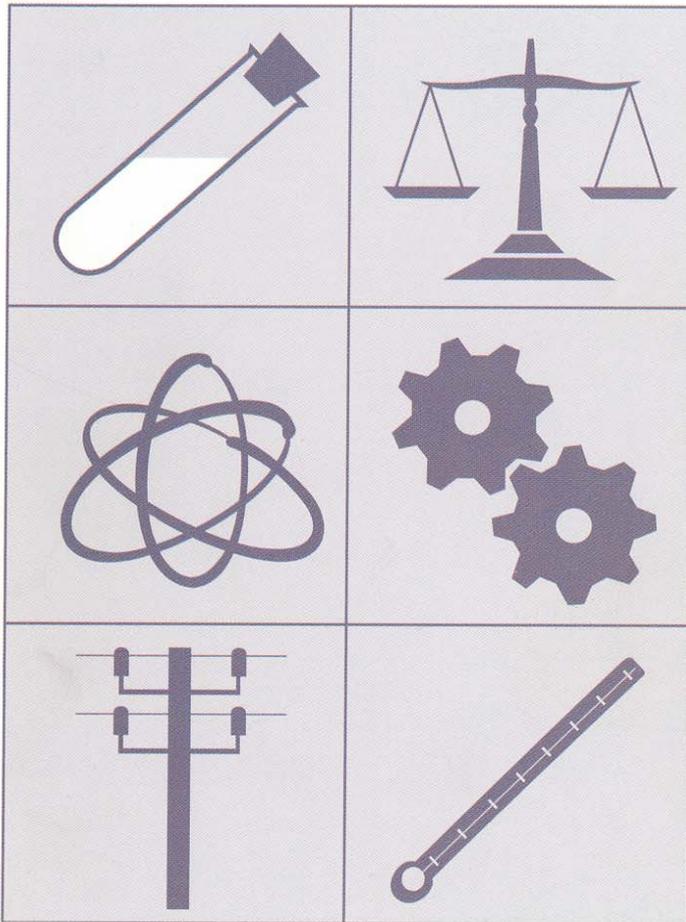


# Metrología

## PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO EL-004 PARA LA CALIBRACIÓN DE MEGÓHMETROS

m 08



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO

GEM

CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA

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

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

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

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

Correo electrónico  
[cem@cem.es](mailto:cem@cem.es)



## ÍNDICE

	Página
1. OBJETO	4
2. ALCANCE	4
3. DEFINICIONES	5
4. GENERALIDADES	8
5. DESCRIPCIÓN	9
5.1. EQUIPOS Y MATERIALES	9
5.2. OPERACIONES PREVIAS	10
5.3. PROCESO DE CALIBRACIÓN	13
5.4. TOMA Y TRATAMIENTO DE DATOS	18
6. RESULTADOS	19
6.1. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES	19
6.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	28
7. REFERENCIAS	29
7.1. DOCUMENTOS NECESARIOS PARA REALIZAR LA CALIBRACIÓN	29
7.2. OTRAS REFERENCIAS PARA CONSULTA	29
8. ANEXOS	30
8.1. EJEMPLO	30



## 1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de megóhmetros por descarga de condensador, tanto analógicos como numéricos.

Según la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica [1], este instrumento se denomina técnicamente megóhmetro de condensador, y su código de identificación es el 01.31, no obstante se empleará la denominación de megóhmetro 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 megóhmetros mediante el uso de resistencias patrón de alto valor óhmico.

Este procedimiento es aplicable a la calibración de megóhmetros con capacidad para medir resistencia entre unos cuantos  $k\Omega$  (normalmente a partir de  $100k\Omega$  y  $100T\Omega$  con tensiones de prueba comprendidas entre 100 V y 5000 V.

Este procedimiento no es aplicable a instrumentos que aún midiendo resistencia de alto valor en el rango antes mencionado, estén previstos principalmente para medidas de otras magnitudes eléctricas. En estos casos no obstante, el procedimiento sería aplicable para la calibración parcial de estos instrumentos en resistencia de aislamiento.

Este procedimiento es aplicable tanto a megóhmetros con lectura numérica como a los que la presentan analógica.



Como consecuencia de existir diferencias funcionales entre los megóhmetros a los que se podría aplicar este procedimiento, habrá que tener en cuenta estas diferencias en la redacción de las instrucciones de calibración que se elaboren tomando como guía este procedimiento.

### 3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [6] que se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

#### Ajuste (de un instrumento de medida) [6] (3.11)

Conjunto de operaciones llevadas a cabo sobre un sistema de medida que proporcionan indicaciones correspondientes a un valor dado de la magnitud objeto de medición.

#### NOTAS

- 1.- Algunos tipos de ajustes de sistemas de medida son, el ajuste del cero del sistema, el ajuste del offset, el ajuste del span (a veces llamado ajuste de la ganancia)
- 2.- El ajuste de un sistema de medida no debe confundirse con su calibración, que es un prerrequisito para el ajuste.
- 3.- Después del ajuste de un sistema de medida, éste debe ser normalmente recalibrado.

#### Calibración [6] (2.39)

Operación que, bajo condiciones especificadas, en un primer paso, establece la relación entre los valores de la magnitud con su incertidumbre de medida, proporcionada por los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con su incertidumbre de medida asociada, en un segundo paso, utiliza esta información para establecer una relación obteniendo un resultado de medida a partir de una indicación.



## NOTAS

- 1.- Una calibración puede se expresada por medio de una declaración de la función de calibración, diagrama de calibración, curva de calibración, o tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección multiplicativa o aditiva de la indicación con su incertidumbre de medida asociada.
- 2.- La calibración no debe confundirse con el ajuste de un sistema de medida, a veces por error llamado “autocalibración”, ni tampoco con la verificación.
- 3.- A menudo, únicamente la primera parte de la definición anterior.

### Resistencia patrón de alto valor óhmico:

Elemento resistivo cuyo valor óhmico es superior a 1 MΩ con nominales generalmente correspondientes a potencias enteras de diez construyéndose con valores de hasta 100 TΩ. Su exactitud es, significativamente, menor que las resistencias patrón dependiendo principalmente de su construcción, al estar afectada por las corrientes de fugas relacionadas con la humedad y limpieza superficial. Disponen en general de tres terminales para la inclusión de pantalla o guarda, de forma que se eviten las corrientes de fugas por malos aislamientos superficiales y por las conexiones externas a la propia resistencia.

### 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 siendo la media aritmética de las n mediciones consideradas:



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

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

### Error de medida [6] (2.16)

Valor de la magnitud medida menos el valor de la magnitud de referencia.

#### NOTAS

- 1.- El concepto de “error de medida” puede utilizarse:
  - a. Cuando hay un valor de referencia único al cual referirse, que ocurre si la calibración se hace por medio de patrones de medida con un valor de la magnitud medida con una incertidumbre de medida despreciable, o si el valor convencional de la magnitud viene dado, en cuyo caso el error de medida es conocido, y
  - b. si un mensurando se supone que se representa por un único valor verdadero de la magnitud o un conjunto de valores verdaderos de la magnitud de rango despreciable, en cuyo caso el error de medida no es conocido.
- 2.- El error de media no debe confundirse con el error de producción o fallo.

### Incertidumbre de medida [6] (2.26)

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de valores atribuibles a un mensurando, a partir de la información utilizada.

#### NOTAS

- 1.- La incertidumbre de la medida incluye componentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas con las correcciones y los valores de los patrones. A veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados, sino que son incorporados como componentes de la incertidumbre.



- 2.- El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica llamada incertidumbre estándar (o un múltiplo especificado de ella), o el semiintervalo, considerando una probabilidad de cobertura declarada.
- 3.- La incertidumbre de medida comprende, en general, muchas componentes. Algunas de ellas pueden ser evaluadas por evaluaciones de la incertidumbre Tipo A, a partir de distribuciones estadísticas de los valores de la magnitud considerando series de medidas que pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Otras componentes, pueden ser evaluadas por evaluaciones de la incertidumbre Tipo B, pudiendo también ser caracterizadas por desviaciones típicas, obtenidas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia o en otro tipo de información
- 4.- En general, para un conjunto de información dado, se entiende que la incertidumbre de medida está asociada con un valor de la magnitud declarado atribuible al mensurando. Una modificación de dicho valor implica una modificación de la incertidumbre asociada.

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

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

#### Trazabilidad metrológica [6] (2.42):

Propiedad del resultado de una medición tal que el resultado pueda relacionarse a una referencia a través de una cadena ininterrumpida de calibraciones, cada una de ellas contribuyendo a la incertidumbre de medida.

## 4. GENERALIDADES

El megóhmetro es un instrumento que permite medir los altos valores de las resistencias de aislamiento de instalaciones, circuitos, cables, etc.

Los más frecuentes son los megóhmetros por descarga de condensador cuyo principio de funcionamiento se basa en la carga de



un condensador y su descarga a través de la resistencia a medir, con una tensión aplicada conocida. Las tensiones suelen estar comprendidas entre 100V y 5000V, siendo las más usuales las de 500V, 1000V y 2500V. La medida del tiempo que tarda la red formada por el condensador y la resistencia objeto de medición en alcanzar el valor de la tensión de descarga prefijado, será función del valor de la resistencia de aislamiento que se desea conocer. Últimamente se han implementado variantes de este método que han mejorado sustancialmente el alcance y exactitud de estas medidas.

La mayoría de los megóhmetros, ya sean analógicos o digitales, suelen tener posibilidad de ajuste ya sea actuando sobre potenciómetros y condensadores variables, o bien a través del almacenamiento en memoria no volátil de las nuevas constantes de calibración en equipos más modernos basados en la utilización de convertidores analógico/digitales.

## 5. DESCRIPCIÓN

### 5.1. Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario disponer de un juego de resistencias patrón de alto valor, o bien una caja de décadas de resistencia de alto valor, siendo necesario en ambos casos cubrir todo el rango de funcionamiento del megóhmetro objeto de calibración, teniendo en cuenta además que la tensión máxima especificada para las resistencias de alto valor sea mayor que la tensión de prueba suministrada por el megóhmetro en cada uno de los puntos de medida elegidos.

Además el laboratorio deberá contar con un termómetro con una exactitud de al menos 0,5°C en el rango de temperatura indicado para la realización de esta calibración así como un higrómetro con



una exactitud de al menos el 5% y un cronómetro con exactitud de al menos 1 s.

## 5.2. Operaciones previas

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

- a) Se comprobará que el megóhmetro está identificado de forma permanente con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno unívoco del propietario del megóhmetro. Si no fuera así se le asignará un código de identificación que se adherirá o fijará de forma segura sobre el megóhmetro.
- b) Se estudiará el manual de operación del megóhmetro a calibrar, de forma que la persona que realice la calibración esté familiarizada con su manejo. Cuando sea posible 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.

NOTA:

Algunos megóhmetros no tienen la posibilidad de ser ajustados.

- c) Se asegurará que los fusibles internos de protección del megóhmetro tienen un correcto estado.
- d) Se verificará el estado de la batería (todos los megóhmetros de mano van equipados de una batería que les permite funcionar sin conexión a la red eléctrica), siguiendo las instrucciones del manual, y en caso necesario se procederá a su sustitución.
- e) Se fijará cuál es la tolerancia para los valores que se obtienen en la calibración del megóhmetro, pudiendo coincidir con las especificaciones del fabricante, o estar calculada en función



del uso concreto al que se destina el equipo. 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 megóhmetro.

- f) Se comprobará el estado de calibración de las resistencias patrón de alto valor a utilizar, 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.
- g) Se comprobará que el valor de la tensión de red en el laboratorio y las posibles variaciones son adecuadas para el funcionamiento del megóhmetro a calibrar. Normalmente una tensión de  $230V \pm 10\%$  es adecuada para el funcionamiento de la mayoría de la instrumentación eléctrica en Europa.
- h) Se conectarán a la red de alimentación eléctrica el megóhmetro objeto de calibración, en los casos en que éste último disponga de conexión a red, 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 30 minutos, salvo indicación contraria indicada en los manuales del equipo.
- i) La calibración se realizará manteniendo preferiblemente una temperatura ambiente comprendida entre  $20^{\circ}\text{C}$ , y  $26^{\circ}\text{C}$ , que es un margen en el que la variación de la resistencia debido al efecto de la temperatura se mantiene dentro de unos límites razonables. 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.



- j) La humedad relativa no sobrepasará en ningún caso el 70% ni bajará del 30%, dada la gran influencia de esta magnitud sobre el valor de la resistencia de alto valor.
- k) Se comprobará que el megóhmetro a calibrar (cuando disponga de conexión a red) 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) Se realizarán las pruebas iniciales descritas en el manual técnico del megóhmetro objeto de calibración, encaminadas a comprobar el estado general de funcionamiento del megóhmetro (por ejemplo: autocomprobación de encendido, comprobación de la pantalla de visualización, etc.).

***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.

Como medidas elementales de seguridad se señalan las siguientes:

- a) Utilizar cables con el nivel de aislamiento adecuado para evitar la perforación de éste (usar cables que soporten como mínimo 5000V de tensión continua).
- b) Utilizar cables con terminales que una vez introducidos en los



bornes correspondientes de la resistencia de alto valor y del megóhmetro objeto de calibración no presenten partes activas accesibles.

- c) No realizar ninguna conexión a los bornes de salida del megóhmetro si hay tensión presente en estos. Por lo tanto antes de realizar cualquier conexión eléctrica a los bornes de la resistencia de alto valor, verificar que no se encuentra presionada la tecla de medición (*MEASURE* 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 periodo transcurrido desde la última calibración. La calibración final sirve para comprobar si 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, o cuando no se haya solicitado o no sea posible su ajuste por el laboratorio.



La secuencia 3 sólo debe aplicarse cuando el estado del megóhmetro 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 megóhmetro, unos límites de tolerancia a partir de los cuales se realizará el ajuste del instrumento o se limitará el uso del megóhmetro. Podrá procederse 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.

Los ajustes se deben realizar siempre siguiendo el manual del fabricante del megóhmetro, en el orden y en los puntos indicados y por personal cualificado.

### 5.3.2. Definición de los puntos de medida

En el instrumento objeto de calibración suele encontrarse dividido el campo de medida en varias escalas de trabajo que deberán calibrarse comenzando por cualquiera de ellas, pero deberán comprobarse todas en dos o tres puntos, al menos, de cada alcance, con valores de lectura suficientemente separados; sugiriéndose por ejemplo en el 10%, 50 % y 90% del fondo de escala.

Dada la dificultad de disponer en el laboratorio de resistencias de alto valor cuyo valor nominal coincida exactamente con los puntos indicados para la calibración del instrumento se entenderá que el valor del 10% indica un punto arbitrario situado al principio de la escala, el valor real puede variar desde el 5% hasta el 20%, el del 50% un punto situado entre el 40% y el 60% y el del 90% un valor



situado entre el 80% y el 100% (hay que tener en cuenta que en instrumentos donde la selección de escalas se hace de forma automática debe evitarse el elegir puntos de comprobación cercanos al 0% y al 100% ya que puede darse el caso de que el megóhmetro mida en una escala diferente a la que realmente se desea).

### 5.3.3. Conexiones y realización de las medidas

En cada uno de los puntos de calibración definidos se realizarán cinco medidas independientes bajo condiciones de repetibilidad superado el posible régimen transitorio. Este transitorio viene determinado por la variación de la resistencia al aplicar tensiones elevadas en las resistencias patrón utilizadas debido al calentamiento consiguiente producido. Para evitar consideraciones adicionales (por ejemplo el aumento de la incertidumbre) es preferible mantener la tensión aplicada sobre la resistencia el mismo tiempo que se indicó en el certificado de calibración de ésta, para el cual se certificó su valor. En el caso de que una vez conectada la resistencia al megóhmetro no existan variaciones en la indicación será suficiente con anotar una sola lectura. Salvo en megóhmetros de elevada exactitud es muy habitual que durante la calibración no existan variaciones en la indicación de salida con lo cual se simplifica notablemente el proceso de calibración. A continuación se indica la forma de conexión, así como algunas precauciones a tener en cuenta al realizar la calibración.

Si es posible configurar el megóhmetro en varias formas de medida (cambiando la resolución o la velocidad de medida), se elegirá para la calibración la que indique el usuario, o si no fuera así, la que presente, según el manual del fabricante, mejores especificaciones (que es usualmente la más lenta y con mejor resolución). Se anotará siempre en la hoja de toma de datos las configuraciones seleccionadas en el megóhmetro a calibrar, y se indicarán igualmente en el informe de calibración.

NOTA:

Algunos megóhmetros tienen la posibilidad de realizar un ajuste de cero, conectando un cortocircuito adecuado a los bornes de medida de resistencia, y activando a continuación la función de compensación correspondiente (*ZERO*, *REL*, etc.). Para realizar este ajuste previo consultar el manual del megóhmetro objeto de calibración.

Conectar el megóhmetro a la resistencia patrón de alto valor tal y como se representa en la siguiente figura:



Se señalan a continuación algunas de las fuentes de error que aparecen cuando se realizan medidas sobre resistencias de alto valor óhmico, por lo que deberá prestarse la atención oportuna de forma que se minimicen sus efectos:

- a) Interferencias electrostáticas: este tipo de interferencia



aparece cuando un objeto cargado eléctricamente se acerca a un objeto descargado. Normalmente, el efecto del nivel de interferencia no es apreciable debido a que la carga se disipa rápidamente en elementos con baja impedancia; pero cuando se trabaja con resistencias de alto valor estas no permiten que la carga decaiga rápidamente por lo que aparece una inestabilidad en la medida. Estas lecturas erróneas pueden deberse a campos electrostáticos en continua o en alterna. Los de continua producen lecturas ruidosas y errores indetectables, y pueden ser producidos por movimientos de personas cerca de la zona de medida, circunstancia que debe evitarse. Los de alterna se producen a menudo por la presencia de líneas de potencia y campos de radiofrecuencia cercanos a la zona de medida. Tanto unos como otros pueden minimizarse con un adecuado apantallamiento de la resistencia de alto valor.

- b) Corrientes de fuga: las corrientes de fuga se generan por los caminos de alta impedancia entre los conductores por los que circulan bajas corrientes, cercanos a la fuente de tensión. Estas derivas de corriente degradan la medida de resistencia de alto valor y pueden ser reducidas utilizando cables con aislantes de buena calidad como teflón y polietileno, reduciendo en la medida de lo posible la humedad ambiental para evitar la absorción de agua por parte del material aislante y utilizando guarda. La guarda es un conductor conectado a un punto de baja impedancia, que suele presentar el megóhmetro objeto de calibración, que está esencialmente al mismo potencial que el cable que ataca la alta impedancia que presenta la resistencia.
- c) Efectos triboeléctricos: se generan por el movimiento de fricción entre un conductor y su aislamiento. Este movimiento produce electrones libres que generan un



desequilibrio de carga originando corrientes residuales. Este efecto se produce cuando el aislante y conductor transcurren solidarios, como en el caso del cable coaxial. Para evitarlo se pueden utilizar cables de bajo ruido que llevan un lubricante conductor en el apantallamiento que reduce la fricción. Siempre que sea posible se deberán evitar también las fuentes de vibración.

- d) Efectos piezoeléctricos: las corrientes generadas por este efecto se producen generalmente por esfuerzo mecánico en ciertos materiales aislantes. Por lo tanto para reducir este efecto se evitarán las deformaciones mecánicas de los cables utilizados para llevar a cabo las medidas.
- e) Efectos electroquímicos: las corrientes residuales generadas por este efecto se deben a aislantes contaminados o a la presencia de dos conductores con metales diferentes. Para eludir este efecto se deberán utilizar cables de los mismos metales, evitar la contaminación del aislante y reducir la humedad.

#### **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:

- a) Valor certificado de la resistencia patrón utilizada.
- b) Lecturas obtenidas en el megóhmetro objeto de calibración. Si existe variación en la indicación del equipo se realizarán cinco



medidas y se hallará la media y la desviación típica tal y como se indica en el apartado 3.

- c) Error asociado a la calibración en cada punto, definido como la diferencia entre la lectura del megóhmetro y el valor certificado de la resistencia de alto valor aplicada teniendo en cuenta las correcciones oportunas.

A continuación se compararán los errores obtenidos con las tolerancias asignadas al megóhmetro, teniendo en cuenta la incertidumbre obtenida en la calibración para cada punto considerado, para determinar o no la necesidad de realizar ajustes, según los criterios del apartado 5.3.1.

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 megóhmetro 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]. En primer lugar se determinará la función modelo de la magnitud de salida (que es el error del megóhmetro a calibrar en cada punto de calibración,  $e_x$ ).

$$e_x = R_x + \delta_R - (R_S + \delta_{TR} + \delta_D + \delta_V + \delta_t)$$



donde<sup>(1)</sup>:

$R_X$ : indicación del megóhmetro cuando se le conecta la resistencia patrón de alto valor.

$\delta_R$ : corrección debida a la resolución finita del megóhmetro cuando se conecta la resistencia.

$R_S$ : valor certificado de la resistencia patrón a una tensión de referencia determinada y para un tiempo de estabilización establecido en el certificado de calibración.

$\delta_{TR}$ : corrección de la resistencia patrón debido al efecto de la temperatura durante el proceso de calibración.

$\delta_D$ : corrección de la resistencia patrón debida a su deriva desde la última calibración.

$\delta_V$ : corrección de la resistencia patrón debido al efecto de tensión aplicada.

$\delta_t$ : corrección de la resistencia patrón debido al tiempo de aplicación de la tensión diferente al que se certifica el valor de la resistencia patrón.

### 6.1.1. Asignación de las componentes de incertidumbre

Las componentes de incertidumbre asociadas serán, por tanto:

- a) Incertidumbre debido a la falta de repetibilidad del megóhmetro,  $u(R_X)$ : se tomarán cinco lecturas en las mismas

---

1 NOTA: Se considera despreciable la contribución debida a la temperatura sobre el megóhmetro durante la calibración por ser realizada en condiciones ambientales muy controladas. Tampoco se considera el efecto de la humedad relativa sobre la resistencia patrón por las mismas razones.



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  $R_{X_i}$ :

$$R_x = \frac{\sum_{i=1}^n R_{X_i}}{n}$$

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

$$s_{R_x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{X_i} - R_x)^2}{n - 1}}$$

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

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

siendo en este caso  $n=5$ .

- b) 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 recubierto por un factor  $k_n$ , la componente de incertidumbre típica quedará:

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

donde  $U(R_s)$  es la incertidumbre expandida certificada. En el caso de no utilizar el valor certificado de la resistencia patrón



sino su valor nominal, habría que penalizar esta componente de incertidumbre con la diferencia entre el valor nominal y el certificado tal y como se indica en el apartado 2.4.5 del anexo F de la referencia [5].

- c) Incertidumbre asociada a la resolución del megóhmetro objeto de calibración,  $u(\delta_R)$ : una de las fuentes de incertidumbre de un dispositivo digital es la resolución del indicador. Aunque, por ejemplo, las indicaciones repetidas fueran todas idénticas, la incertidumbre de medición atribuible a la repetibilidad no sería igual a cero, puesto que para un campo dado de señales de entrada al instrumento, dentro de un intervalo conocido, se obtendría la misma indicación. Si la resolución del dispositivo indicador es  $E$ , el valor de señal de entrada que produce una indicación dada  $R_x$  puede situarse con igual probabilidad dentro del intervalo que va de  $R_x - E/2$  y  $R_x + E/2$ . La señal de entrada puede describirse entonces por medio de una distribución rectangular de rango  $E$ , lo que supone una incertidumbre típica:

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

En los megóhmetros analógicos, teniendo en cuenta que la división de escala no es de tipo uniforme, habrá que considerar esta circunstancia a la hora de evaluar la componente de incertidumbre asociada, y así si la resolución por debajo del valor medido es  $E^-$  y por encima  $E^+$ , la componente de incertidumbre será:

$$u(\delta_R) = \frac{E^+ + E^-}{4\sqrt{3}}$$



En estos últimos se podrían considerar resoluciones menores que la división de escala, dependiendo del criterio de medida que se tenga.

El valor de esta contribución se expresará en unidades homogéneas con el resto de contribuciones.

- d) Componente de incertidumbre debida a la variación de temperatura durante el proceso de calibración. 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 de las resistencias de alto valor patrón,  $\alpha$ , por lo que suponiendo una distribución uniforme la componente de incertidumbre asociada sería:

$$u(\delta_{TR}) = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} \cdot R_S$$

Pudiera darse el caso de utilizar la resistencia patrón a otra temperatura distinta para la que fue calibrada, con lo que habrá que corregir el valor certificado con el producto del coeficiente de temperatura por el incremento de temperatura con respecto a su calibración y valorar la componente asociada de incertidumbre por la variación de temperatura en el intervalo centrado en esta nueva temperatura de consigna,  $\delta_{TR}$ . Se podría tener en cuenta la componente debida a la incertidumbre del coeficiente de temperatura de la resistencia, pero es un dato difícil de evaluar y, si se conoce  $\alpha$  suficientemente bien, su valor es poco significativo en general.

- e) La debida a la deriva que sufre la resistencia de alto valor patrón a lo largo de su periodo de calibración, que es una medida de la estabilidad de la resistencia a largo plazo. Teniendo en cuenta que los certificados de calibración



certifican el valor del patrón para el momento en que se realizó la calibración, habrá que añadir una componente de deriva de su valor con el paso del tiempo desde el momento de su calibración hasta el momento de su utilización. Si se dispone de datos suficientes de anteriores calibraciones, se podrá extrapolar el valor de dicha deriva  $\delta_D \pm D$ , donde  $\delta_D$  es la parte fija que entraría aditivamente en el valor medio obtenido en la calibración a modo de corrección por deriva y  $D$  es la de no-certeza en la estimación, que se supondrá distribuida uniformemente, con lo que la componente de incertidumbre asociada tomará la forma:

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

En el caso de que no se corrija por deriva se estimará  $D$  como el valor máximo de deriva obtenido en valor absoluto. Si no se dispusiera de histórico suficiente se obtendrá de las especificaciones que nos proporciona el fabricante, o de otras fuentes de información como la proveniente de otros laboratorios.

- f) Componente de incertidumbre debida a la utilización de la resistencia patrón a una tensión diferente a la que se realizó su calibración: en el caso de utilizar la resistencia patrón a otra tensión distinta para la que fue calibrada, habrá que corregir el valor certificado con el producto del coeficiente de tensión declarado por el fabricante,  $C_V$ , por el incremento de tensión,  $\delta_V$ , y valorar la componente asociada de incertidumbre por la variación de tensión,  $\Delta V$ , en el intervalo centrado en este nuevo voltaje de consigna. Si consideramos que el conjunto posible de valores se distribuye de forma uniforme en el intervalo delimitado por la variación posible de tensión, la componente de incertidumbre quedará:

$$u(\delta_V) = \frac{C_V \cdot \Delta V}{\sqrt{3}} \cdot R_s$$



Normalmente las resistencias de alto valor tienen un coeficiente de tensión negativo, es decir, el valor óhmico de la resistencia disminuye conforme aumenta la tensión aplicada; sin embargo hay fabricantes que en su declaración del coeficiente de tensión lo hacen indicándolo de forma simétrica ( $\pm C_V$ ) por lo que para corregir habría que estimar el coeficiente de tensión que obviamente se encontrará dentro del intervalo declarado. En ese caso podríamos considerar que la corrección es nula,  $\delta_V=0$ , siendo en la componente de incertidumbre asociada:

$$u(\delta_V) = \frac{C_V \cdot \Delta V'}{\sqrt{3}} \cdot R_s$$

con  $\Delta V'$  la diferencia entre la tensión de prueba y la tensión a la que fue certificada la resistencia patrón. Como en general  $\Delta V' \gg \Delta V$  la contribución de la variación de la tensión sobre el punto de consigna se puede considerar despreciable en esta situación.

- g) Componente debida a la realización de la medida con un tiempo de estabilización diferente al declarado en el certificado de calibración de la resistencia patrón. Para valorarla se caracterizará la resistencia en función del tiempo para una tensión y temperaturas determinadas, y se estimará el incremento de resistencia,  $\Delta R_t$ , correspondiente al intervalo de tiempo diferencia entre el tiempo de realización de la medida y el tiempo al que se certificó el valor de la resistencia. Si de nuevo se supone una distribución de valores de tipo uniforme, la componente asociada será:

$$u(\delta_t) = \frac{\Delta R_t}{\sqrt{3}}$$

### 6.1.2. 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, $u_i(y)$
$R_X$	$\bar{R}_{Xi}$	$u(R_X) = \frac{S_{R_X}}{\sqrt{n}}$	Normal	$c_1 = 1$	$u_1(y) = \frac{S_{R_X}}{\sqrt{n}}$
$\delta_R$	0	$u(\delta_R) = \frac{E}{2\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_2 = 1$	$u_2(y) = \frac{E}{2\sqrt{3}}$
$R_S$	$R_S$	$u(R_S) = \frac{U(R_S)}{k_n}$	Normal	$c_3 = -1$	$u_3(y) = \frac{-U(R_S)}{k_n}$
$\delta_{TR}$	$\delta_{TR}$	$u(\delta_{TR}) = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} \cdot R_S$	Rectangular	$c_4 = -1$	$u_4(y) = \frac{-\alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} \cdot R_S$
$\delta_D$	$\delta_D$	$u(\delta_D) = \frac{D}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_5 = -1$	$u_5(y) = \frac{-D}{\sqrt{3}}$
$\delta_V$	$\delta_V$	$u(\delta_V) = \frac{C_V \cdot \Delta V}{\sqrt{3}} \cdot R_S$	Rectangular	$c_6 = -1$	$u_6(y) = \frac{-C_V \cdot \Delta V}{\sqrt{3}} \cdot R_S$
$\delta_t$	0	$u(\delta_t) = \frac{\Delta R_t}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$c_7 = -1$	$u_7(y) = \frac{-\Delta R_t}{\sqrt{3}}$
$e_x$	$e_x$				$u(e_x)$

#### NOTA 1:

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.

#### NOTA 2:

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

### 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:

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

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.

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.



## 6.2. Interpretación de resultados

Se deberán establecer en función del uso previsto para el megóhmetro, unos límites de tolerancia a partir de los cuales se realizará el ajuste del instrumento o se limitará su uso. Se procederá al ajuste cuando la desviación obtenida sea mayor que el límite de tolerancia establecido disminuido en la incertidumbre de calibración. 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 de calibración disminuido en la incertidumbre de calibración, y si es así el megóhmetro 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 12 y 24 meses, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente de las características técnicas comprobadas (por ejemplo su estabilidad), del uso que se realice del mismo, y de la 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 megóhmetro a calibrar.  
Especificaciones técnicas de las resistencias patrón utilizadas.

### 7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía.
- [2] Norma UNE-EN 10012-1. Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. Abril 2003.
- [3] Guide EA-4/02. Expression of the uncertainty of measurement in calibration. Revision 00. December 1999.
- [4] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 1. 1998.
- [5] Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO 1993. (ISBN92-67-10188-9).
- [6] JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms.
- [7] Norma UNE-EN 61557-2. Seguridad eléctrica en redes de distribución de baja tensión hasta 1000 Vca. y 1500 Vcc. Equipos para ensayo, medida o vigilancia de las medidas de protección. Parte 2: Resistencia de aislamiento. Diciembre 2007.



## 8. ANEXOS

### 8.1. Ejemplo

#### 8.1.1. Datos de partida

Se realiza la calibración de un megóhmetro en el punto de  $100\text{G}\Omega$  a una temperatura de  $23^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$  en una sala acondicionada para laboratorio de calibración en la que no se sobrepasa el límite de humedad relativa establecido del 60%. La tensión de alimentación de la red se mantiene dentro de los límites de  $230\text{V}\pm 10\%$  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, actuando sobre un potenciómetro que presenta en su parte frontal el megóhmetro objeto de calibración y utilizando un cortocircuito adecuado.

Las indicaciones obtenidas en la pantalla del megóhmetro para una tensión de prueba de 1000V y un tiempo de estabilización por medida de cinco minutos, fueron las siguientes:

Indicaciones
98,1 G $\Omega$
98,2 G $\Omega$
98,0 G $\Omega$
97,9 G $\Omega$
97,7 G $\Omega$



El certificado de calibración de la resistencia de nominal  $100\text{G}\Omega$  indica que el valor óhmico a una tensión de  $1000\text{V}$ , a una temperatura de calibración de  $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa del  $50\%\pm 5\%$  es de  $97,67\text{ G}\Omega$  con una incertidumbre expandida del  $0,75\%$  (para un factor de cobertura  $k=2$ ), teniendo en cuenta que las medidas a partir de las que se infirió este valor se llevaron a cabo tras cinco minutos después de aplicada la tensión.

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

1. Coeficiente de temperatura de la resistencia:  
 $\alpha = \pm 0,15\%/^{\circ}\text{C}$ .
2. Coeficiente de tensión de la resistencia:  
 $C_V = \pm 50 \cdot 10^{-6} \cdot R / \text{V}$

### 8.1.2. Determinación del error asociado a la calibración

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

$$e_X = R_X + \delta_R - (R_S + \delta_{TR} + \delta_D + \delta_V + \delta_t)$$

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

$R_X = 97,98\text{ G}\Omega$  (media de las cinco lecturas obtenidas).

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



$R_S = 97,67 \text{ G}\Omega$  valor certificado de la resistencia patrón a una tensión de 1000V y para un tiempo de estabilización de cinco minutos).

$\delta_{TR} = 0 \text{ G}\Omega$  (por coincidir la temperatura de calibración con la temperatura a la que fue certificada la resistencia patrón).

$\delta_D = 0,3 \text{ G}\Omega$  (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).

$\delta_V = 0 \text{ G}\Omega$  (por coincidir la tensión a la que se están efectuando las medidas con la tensión a la que fue certificada la resistencia patrón).

$\delta_t = 0 \text{ G}\Omega$  (por coincidir el tiempo de estabilización elegido en la calibración con el utilizado por el laboratorio donde se calibró la resistencia patrón de 100 G $\Omega$ ).

### 8.1.3. Asignación de las componentes de incertidumbre

Las componentes asociadas son:

- a) Incertidumbre debido a la falta de repetibilidad del megóhmetro. 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.

$$u(R_x) = \frac{S_{R_x}}{\sqrt{n}} = \frac{0,2 \text{ G}\Omega}{\sqrt{5}} = 0,09 \text{ G}\Omega$$

- b) 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 recubierto 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:

$$u(R_s) = \frac{U(R_s)}{k_n} = \frac{0,75 \cdot 10^{-2} \cdot 97,67 \text{ G}\Omega}{2} = 0,37 \text{ G}\Omega$$

- c) Incertidumbre asociada a la resolución del megóhmetro: si la resolución del dispositivo indicador es  $0,1 \text{ G}\Omega$ , el valor de señal de entrada que produce una indicación dada  $R_x$  puede situarse con igual probabilidad dentro del intervalo que va de  $R_x - 0,1 \text{ G}\Omega/2$  y  $R_x + 0,1 \text{ G}\Omega/2$ . La señal de entrada puede describirse entonces por medio de una distribución rectangular de rango  $0,1 \text{ G}\Omega$ , lo que supone una incertidumbre típica:

$$u(\delta_R) = \frac{E}{2\sqrt{3}} = \frac{0,1 \text{ G}\Omega}{2\sqrt{3}} = 0,03 \text{ G}\Omega$$

- d) Componente de incertidumbre debida a la variación de temperatura durante el proceso de calibración. La temperatura del laboratorio se monitoriza durante todo el proceso de calibración para garantizar que se encuentra dentro de los límites declarados,  $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ . De las especificaciones del fabricante conocemos el coeficiente de temperatura de las resistencias de alto valor patrón,  $\alpha = \pm 0,15\% / ^\circ\text{C}$ , por lo que bajo la suposición de uniformidad, la componente de incertidumbre asociada será:

$$u(\delta_{TR}) = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} \cdot R_s = \frac{0,15\% / ^\circ\text{C} \cdot 3^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \cdot 97,67 \text{ G}\Omega = 0,25 \text{ G}\Omega$$

- e) La debida a la deriva que sufre la resistencia de alto valor 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  $0,3 \text{ G}\Omega \pm 0,1 \text{ G}\Omega$ , con lo que la componente de incertidumbre asociada tomará la forma:



$$u(\delta_D) = \frac{0,1 \text{ G}\Omega}{\sqrt{3}} = 0,06 \text{ G}\Omega$$

NOTA:

El valor de  $0,1\text{G}\Omega$  se determina como la máxima desviación, en valores absoluto, entre la recta ajustada y los valores empleados para dicho ajuste.

- f) Componente de incertidumbre debida al coeficiente de tensión de la resistencia patrón: en este caso la tensión de calibración coincide con la que se certificó la resistencia por lo que la corrección es nula,  $\delta_V = 0 \text{ G}\Omega$ , pero sin embargo tal y como indica el fabricante del megóhmetro, la tensión aplicada en este caso es  $1000\text{V}\pm 5\%$  y además el coeficiente de tensión declarado por el fabricante de la resistencia patrón es  $C_V = \pm 50 \cdot 10^{-6} \cdot R/V$  por lo que la componente de incertidumbre quedaría:

$$u(\delta_V) = \frac{C_V \cdot \Delta V}{\sqrt{3}} \cdot R_s = \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 97,67 \text{ G}\Omega/V \cdot 50\text{V}}{\sqrt{3}} = 0,14 \text{ G}\Omega$$

- g) Componente debida a la realización de la medida con un tiempo de estabilización diferente al declarado en el certificado de calibración de la resistencia patrón. En este caso por utilizar intervalos de tiempo iguales su valor es prácticamente nulo (solo la incertidumbre en la medida de los tiempos que a efectos prácticos se considera despreciable):

$$u(\delta_t) = \frac{\Delta R_t}{\sqrt{3}} = 0 \text{ G}\Omega$$

Para asegurar que el tiempo de aplicación de la tensión a la resistencia patrón es igual al declarado en el



certificado de calibración de ésta se utilizará el cronómetro disponible por el laboratorio.

#### 8.1.4. Balance de las componentes

Magnitud, $X_i$	Estimador, $x_i$	Incertidumbre típica, $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coeficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre, $u_i(y)$
$R_X$	97,98 G $\Omega$	$u(R_X) = 0,09G\Omega$	Normal	$c_1 = 1$	$u_1(y) = 0,09G\Omega$
$\delta_R$	0	$u(\delta_R) = 0,03G\Omega$	Rectangular	$c_2 = 1$	$u_2(y) = 0,03G\Omega$
$R_S$	97,67 G $\Omega$	$u(R_S) = 0,37G\Omega$	Normal	$c_3 = -1$	$u_3(y) = -0,37G\Omega$
$\delta_{TR}$	0	$u(\delta_{TR}) = 0,25G\Omega$	Rectangular	$c_4 = -1$	$u_4(y) = -0,25G\Omega$
$\delta_D$	0,3 G $\Omega$	$u(\delta_D) = 0,06G\Omega$	Rectangular	$c_5 = -1$	$u_5(y) = -0,06G\Omega$
$\delta_V$	0	$u(\delta_V) = 0,14G\Omega$	Rectangular	$c_6 = -1$	$u_6(y) = -0,14G\Omega$
$\delta_t$	0	$u_t = 0G\Omega$	Rectangular	$c_7 = -1$	$u_7(y) = 0G\Omega$
$e_X$	0,01 G $\Omega$		Normal		$u(e_X) = 0,48G\Omega$

Debido a que al hallar la incertidumbre combinada intervienen al menos tres contribuciones de magnitudes comparables, se puede asumir que se cumplen las condiciones de aplicación del teorema central del límite, y que por tanto la incertidumbre combinada sigue una distribución normal. La fiabilidad de la incertidumbre



combinada se determina por sus grados efectivos de libertad que se calculan utilizando la fórmula de Welch-Satterthwaite:

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

que particularizando:

$$v_{\text{ef}} = \frac{(0,48\text{G}\Omega)^4}{\frac{(0,09\text{G}\Omega)^4}{5-1} + \frac{(0,03\text{G}\Omega)^4}{\infty} + \frac{(-0,37\text{G}\Omega)^4}{\infty} + \frac{(-0,25\text{G}\Omega)^4}{\infty} + \frac{(-0,06\text{G}\Omega)^4}{\infty} + \frac{(-0,14\text{G}\Omega)^4}{\infty}} = 3236$$

### 8.1.5. 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:

$$U = k \cdot u(e_x) = k \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + u_3^2(y) + u_4^2(y) + u_5^2(y) + u_6^2(y) + u_7^2(y)} = 0,96\text{G}\Omega$$

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



### 8.1.6. Expresión del resultado de calibración

El error de indicación del megóhmetro en el punto de calibración considerado de  $97,67 \text{ G}\Omega$  es el siguiente:

$$e_x = 0,01\text{G}\Omega \pm 0,96\text{G}\Omega$$

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

