tensiones y polaridades consideradas.

c) Anotar los valores obtenidos en la fila que corresponda de la tabla de resultados.

6.1.3.- Componentes de la incertidumbre: Definición

6.1.3.1- Componentes de tipo A

a) La componente derivada de la repetibilidad de las medidas se obtiene de la desviación típica de la serie de “n” medidas realizadas, por cualquiera de los dos métodos descritos.

b) Calcular la desviación típica muestral indicada aplicando la expresión:

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

, para cada serie de medidas realizada en función de las tensiones y polaridades aplicadas.

c) Anotar los valores obtenidos en el apartado anterior en la fila que corresponda de la tabla de resultados.

6.1.3.2.- Componentes de tipo B

Se analizan por separado los dos métodos descritos:

Método directo:

a) La relación que permite obtener el valor de la resistencia calibrada es:

$$R_{x,c} = R_{x,m} + \delta R_{x,m}$$

, en donde:



$R_{x,m}$: Indicación del teraohmímetro cuando se conecta la resistencia a calibrar

$\delta R_{x,m}$: Corrección de la resistencia medida por el teraohmímetro debida a:

- 1) Deriva desde la última calibración.
- 2) Variaciones de la temperatura ambiente.
- 3) Variaciones en la tensión de red.
- 4) Efecto en la medida de las resistencias de aislamiento presentes.
- 5) Efectos de ajustes de cero, ganancia y no linealidad.

b) Dado que la relación funcional es una suma, correspondiendo el segundo sumando a factores de influencia sobre el primer sumando, la incertidumbre de Tipo B resultante es:

$$u^2(R_{x,c}) = u^2(R_{x,m}) + u^2(\delta R_{x,m})_{\text{esp}}$$

, en donde:

$u(R_{x,m})$: Incertidumbre de calibración del teraohmímetro obtenida de su certificado de calibración.

$u(\delta R_{x,m})_{\text{esp}}$: Incertidumbre por correcciones de la indicación del teraohmímetro. Dado que se trata de un instrumento activo con varios alcances, la aplicación de correcciones y las incertidumbres de ellas derivadas es compleja, incluso en ocasiones no se dispone de los datos individuales de cada corrección, se recomienda aplicar las especificaciones del fabricante en función del periodo de calibración establecido y eliminar la corrección como tal.

c) Se considera como componente de incertidumbre adicional la resolución del teraohmímetro o megaohmímetro utilizado en la medida $u(\delta R_{x,m})_{\text{res}}$

Método directo por sustitución:

a) La relación que permite obtener el valor de la resistencia calibrada es:

$$R_{x,c} = R_{0,c} + \delta R_{0,c} + \Delta R_c + \delta(\Delta R)_c$$

, en donde:

$R_{0,c}$: Valor certificado de la resistencia de referencia.

$\delta R_{0,c}$: Corrección de la resistencia de referencia debida a:

- 1) Deriva desde la última calibración.
- 2) Desviaciones de la temperatura ambiente

ΔR_c : Diferencia entre la resistencia calibrada y la resistencia de referencia.

$\delta(\Delta R)_c$: Corrección de la diferencia obtenida debida a variaciones a corto plazo de la resistencia de referencia y de la calibrada.

Su valor será función solo de las características de ambas resistencias y no de la lectura del teraohmímetro, que teóricamente afecta por igual a ambas medidas. En el caso ideal de dos resistencias de idénticas características esta corrección es prácticamente nula así como su incertidumbre.

b) Dado que la relación funcional es una suma la incertidumbre resultante es:

$$u^2(R_{x,c}) = u^2(R_{0,c}) + u^2(\delta R_{0,c}) + u^2(\Delta R_c) + u^2(\delta \Delta R_c)$$

, en donde:

$u(R_{0,c})$: Incertidumbre de calibración de la resistencia de referencia

$u(\delta R_{0,c})$: Incertidumbre asociada a correcciones al valor certificado de la resistencia de referencia por:

- 1) Deriva desde la última calibración.
- 2) Desviaciones de la temperatura ambiente

$u(\Delta R_c)$: Incertidumbre asociada a la diferencia obtenida con el teraohmímetro entre la resistencia de referencia y la resistencia a calibrar.

$u(\delta \Delta R_c)$: Incertidumbre de la corrección a la diferencia obtenida. Como se ha indicado esta componente es prácticamente nula.

c) Se considera como componente adicional de la incertidumbre la resolución del teraohmímetro o megaohmímetro utilizado en la medida $u(\delta R_{x,m})_{res}$, teniendo en cuenta que para este método se miden dos veces.

6.1.4.- Componentes de la incertidumbre: Estimación

6.1.4.1.- Incertidumbre de tipo A

La incertidumbre de Tipo A, o de repetibilidad de las medidas, viene establecida por la desviación típica del valor medio obtenido. Su valor se obtiene como cociente entre la desviación típica muestral, indicada en el Apartado 6.1.3.1 anterior, y la raíz cuadrada del número de medidas realizadas:

$$u(R_{x,c}) = s(R_{x,c}) / \sqrt{n}$$

6.1.4.2.- Incertidumbre de Tipo B

Medida directa:

Las tres componentes consideradas según lo indicado en el Apartado 6.1.3.2 son:

Incertidumbre de calibración del teraohmímetro:

Se supone distribución normal para el factor de cobertura k indicado en el certificado, normalmente $k = 2$:

$$u(R_{x,m}) = U(R_{x,m}) / k$$

, siendo $U(R_{x,m})$ la incertidumbre certificada del teraohmímetro para las condiciones de calibración.

Incertidumbre por corrección de la indicación del teraohmímetro:

Se aplican las especificaciones del teraohmímetro para una distribución rectangular:

$$u(\delta R_{x,m}) = U_{esp} / \sqrt{3}$$

, siendo U_{esp} la incertidumbre especificada para el teraohmímetro en su Manual Técnico.

Incertidumbre por resolución del instrumento de medida:

Se considera el máximo error posible debido a esta magnitud de influencia como $\pm 0,5$ veces el último dígito. La incertidumbre se obtiene aplicando una distribución rectangular, luego:

$$u(\delta R_{x,m})_{res} = \pm 0,5 \text{ res} / \sqrt{3}$$

, siendo res la resolución del instrumento.

Medida directa por sustitución:

Las componentes consideradas según lo indicado en el Apartado 6.1.3.2 son las siguientes:

Incertidumbre de calibración de la resistencia de referencia $U(R_{0,c})$:

Se supone distribución normal para el factor de cobertura k indicado en el certificado, normalmente $k = 2$:

$$u(R_{0,c}) = U(R_{0,c}) / k$$

, siendo $U(R_{0,c})$ la incertidumbre expandida certificada de la resistencia de referencia.

Incertidumbre por correcciones al valor certificado de la resistencia de referencia por variación de temperatura y deriva $U_T(R_{0,c})$ $U_D(R_{0,c})$ y:

NOTA: Es posible corregir el valor de una resistencia por variaciones de temperatura o deriva, pero su aplicación en la práctica debe estar muy contrastada. En caso contrario es siempre preferible considerar su efecto como componente de incertidumbre.

Temperatura $U_T(R_{0,c})$:

Suponiendo que la resistencia de referencia se utiliza a la misma temperatura a la que está calibrada, en caso contrario se puede corregir su valor en función de la diferencia de temperatura, la corrección es nula y la incertidumbre considerada es consecuencia del margen de temperatura permitido en el laboratorio $\pm \Delta t$ °C y el coeficiente de temperatura de la resistencia de referencia $\alpha_T(R_{0,c})$ $\Omega/^\circ\text{C}$, de forma que:

$$U_T(R_{0,c}) = \pm \Delta t \times \alpha_T(R_{0,c}) \Omega$$

Si aplicamos una distribución rectangular, la incertidumbre de esta corrección resulta ser:

$$u_T(R_{0,c}) = U_T(R_{0,c}) / \sqrt{3}$$

Deriva $U_D(R_{0,c})$:

Con el mismo criterio que para la temperatura, aunque la deriva observada mediante un análisis de sucesivas calibraciones de la resistencia muestre una variación media de la resistencia en una dirección, junto con una desviación típica de dicho valor, es decir:

$$\Delta R_D \pm s(\Delta R_D) \Omega / IC$$

, siendo IC el intervalo de calibración aplicado a la resistencia.

Lo recomendado, y en particular en calibraciones de precisión media como es el objeto de este procedimiento de calibración, es considerar la suma indicada de ambos valores como componente de incertidumbre con distribución rectangular, es decir, la incertidumbre resultante resulta ser:

$$u_D(R_{0,c}) = [\Delta R_D + s(\Delta R_D)] / \sqrt{3} \Omega / IC$$

, teniendo en cuenta que normalmente:

$$\Delta R_D \gg s(\Delta R_D)$$

Incertidumbre de la diferencia obtenida entre la resistencia de referencia y la resistencia calibrada $U(\Delta R)$:

Dado que es utilizado el mismo instrumento para realizar ambas medidas, y estas se realizan en el mismo momento, por el mismo operador, y utilizando la misma disposición y medios auxiliares de medida, las incertidumbres de ambas medidas están correlacionadas, con un coeficiente de correlación negativo y muy próximo a la unidad en función de la similitud de ambas resistencias, factores estos que pueden ser contrastados con el análisis estadístico de una serie de “n” medidas de ambas resistencias en las condiciones indicadas. En este procedimiento y dada la precisión media de las resistencias calibradas se supone un coeficiente de correlación $r = -1$, de forma que la incertidumbre de la diferencia medida debida al instrumento utilizado es nula, es decir:

$$U(\Delta R) = 0$$

No obstante lo indicado, y con un criterio conservador, se toma como incertidumbre la inestabilidad observada de la diferencia, normalmente establecida por la inestabilidad de la medida de la resistencia calibrada, de características metrológicas inferiores a las de la resistencia de referencia, o en el mejor de los casos la resolución del teraohmímetro, luego:

$$u(\Delta R) = \text{resolución del teraohmímetro} \times 2$$

Incertidumbre por corrección de la diferencia obtenida entre la resistencia de referencia y la resistencia calibrada $U_T(\Delta R)$ y $U_D(\Delta R)$:

Según se ha indicado, en cualquier caso no solo se considera nula la corrección “ $\delta(\Delta R)$ ”, sino también la incertidumbre de dicha corrección “ $U[\delta(\Delta R)]$ ”.

Incertidumbre por resolución del instrumento de medida:

Se considera el máximo error posible debido a esta magnitud de influencia como $\pm 0,5$ veces el último dígito, teniendo en cuenta que en este método se mide dos veces. La incertidumbre que se obtiene al aplicar una distribución rectangular es, por tanto:

$$u(\delta R_{x,m})_{res} = \pm 2 \cdot 0,5 \times res / \sqrt{3} = \pm res / \sqrt{3}$$

6.2. Interpretación de los resultados

Se entiende por resultado de la calibración el obtener el valor certificado de la resistencia calibrada y la incertidumbre asociada a dicho valor. El cálculo se realiza aplicando los conceptos descritos en el apartado anterior y sobre la base de un ejemplo numérico para cada método descrito, directo y por sustitución, según se muestra en el Anexo 2 del Capítulo 8.

Durante la ejecución de los dos ejemplos indicados en el Capítulo 8, se efectúan comentarios en relación con el método de calibración aplicado y los resultados obtenidos. La conclusión final es que mientras la medida directa es un método de precisión media baja, útil para calibrar resistencias de tipo industrial, el segundo método, en el que se refiere la medida directa a un patrón de referencia previamente calibrado, es un método de precisión alta que se aplica a la calibración de resistencias de referencia. Lógicamente este segundo método implica el disponer de un conjunto de resistencias de referencia previamente calibradas, en esencia es una disposición totalmente distinta a la primera y se debe establecer en función del nivel de precisión del laboratorio y su aplicación.

Un periodo de calibración de 12 meses es un tiempo razonable para la recalibración de resistencias de alto valor. Este periodo podrá ser modificado en función de las características metrológicas de la resistencia y su comportamiento en función del tiempo. El límite inferior

puede ser el que establezca el Responsable Técnico del laboratorio en función de la información disponible y el uso dado a las resistencias, no parece razonable disminuir por debajo de seis meses. Con respecto al límite superior se establece en 24 meses.

7. REFERENCIAS

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

- * Manual de funcionamiento del medidor de resistencia de muy alto valor utilizado.
- * Especificaciones de las resistencias calibrada y de referencia.

7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía. Diciembre 1994.
- [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)
- [3] Proceso de Calibración EE - 43 “Calibración de teraohmímetro”.
Sistema de Calibración Industrial del Ministerio de Industria.
Edición inicial: Diciembre de 1993
- [4] EA-4/02 (antigua EAL-R2). Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. December 1999.
- [5] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 1. 1998.
- [6] “Guía para la Expresión de la Incertidumbre de la Medida”. Versión Española. 3ª Edición. Tres Cantos. Centro Español de Metrología. Septiembre 2008. (3ª edición 2009, en Español)
- [7] International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). JCGM 200:2008.

8. ANEXOS

Se incluyen los siguientes anexos

Anexo 1: Formatos utilizados para la toma de datos.

Anexo 2: Ejemplo numérico: Método directo.

Anexo 3: Ejemplo numérico: Método directo por sustitución.

Anexo 4: Tabla para obtención del factor de cobertura en función del número de grados de libertad efectivos ν_{ef} y el nivel de confianza.



ANEXO I: FORMATOS UTILIZADOS PARA LA TOMA DE DATOS

Tabla 1.- Toma de datos de calibración: $R_x = \Omega$

X_i	V_1		V_2		V_3	
	+	-	+	-	+	-
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
X_i						
$S_{c,i}$						



Tabla 2.- Medida directa: toma de datos.

$R_{x,i}$ Medida N°	Tensión de medida $V = 1000 V$	
	Positiva (+)($R_{x,c}$) ₊	Negativa (-)($R_{x,c}$) ₋
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
R_x		
$s(R_{x,i})$		

NOTA: Aunque es la aplicada en el ejemplo N° 1 (Anexo 2), básicamente es igual a la Tabla 1.

Tabla 3.- Medida directa: balance de incertidumbre.

Magnitud X_i	Valor estimado X_i	Incertidumbre $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Componente de la incertidumbre $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
$R_{x,m}$					
$\delta R_{x,m}$					
$R_{x,c}$					



Tabla 4.- Medida directa por sustitución: toma de datos.

$R_{x,i}$ Medida Nº	Tensión de medida: $V = 1000\text{ V}$ Polaridad: (\pm)			
	$(R_{0,m})_i$	$(R_{x,m})_i$	$(\Delta R)_i$	$(R_{x,c})_i$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
$R_{x,c}$				
$s(R_{x,c})_i$				

Tabla 5.- Medida directa por sustitución: balance de componentes de la incertidumbre.

Magnitud X_i	Valor estimado X_i	Incertidumbre $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad C_i	Componente de la incertidumbre $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
ΔR					
$\delta(\Delta R)$					
R_0					
$\delta(R_0)$					
$R_{x,c}$					

ANEXO II. EJEMPLO NUMÉRICO: MÉTODO DIRECTO

A.2.1.- Enunciado

- a) Calibrar una resistencia de 100 GΩ a la tensión de ±1000 V por medida directa con un teraohmímetro.

A.2.2.- Instrumentación utilizada

- b) Resultado de la calibración del teraohmímetro en la escala de 100 GΩ obtenido de su certificado de calibración:

- Desviación al nominal:

$$\Delta R = 0,0002 \text{ G}\Omega$$

- Incertidumbre:

$$U_c = 3 \cdot 10^{-4} \times R$$

Para un $k = 2,37$ y un nivel de confianza del 95,45 %.

El certificado de calibración indica también que el número de grados efectivos de libertad de la incertidumbre combinada de la que se obtiene la incertidumbre expandida indicada en el certificado es $\nu = 8$ y se supone que el teraohmímetro se utiliza dentro de sus condiciones de referencia.

- Especificaciones del teraohmímetro en la escala de 100 GΩ:

$$U_{esp} = 1 \times 10^{-3} R$$

A.2.3.- Toma de datos y obtención del valor certificado

- d) La Tabla 2 adjunta muestra la serie de 10 medidas realizadas con los resultados obtenidos para ambas polaridades con el fin de poner de manifiesto la aleatoriedad de las medidas. La serie se ha realizado durante una mañana en dos grupos de 3 medidas y un grupo de 4 medidas con intervalos entre grupos de 30 minutos y realizando cada medida del grupo secuencialmente para ambas polaridades.

- e) El valor certificado de la calibración puede darse de forma independiente para valores positivos y negativos de la tensión aplicada, aunque es práctica usual el indicar el valor medio de los resultados obtenidos con ambas polaridades, es decir:

$$R_{x,c} = [(R_{x,c})_+ + (R_{x,c})_-] / 2$$

, luego:

$$R_{x,c} = (100,0285 + 100,0398) / 2 = 100,0342 \text{ G}\Omega$$

Anotar este valor en la columna 2 de la Tabla 3 de balance de la incertidumbre en la fila que corresponde a la magnitud medida $R_{x,m}$.

A.2.4.- Componentes de la incertidumbre de calibración

f) La Tabla 3 muestra el balance de diversas componentes de la incertidumbre presentes en el método directo, junto con la obtención del valor certificado $R_{x,c}$. Se describe a continuación la obtención de los valores en ella contenidos. Cada valor obtenido, expresado en $G\Omega$, se anota en la columna y fila de la Tabla 3 que corresponde.

Componente de repetibilidad o de Tipo A:

Viene determinada por la desviación típica del valor medio medido, luego:

$$u(R_{x,m}) = s(R_{x,m})_i / \sqrt{n}$$

En nuestro caso $s(R_{x,m})_i$ se toma como el valor medio de las desviaciones típicas obtenidas para ambas polaridades:

$$s(R_{x,m})_i = (6,4 + 5,5) \cdot 10^{-3} / 2 = 5,95 \cdot 10^{-3} G\Omega$$

, luego:

$$u_1 = 5,95 \times 10^{-3} / \sqrt{10} = 1,9 \times 10^{-3} G\Omega$$

Otro criterio más conservativo sería elegir la mayor desviación típica de las dos obtenidas.

Componente por incertidumbre de los valores medidos " $R_{x,m}$ ":

La establece la incertidumbre de calibración del instrumento utilizado para la medida, el teraohmímetro, en nuestro caso:

$$u_2 = 3 \times 10^{-4} R / k$$

, que para $100 G\Omega$ y un $k = 2,37$ indicado en el certificado, nos proporciona el valor:

$$u_2 = 3 \times 10^{-4} \times 10^2 / 2,37 = 1,3 \times 10^{-2} = 13 \times 10^{-3} G\Omega$$

Tabla 2.- Medida directa: toma de datos

R_{x,i} Medida Nº	Tensión de medida V = 1000 V	
	Positiva (+)(R_{x,c})₊	Negativa (-)(R_{x,c})₋
1	100,0172	100,0380
2	100,0110	100,0320
3	100,0205	100,0398
4	100,0225	100,0440
5	100,0274	100,0460
6	100,0150	100,0382
7	100,0214	100,0433
8	100,0099	100,0315
9	100,0142	100,0374
10	100,0285	100,0478
R_x	100,0285	100,0398
s(R_{x,i})	6,4.10 ⁻³	5,5.10 ⁻³

Componente por corrección a los valores medidos “ $\delta R_{x,m}$ ”:

Según se ha indicado, Apartados 6.3.2 y 6.3.3.1, se elimina la corrección como tal y se aplican las especificaciones del teraohmímetro como componente de incertidumbre.

En relación con la desviación al nominal obtenida durante la calibración del teraohmímetro, dado su valor relativo con respecto a las especificaciones del teraohmímetro:

$$r = U_{\text{esp}} / \Delta R_c = 1 \times 10^{-3} \times 100 / 0,2 \times 10^{-3} = 500$$

, puede ser incluida en este mismo criterio. En caso contrario, a partir de una relación próxima a 2 o inferior, y en función también de la incertidumbre de calibración, debe ser incluida como otra componente de la incertidumbre.

Con estas consideraciones se obtiene:

$$u_3 = 1 \times 10^{-3} R / k$$

y suponiendo una distribución rectangular con un $k = \sqrt{3}$, se obtiene para $R = 100 \text{ G}\Omega$:

$$u_3 = 1 \times 10^{-3} \times 10^2 / \sqrt{3} = 58 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega$$

Componente por resolución del instrumento de medida " $u(\delta R_{x,m})_{res}$:"

Según se indica en 6.1.3.2 y como se considera un instrumento de $5 \frac{1}{2}$ dígitos que aprecia 00,0001 GΩ en la escala de 100 GΩ, se tiene que

$$U_4 = \pm 0,5 \times 10^{-4} / \sqrt{3} = 0,3 \times 10^{-4} = 0,03 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega$$

Tabla 3.- Medida directa: balance de incertidumbre.

Magnitud X_i	Valor estimado X_i (GΩ)	Incertidumbre (x_i) (GΩ)	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Componente de la incertidumbre $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$ (GΩ)
$R_{x,m}$	100,0392	$u(x_1) = 1,9 \cdot 10^{-3}$	normal	$c_1 = 1,0$	$u_1(y) = 1,9 \cdot 10^{-3}$
		$u(x_2) = 13 \cdot 10^{-3}$	normal	$c_2 = 1,0$	$u_2(y) = 13 \cdot 10^{-3}$
$\delta R_{x,m}$	0	$u(x_3) = 58 \cdot 10^{-3}$	rectangular	$c_3 = 1,0$	$u_3(y) = 58 \cdot 10^{-3}$
$(\delta R_{x,m})_{res}$	0	$u(x_4) = 0,03 \cdot 10^{-3}$	rectangular	$c_4 = 1,0$	$u_4(y) = 0,03 \cdot 10^{-3}$
$R_{x,c}$	100,0392				$U_c(R_x) = 59,5 \cdot 10^{-3}$



NOTA: 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.

NOTA:

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

A.2.5.- Cálculo de la incertidumbre combinada

$$u_c(R_x) = \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2} = \\ = \sqrt{(1,9^2 + 13^2 + 58^2 + 0,03^2) \times 10^{-6}} = \sqrt{4176 \times 10^{-6}} = 59,5 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega$$

En donde puede observarse que la componente dominante es la que corresponde a las especificaciones del teraohmímetro utilizado con una distribución de probabilidad rectangular.

A.2.6.- Cálculo de la incertidumbre expandida

Se establece como:

$$U_c(R_x) = k \times u_c(R_x)$$

, para un intervalo de confianza con un nivel de confianza del 95,45%.

El valor de k para este nivel de confianza se obtiene a partir del cálculo del número de grados de libertad efectivo según el procedimiento indicado en el párrafo 6.4 del Anexo G de la Guía ISO [6]. Según este apartado y aplicando la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{\text{ef}} = [u_c(y)]^4 / \sum [u_i(y)]^4 / v_i$$

, se obtiene:

$$v_{\text{ef}}[u_c(y)] = 59,5^4 \times 10^{-12} / (1,9^4/9 + 13^4/8 + 58^4/\infty) \times 10^{-12} = 3\,509$$

Entrando con este valor en la Tabla G.2 del anexo de la guía ISO mencionada (Anexo 4) para el nivel de confianza establecido nos proporciona un valor de $k = 2$.

Luego la incertidumbre de calibración ampliada resulta ser:

$$U_c(R_x) = k \times u_c(R_x) = 2 \times 59,5 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega = 0,119 \text{ G}\Omega$$

Este resultado presupone que distribución de probabilidad resultante de la magnitud de salida es una distribución normal o de Gauss, sin embargo se debe tener en cuenta que la componente u_3 relacionada con las especificaciones del teraohmímetro es claramente dominante y su distribución es rectangular, por lo que entonces no es válida la fórmula anteriormente aplicada para calcular el número de grados efectivos de libertad. En este caso, y según se indica en la fórmula S9.8 del párrafo S9.14 del documento EA-4/02-S2 (suplemento 2 a la Guía EA-4/02) [4], el factor de cobertura para un nivel de confianza "p" viene expresado por:

$$k(p) = p \sqrt{3}$$

, luego para un nivel de confianza del 95,45 %, el valor del factor de cobertura es:

$$k = 0,9545 \sqrt{3} = 1,65$$

La incertidumbre expandida resultante es por tanto:

$$U_c(R_x) = k \times u_c(R_x) = 1,65 \times 64,6 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega = 0,107 \text{ G}\Omega$$

, que coincide prácticamente con las especificaciones del teraohmímetro para este valor:

$$1 \times 10^{-3} \text{ R} = 1 \times 10^{-3} \times 10^2 = 0,1 \text{ G}\Omega$$



A.2.7.- Expresión del resultado de calibración

El resultado de la calibración se establece como el valor absoluto de la resistencia calibrada y su incertidumbre, según los criterios establecidos en la Guía ISO [6] con respecto al redondeo y al número de cifras significativas:

$$R_{x,c} = 100,04 \text{ G}\Omega \pm 0,11 \text{ G}\Omega$$

También se puede expresar como diferencia al nominal, es decir:

$$\Delta R_{x,c} = 0,04 \text{ G}\Omega \pm 0,11 \text{ G}\Omega$$

En ambos casos se debe especificar incertidumbre expandida indicada corresponde a una incertidumbre combinada multiplicada por un factor de cobertura $k = 1,65$ correspondiente a un nivel de confianza del 95,45 % para una distribución rectangular.

ANEXO III. EJEMPLO NUMÉRICO: MÉTODO DIRECTO POR SUSTITUCIÓN

A.3.1.- Enunciado

a) Calibrar una resistencia de 10 GΩ a la tensión de ±1000 V por medida directa con un teraohmímetro referida a un patrón de referencia de igual valor nominal.

Las condiciones ambientales del laboratorio donde se realiza la calibración son:

$$T \dots\dots\dots 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$$

$$HR \dots\dots\dots 50 \% \pm 10 \%$$

A.3.2.- Instrumentación utilizada

b) Resistencia de referencia

Valor certificado:

$$R_{0,c} = 9,970090 \text{ G}\Omega \pm 0,001 \text{ G}\Omega$$

, para un factor de cobertura $k = 2,37$ y un nivel de confianza del 95,45 %.

El certificado de calibración indica también que el número de grados de libertad de la incertidumbre combinada de la que se obtiene la incertidumbre expandida indicada en el certificado es $\nu = 8$.

Deriva observada:

$$\Delta(R_0) = 2.10^{-4} \text{ G}\Omega / 12 \text{ meses}$$

, con una dispersión observada despreciable.

Coefficiente de temperatura:

$$\alpha_T(R_0) = 2.10^{-4} \text{ G}\Omega \text{ °C}^{-1}$$

Condiciones ambientales de calibración:

* Laboratorio:

$$T: 23 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ °C}$$

$$HR: 45 \% \pm 10 \%$$

* Valores medidos durante la calibración:

$$T: 22,9 \text{ °C}$$

$$HR: 4 \%$$

c) Resultado de la calibración del teraohmímetro en la escala de 10 GΩ obtenido de su certificado de calibración:

- Desviación al nominal:

$$\Delta R = 0,0002 \text{ G}\Omega$$

- Incertidumbre:

$$U_c = 1 \times 10^{-4} R$$

- Especificaciones del teraohmímetro en la escala de 10 GΩ contenidas en su Manual Técnico:

$$U_{\text{esp}} = 0,7 \times 10^{-3} R$$

A.3.3.- Toma de datos y obtención del valor certificado

d) La Tabla 4 adjunta muestra la serie de 6 medidas realizadas con el resultado obtenido como valor medio de los obtenidos para ambas polaridades. La serie se ha realizado durante tres días a razón de dos medidas por día y realizando las dos medidas de cada día con un intervalo de dos horas entre ellas.

e) El valor certificado de la resistencia a calibrar es el valor medio de la serie de seis medidas realizadas. El resultado puede ser en valor absoluto o la diferencia al nominal, es decir:

$$R_{x,c} = 9,8892 \text{ G}\Omega$$

$$\Delta R_{x,c} = 0,1108 \text{ G}\Omega$$

Anotar este valor en la columna 2 de la Tabla 5 de balance de la incertidumbre en la fila que corresponde a la magnitud medida $R_{x,m}$.

Tabla 4.- Medida directa por sustitución: toma de datos.

$R_{x,i}$ Medida Nº	Tensión de medida: $V = 1000$ voltios Polaridad: (\pm)			
	$(R_{0,m})_i$	$(R_{x,m})_i$	$(\Delta R)_i$	$(R_{x,c})_i$
1	9,96925	9,88476	0,08449	9,88560
2	9,96867	9,88871	0,07996	9,89013
3	9,96891	9,88816	0,08075	9,88934
4	9,96966	9,88965	0,08001	9,89008
5	9,96889	9,89221	0,07668	9,89341
6	9,96952	9,88604	0,08348	9,88661
$R_{x,c}$			0,080895	9,889195
$s(R_{x,c})_i$			$2,79 \times 10^{-3}$	$2,79 \times 10^{-3}$

f) Los resultados indicados en la Tabla 4 se obtienen por medida directa con un teraohmímetro promediando los valores obtenidos para la tensión de 1000 voltios y aplicando ambas polaridades. Los pasos realizados para cada medida y polaridad son:

- * Medida de $R_{0,m}$
- * Medida de $R_{x,m}$
- * Cálculo de $\Delta R = R_{x,m} - R_{0,m}$
- * Cálculo de $R_{x,c} = R_{0,c} + \Delta R$

**A.3.4.- Incertidumbre de calibración**

f) La Tabla 5 muestra el balance de diversas componentes de la incertidumbre presentes en el método directo por sustitución, junto con la obtención del valor certificado $R_{x,c}$. Se describe a continuación la obtención de los valores de las distintas componentes de la incertidumbre en ella contenidas. Cada valor obtenido, expresado en $G\Omega$, se anota en la columna y fila de la Tabla 5 que corresponde.

Los coeficientes de sensibilidad c_i dada la relación que existe entre las variables de entrada y la magnitud de salida de suma lineal sin ningún coeficiente son todos igual a la unidad con signo positivo o negativo.

Componente de repetibilidad o de Tipo A:

Viene determinada por la desviación típica del valor medio medido, luego:

$$u(R_{x,m}) = s(R_{x,m})_i / \sqrt{n}$$

En nuestro caso $s(R_{x,m})_i$ es la desviación típica de la serie de 6 medidas realizadas:

$$s(R_{x,m})_i = 2,79 \times 10^{-3} G\Omega$$

, luego:

$$u_1 = u(R_{x,m}) = 2,79 \times 10^{-3} / \sqrt{6} = 1,14 \times 10^{-3} G\Omega$$

Anotar este valor en la fila correspondiente al valor de ΔR obtenido.

Incertidumbre de la corrección obtenida “ ΔR ”:

Según se ha indicado, y dada la correlación existente entre la medida de ambas resistencias, calibrada y referencia, es nula y solo se considera la influencia de la resolución del instrumento utilizado para obtener la diferencia, considerada dos veces para una distribución rectangular. En este caso se considera que el instrumento utilizado es de 5 ½ dígitos apreciando por tanto 0,00001 $G\Omega$, luego:

$$u_2 = 2 \times 1 \times 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,0115 \times 10^{-3}$$

Tabla 5.- Medida directa por sustitución: balance de componentes de la incertidumbre

Magnitud X_i	Valor estimado X_i	Incertidumbre $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad C_i	Componente de la incertidumbre $u_i(y) = C_i \cdot u(x_i)$
ΔR	0,080895	$u(x_1) = 1,14 \times 10^{-3}$	normal	$c_1 = 1,0$	$u_1(y) = 1,14 \times 10^{-3}$
		$u(x_2) = 0,14 \times 10^{-4}$	rectangular	$c_2 = 1,0$	$u_2(y) = 0,0115 \times 10^{-3}$
$\delta(\Delta R)$	0	$u(x_3) = 0$		$c_3 = 1,0$	$u_3(y) = 0$
R_0	9,970090	$u(x_4) = 0,5 \times 10^{-3}$	normal	$c_4 = 1,0$	$u_4(y) = 0,42 \times 10^{-3}$
$\delta(R_0)$	0	$u(x_5) = 0,5 \times 10^{-3}$	rectangular	$c_5 = 1,0$	$u_5(y) = 0,58 \times 10^{-3}$
	0	$u(x_6) = 1,15 \times 10^{-3}$	rectangular	$c_6 = 1,0$	$u_6(y) = 1,15 \times 10^{-3}$
$R_{x,c}$	9,889195				$u(y) = 1,8 \times 10^{-3}$



NOTA:

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 un único valor de +1.

NOTA:

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

Incertidumbre por variación de la diferencia obtenida por variación de las resistencias por deriva y desviaciones de la temperatura ambiente “ $U(\delta\Delta R)$ ”:

Según se ha indicado, y considerando las características de ambas resistencias muy similares la estimación de la corrección y su incertidumbre se consideran nulas, es decir:

$$\delta(\Delta R) = 0$$

$$u_3 = u[\delta(\Delta R)] = 0$$

Incertidumbre de calibración de la resistencia de referencia “ $U(R_{0,c})$ ”:

$$u_4 = U(R_{0,c}) / k$$

, en nuestro caso y de la información contenido en su certificado de calibración, se obtiene:

$$u_4 = \pm 0,001 \text{ G}\Omega / 2,37 = \pm 0,00042 \text{ G}\Omega = 0,42 \cdot 10^{-3}$$

Incertidumbre por correcciones al valor certificado de la resistencia de referencia $U(\delta R_{0,c})$:

Se consideran dos parámetros de influencia:

1) Deriva a largo plazo.

Para un tiempo transcurrido de seis meses desde la última calibración, se obtiene:

$$U_D(R_{0,c}) = (2 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega / 12 \text{ meses}) \times 6 \text{ meses} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ G}\Omega$$

, y aceptando una distribución rectangular, se obtiene:

$$u_5 = 1 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega / \sqrt{3} = 0,58 \text{ G}\Omega$$

2) Desviaciones de la temperatura ambiente

Dado que la temperatura del laboratorio es igual a la que se han calibrado las resistencias aunque con distinto margen de variación, se tiene que:

$$U_T(R_{0,c}) = \alpha_T(R_{0,c}) \Delta t = (1 \cdot 10^{-3} \text{ G}\Omega / ^\circ\text{C}) \times (\pm 2 ^\circ\text{C}) = \pm 2 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega$$

y para una distribución rectangular se obtiene:

$$u_5 = U_T(R_{0,c}) / \sqrt{3} = 2 \times 10^{-3} / \sqrt{3} = 1,15 \cdot 10^{-3}$$

A.3.5.- Cálculo de la incertidumbre combinada

$$\begin{aligned} u_c(R_x) &= \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2 + [u_5(y)]^2} = \\ &= \sqrt{1,14^2 + 0,015^2 + 0,42^2 + 0,58^2 + 1,15^2} \times 10^{-6} = \sqrt{3,14} \times 10^{-6} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega \end{aligned}$$

En donde puede observarse que no existe una componente claramente dominante como ocurría en la medida directa.

**A.3.6.- Cálculo de la incertidumbre expandida**

Se establece como:

$$U_c(R_x) = k \cdot u_c(R_x)$$

, para un intervalo de confianza con un nivel de confianza del 95,45 % .

El valor de k para este nivel de confianza se obtiene a partir del cálculo del número de grados de libertad efectivo según el procedimiento indicado en el párrafo 6.4 del Anexo G de la Guía ISO [6]. Según este apartado y aplicando la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{ef} = [u_c(y)]^4 / \sum [u_i(y)]^4 / v_i$$

, se obtiene:

$$v_{ef}[u_c(y)] = 1,8^4 \times 10^{-12} / (1,14^4/5 + 0,42^4/8) \times 10^{-12} = \\ \approx 10,5 \times 5 / 1,7 = 31$$

Entrando con este valor en la Tabla E-1 del Anexo E de la Guía EA-4/02 para un nivel de confianza del 95,45 %, para el valor de grados efectivos de libertad inferior más próximo al valor obtenido, nos proporciona un valor $k = 2,13$.

La incertidumbre de calibración ampliada resulta ser:

$$U_c(R_x) = k u_c(R_x) = 2,13 \times 1,8 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega = 3,8 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega \approx 0,004 \text{ G}\Omega$$

Este resultado presupone que distribución de probabilidad resultante de la magnitud de salida es una distribución normal o de Gauss, como consecuencia se ser la composición de diversas componentes normales y rectangulares y no ser ninguna dominante

En este método se puede observar que al contrario que en el método directo, en el que la componente que predomina son las especificaciones del teraohmímetro, es la incertidumbre del patrón de referencia utilizado, junto con sus magnitudes de influencia, la que establece en gran parte la incertidumbre de calibración. En este caso prácticamente al 50 % con la derivada de la repetibilidad de las medidas.

A.3.7.- Expresión del resultado de calibración

El resultado de la calibración se establece como el valor absoluto de la resistencia calibrada y su incertidumbre:

$$R_{x,c} = 9,889 \Omega \pm 0,004 \text{ G}\Omega$$

También se puede expresar como diferencia al nominal, es decir:

$$\Delta R_{x,c} = - 0,111 \text{ G}\Omega \pm 0,004 \text{ G}\Omega$$

En ambos casos se debe especificar incertidumbre expandida indicada corresponde a una incertidumbre multiplicada por un factor de cobertura $k = 2,13$ correspondiente a un nivel de confianza del 95,45 % para una distribución normal con un número de grados de libertad efectivos $v_{ef} = 20$.



ANEXO IV. TABLA PARA OBTENCIÓN DEL FACTOR DE COBERTURA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE GRADOS DE LIBERTAD EFECTIVOS v_{ef} Y EL NIVEL DE CONFIANZA

Tabla 6.- Tabla para obtención del factor de cobertura en función del número de grados de libertad efectivos v_{ef} y el nivel de confianza p .

Grados de libertad v	p (tanto por ciento)					
	68,27	90	95	95,45	99	99,73
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

Metrología

NIPO: 113-20-002-9