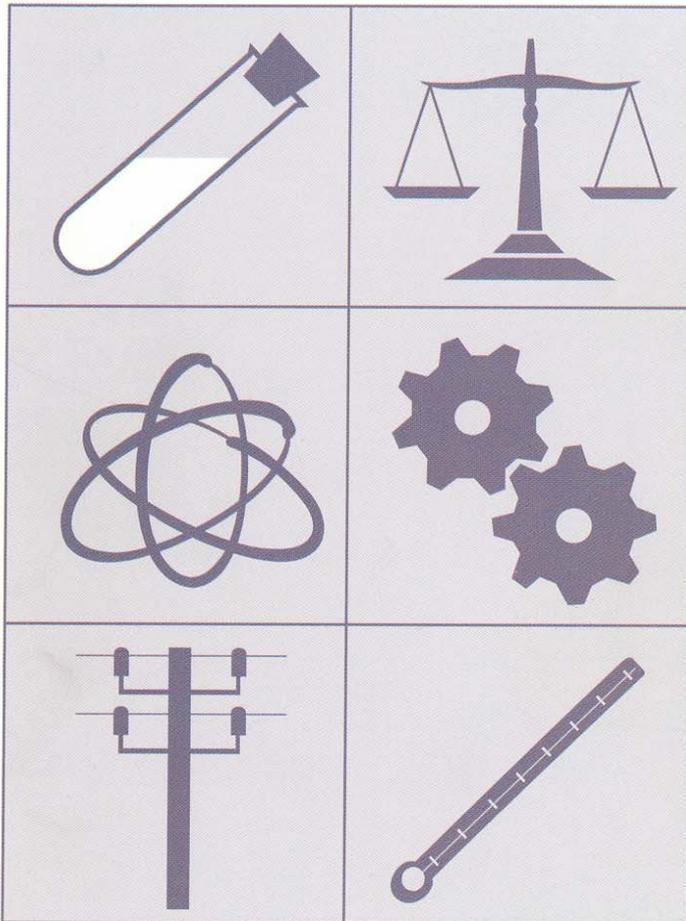


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



**PROCEDIMIENTO PARA LA
CALIBRACIÓN DE CAJAS DE
DÉCADAS DE RESISTENCIA**

m 08



**GOBIERNO
DE ESPAÑA**

**MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO**

CEM

**CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA**

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

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

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

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

Correo electrónico
cem@cem.es



ÍNDICE

	Página
1. OBJETO	4
2. ALCANCE	4
3. DEFINICIONES	4
4. GENERALIDADES	8
5. DESCRIPCIÓN.....	9
5.1. Equipos y materiales	9
5.2. Operaciones previas	10
5.3. Proceso de calibración	12
5.4. Toma y tratamiento de datos.....	17
6. RESULTADOS	18
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	18
6.2. Interpretación de resultados.....	30
7. REFERENCIAS	31
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración	31
7.2. Otras referencias para consulta	31
8. ANEXOS.....	31



1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer la técnica necesaria para realizar la calibración de cajas de décadas de resistencia mediante el uso de un multímetro digital.

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación de este procedimiento es la calibración de cajas de décadas de resistencia (instrumento clasificado con el número 01-04 en la *Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica* [2]).

Por este procedimiento se pueden calibrar cualquier tipo de cajas de décadas excepto aquellas cuya incertidumbre requerida no sea posible conseguir con el multímetro disponible en su función de medida de resistencia.

Si no se dispone de un multímetro con exactitud suficiente para calibrar la caja de décadas, ésta debe calibrarse usando puentes de resistencia. Estos métodos no se describen aquí. Una caja de décadas de muy alta precisión podría ser considerada como una resistencia patrón variable. Sin embargo, las cajas de décadas de más alta precisión casi siempre forman parte de un puente de Wheatstone o de Kelvin y su calibración está incluida en la calibración de dicho instrumento.

3. DEFINICIONES

Son de aplicación todas las definiciones generales del *Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología* [1] que se indican a continuación.

Las definiciones de los instrumentos utilizados están adaptadas de la *Clasificación de Instrumentos de Metrología Eléctrica* [2].



Caja de décadas de resistencia [2]:

Instrumento, generalmente de dos terminales, en el cual el valor resistivo seleccionado se consigue conectando en serie las resistencias internas mediante conmutadores. Las precisiones logradas con estos elementos no alcanzan los valores elevados conseguidos con las resistencias fijas pero tienen la ventaja de poder obtenerse valores óhmicos muy variados y consecutivos.

Multímetro digital [2]:

Instrumento que tiene capacidad de medida de tensión e intensidad tanto en cc como en ca junto con la medida de resistencia y con presentación digital (numérica).

Ajuste (de un instrumento de medida) [1]:

Operación destinada a llevar un instrumento de medida a un estado de funcionamiento conveniente para su utilización.

NOTA:

El ajuste puede ser automático, semiautomático o manual.

Calibración [1]:

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

NOTAS:

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



- 2 Una calibración puede servir también para determinar otras propiedades metrológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.
- 3 Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento denominado, a veces, certificado de calibración o informe de calibración.

Desviación típica experimental [1]:

Para una serie de n mediciones de un mismo mensurando, la magnitud s que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula:

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

siendo x_i el resultado de la i -ésima medición y \bar{x} la media aritmética de los n resultados considerados:

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

NOTAS:

- 1 Considerando la serie de n valores como muestra de una distribución, \bar{x} es un estimador insesgado de la media μ , y s^2 es un estimador insesgado de la varianza σ^2 de dicha distribución.
- 2 La expresión s/\sqrt{n} es una estimación de la desviación típica de la distribución de la media de \bar{x} , y se denomina desviación típica experimental de la media.
- 3 La desviación típica experimental de la media en ocasiones se denomina, incorrectamente, error de la media

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



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

NOTAS:

- 1 Dado que un valor verdadero no puede determinarse, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero.
- 2 Este concepto se aplica principalmente cuando se compara el instrumento con un patrón de referencia.
- 3 Para una medida materializada, la indicación es el valor que le ha sido asignado.

Incertidumbre de medida [1]:

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

NOTAS:

- 1 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la semiapertura de un intervalo con un nivel de confianza determinado.
- 2 La incertidumbre de medida comprende, en general, varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones típicas experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones típicas, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.
- 3 Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor del mensurando, y que todos los componentes de la incertidumbre, comprendidos los que provienen de efectos sistemáticos, tales como los componentes asociados a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.



Esta definición es la de la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” donde sus bases están expuestas con detalle (en particular ver 2.2.4 y el anexo D)

Resolución de un dispositivo visualizador [1]:

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

NOTAS:

- 1 Para un dispositivo visualizador digital, diferencia de la indicación que corresponde al cambio de una unidad en la cifra menos significativa.
- 2 Este concepto se aplica también a un dispositivo registrador.

Trazabilidad [1]:

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

NOTA:

- 1 A menudo este concepto se expresa por el adjetivo trazable
- 2 La cadena ininterrumpida de comparación se denomina cadena de trazabilidad.

4. GENERALIDADES

En este procedimiento y para mayor sencillez, aparecerán citados estos instrumentos también como cajas de décadas o, simplemente cajas, en aquellos casos en que el contexto no permita confusión respecto al instrumento al que se hace referencia.



Debido a que las cajas de décadas de resistencia no son patrones de muy alta precisión se pueden calibrar usando multímetros digitales, instrumentos que pueden alcanzar una buena exactitud y gran funcionalidad a un coste moderado.

Aunque en la *Clasificación de Instrumentos de Metrología Eléctrica* [2] se habla de instrumentos (voltímetro, amperímetro, ohmímetro, multímetro) numéricos, en este procedimiento se prefiere la denominación de instrumentos digitales, por ser la más extendida y la empleada en el *Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología* [1].

En este procedimiento siempre se emplearán las unidades del Sistema Internacional, con las dos formas de su nombre aceptadas en el Real Decreto 1317/1989, de 27 de Octubre, por el que se establecen las Unidades Legales de Medida.

Para la tensión eléctrica: voltio o volt (símbolo: V)

Para la intensidad eléctrica: amperio o ampère (símbolo: A)

Para la resistencia eléctrica: ohmio u ohm, (símbolo: Ω)

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento sólo es necesario disponer de los siguientes equipos:

- Un multímetro digital cuya incertidumbre en su función de medida de resistencia sea, para cada una de sus escalas, inferior a un tercio de la exactitud de la década más alta que sea posible medir con dicha escala. Un multímetro en esta configuración incluye una fuente de intensidad de corriente de alta estabilidad y un voltímetro que mide la caída de tensión en los terminales de la resistencia a medir.



- Cables en número apropiado para la medida a realizar, según si el medidor tiene la capacidad de medida a dos o a cuatro hilos. Los cables deberán estar provistos de las terminaciones apropiadas para su conexión, por una parte al multímetro y, por otra a la caja, ya que pueden tener tipos distintos de terminales.

5.2. Operaciones previas

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

- a) Se comprobará que la caja de décadas de resistencia está identificada de forma inequívoca con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno del propietario del equipo. Si no fuera así se le asignará un código de identificación que se adherirá o fijará de forma segura sobre el instrumento.
- b) Se estudiará el manual de instrucciones de la caja de décadas, para que el personal que realice la calibración conozca su manejo.
- c) Se dispondrá del manual de instrucciones del multímetro, y el personal que realice la calibración estará familiarizado con el manejo de dicho instrumento.
- d) Se comprobará el estado de calibración del multímetro: existencia de un certificado de calibración en vigor, y si dicho certificado garantiza la trazabilidad e incertidumbre apropiadas a las medidas necesarias para esta calibración.
- e) Se comprobará que el valor nominal de la tensión de alimentación y las posibles variaciones son adecuadas para el funcionamiento del multímetro. Normalmente una tensión de 220 voltios $\pm 15 \%$ es adecuada para el funcionamiento de la mayoría de los instrumentos de medida. En todo caso, consultar el manual de instrucciones del multímetro para asegurar los límites tolerables.



- f) Se conectará a la red de alimentación eléctrica el multímetro, 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. Consultar el tiempo necesario en el manual del multímetro.
- g) La calibración se realizará manteniendo una temperatura ambiente comprendida dentro de los márgenes más estrechos en que tanto el multímetro como la caja mantienen sus especificaciones. Generalmente este margen de temperatura es el comprendido entre 18 °C y 28 °C. Es posible realizar la calibración a temperaturas fuera de los márgenes indicados por las especificaciones, pero en este caso será necesario tener en cuenta este hecho en la asignación de incertidumbres de calibración.
- h) La humedad relativa no debe superar el 70% para no dañar a los equipos, aunque en algunos casos es posible admitir valores de hasta el 80 % (consultar para ello los manuales de los instrumentos).
- i) Se comprobará que el multímetro esté conectado a un enchufe que incluya un conductor de tierra como medida elemental de protección.
- j) Se comprobará que la corriente generada por la fuente interna del multímetro no excede de la corriente máxima soportada por cada una de las diversas décadas de la caja. En general la corriente será apropiada porque ambos tipos de instrumentos están diseñados para utilizar en condiciones similares. Si no, puede ser necesario utilizar otro rango más alto de resistencia cuya corriente sea aceptable.

ADVERTENCIA: Tanto en la caja de décadas a calibrar como en el multímetro utilizado para la calibración, pueden aparecer tensiones eléctricas peligrosas para las personas en los terminales externos o internamente, durante la realización de la calibración. Para evitar accidentes, deben ser observadas todas las precauciones de trabajo



con alta tensión, siguiendo ordenadamente las operaciones indicadas en el procedimiento. En cualquier caso, tomar como referencia las instrucciones facilitadas por el fabricante en los manuales técnicos de toda la instrumentación, para evitar riesgos al personal que realiza la calibración.

Como medidas elementales de seguridad se señalan las siguientes:

Utilizar cables con el nivel de aislamiento adecuado para evitar su perforación (usar cables que soporten como mínimo 2000 voltios a 50 Hz).

Utilizar cables con terminales o bananas que una vez introducidas en las bornas correspondientes de la caja de décadas de resistencia a calibrar o del multímetro no presenten partes activas accesibles.

5.3. Proceso de calibración

5.3.1 Definición de los puntos de medida

Se debe especificar el uso concreto para el que está destinada la caja de décadas de resistencias, para poder definir los puntos de calibración más convenientes. A veces no es necesario calibrar toda la caja sino sólo las décadas más altas o más bajas, o bien sólo un pequeño rango en el entorno de un valor fijo.

Para realizar una calibración completa de una caja de décadas sería preciso calibrar todas las décadas, preferiblemente cada una de ellas con el rango de medida del multímetro que permita alcanzar máxima resolución para el valor resultante de resistencia sin exceder la tensión o intensidad de corriente máxima que soportan las resistencias internas de la caja.

En cada década es necesario medir el valor resistivo de todas las posiciones del conmutador correspondiente, con



todos los otros conmutadores fijados a cero. Si, como es usual, cada conmutador alcanza el valor 10, normalmente indicado por una X, esta posición debe ser medida utilizando el rango del multímetro empleado para los demás valores de la década.

En las cajas en las que cada década alcanza el valor 10, es especialmente importante comparar el valor de una unidad de una década con la suma total de todas las resistencias de la década inmediatamente inferior. Para ello, los valores de la forma *0X000...* deben compararse con los de la forma *10000...*, empleando el multímetro en la misma configuración.

También es necesario realizar una prueba separada del valor mínimo de resistencia, que se alcanza cuando todos los conmutadores son situados en cero. Para esta medida deberá usarse el rango de resistencia más bajo del multímetro.

Finalmente, es necesario comprobar que cuando se sitúa la caja en un valor que incluye resistencias de varias décadas diferentes el resultado es igual a la suma de los valores medidos para cada década por separado. Para ello, tomar uno de los valores medidos en una década extrema (la más alta o la más baja) y añadir sucesivamente un valor de otra década próxima hasta obtener un valor que incluya resistencias de todas las décadas de la caja. El objetivo de esta medida es comprobar que el valor obtenido es igual a la suma de los valores de cada década. Por ejemplo, en una caja de 4 décadas donde la más alta es de 10 k Ω /paso los valores podrían ser 10000, 12000, 12300, 12370 y 12375. Se puede elegir cualquier combinación de dígitos, siempre que cada nuevo valor añada una nueva década dejando sin cambiar las que ya eran distintas de cero.

5.3.2 Conexiones y realización de las medidas.



En cada uno de los puntos de calibración definidos se realizarán cinco medidas superado el posible régimen transitorio. En el caso de que una vez conectada la caja y ajustada al valor a medir no existan variaciones en la indicación del multímetro será suficiente con anotar una sola medida, indicando este hecho en la hoja de toma de datos. A continuación se indican la forma de conexión, así como algunas precauciones a tener en cuenta al realizar la calibración.

Si es posible configurar el multímetro en varias formas de medida (cambiando la resolución o la velocidad de medida, medidas a dos o cuatro terminales, etc.), elegir para la calibración la que presente, según el manual del fabricante, mejores especificaciones y que sea compatible con las características de la caja de décadas. Anotar siempre en la hoja de toma de datos las configuraciones seleccionadas en el multímetro a calibrar, e indicarlas igualmente en el informe de calibración.

Si se va a utilizar el multímetro en otras configuraciones se comprobará el correcto funcionamiento de las mismas.

Las conexiones a realizar para la calibración del multímetro en su función de medida de resistencia dependen del tipo de caja de décadas de resistencia (en concreto de si tiene dos o cuatro terminales), y del valor de la resistencia a medir. Existen dos formas de conexión que se analizan a continuación.

a) Medidas a dos terminales

Se conectan mediante dos cables los terminales de la caja de décadas de resistencia con los dos bornes de medida de resistencia del multímetro. En este caso el valor de la resistencia medida por el multímetro digital corresponde al valor de la resistencia que presenta la

caja, más la resistencia de los dos cables de conexión, más las resistencias de contacto.

Es la forma de conexión para la calibración de cajas de décadas cuando el multímetro sólo dispone de dos terminales. No debe utilizarse cuando la caja tenga cuatro terminales.

En la figura 1 se representa simbólicamente el circuito de medida. Los dos círculos representan la fuente de intensidad de corriente y el círculo con flecha el voltímetro, ambos incluidos dentro del multímetro. La figura de una línea quebrada con flecha (resistencia variable) es la caja de décadas de resistencia.

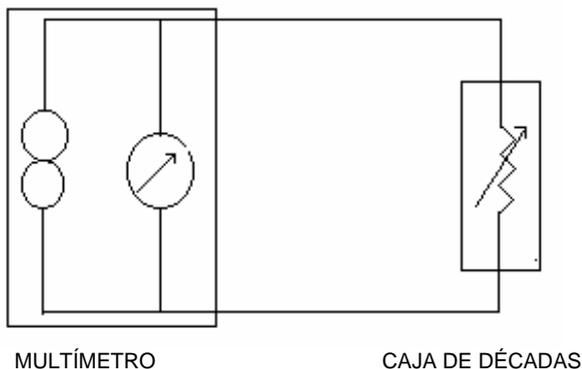


Figura 1. Medidas de resistencia a dos terminales

Para evitar los errores debidos a los cables se realizarán las medidas en dos fases:

- 1) Conectar juntos los dos cables de medida del multímetro y anotar la lectura obtenida. El valor resultante será la resistencia de los cables más la resistencia de contacto en el multímetro más la



resistencia del contacto entre los dos cables. Si el multímetro tiene una función “NULL”, “ZERO” o similar, activarla en este momento. Como siempre se van a utilizar los mismos cables no es necesario hacer esta medida más que una sola vez en cada rango utilizado de resistencia del multímetro.

- 2) Realizar la calibración en todos los puntos anotando las lecturas obtenidas. En la tabla final debe anotarse la resistencia medida directamente y el valor corregido después de restar la resistencia de los cables medida en el paso anterior. Si en el paso anterior se empleó la función “NULL” o similar, sólo será necesario anotar la lectura, pues el multímetro realiza directamente la operación. En este caso, habrá que indicar que se ha usado esta función.

b) Medidas a cuatro terminales

Se conectan mediante cuatro cables los terminales (I+, I-, V+, V-) de la caja de décadas de resistencia con los cuatro bornes de medida de resistencia del multímetro. En este caso el valor de la resistencia medida por el multímetro digital corresponde al valor de la resistencia que presenta la caja y no incluye ninguna resistencia de contacto ni de cables. Es la forma de conexión recomendada para la calibración de cualquier tipo de cajas de décadas de resistencia, siempre que se disponga de un multímetro con esta capacidad, ya que elimina la resistencia de los cables y de los contactos. Si se usa este modo de conexión no hay que medir la resistencia de los cables.

Puede ser necesario medir una caja de décadas de dos terminales con un multímetro que mida a cuatro terminales. En este caso, conectar juntos al terminal positivo de la caja los dos cables positivos del multímetro

e igualmente conectar juntos en el terminal negativo los dos cables negativos. Según el tipo de terminal que tenga la caja, puede ser necesario usar adaptadores, tales como conectores en 'T', para realizar estas conexiones.

La medida a cuatro terminales es la recomendada para la resistencia de cero de la caja de décadas, porque en este caso la resistencia de los cables será, en general, superior a la de la caja.

La figura 2 presenta el esquema del circuito de medida a cuatro terminales. Los símbolos tienen el significado descrito en la figura 1 y la fuente de intensidad de corriente y el voltímetro están incluidos dentro del multímetro, pero en este caso con terminales separados.

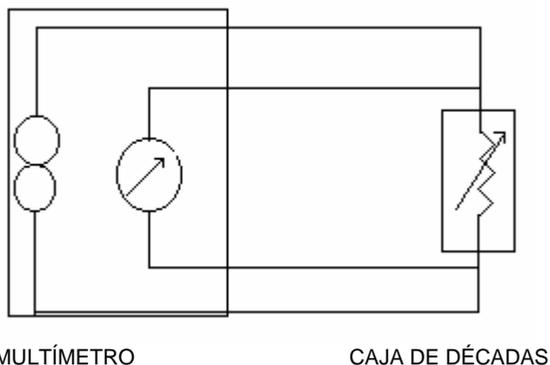


Figura 2. Medidas de resistencia a cuatro terminales.

5.4. Toma y tratamiento de datos

Se cumplimentarán tantas hojas de toma de datos como décadas de la caja se vayan a calibrar y en cada una de ellas se anotarán los siguientes datos:



- Configuración empleada del multímetro (medidas a dos o cuatro terminales, rango empleado, intensidad de corriente aplicada, uso o no de la función “ZERO”, etc.).
- Condiciones ambientales (temperatura y humedad).
- Para el caso de medidas a dos terminales, se anotará también la medida de la resistencia de los cables.

Para cada punto de calibración se anotarán los siguientes datos:

- Valor indicado por los conmutadores de la caja de décadas, que es su valor resistivo nominal en esa configuración.
- Lecturas obtenidas en el multímetro a calibrar. Si existe variación en la indicación del multímetro se realizarán cinco medidas y se anotará la media y la desviación típica. Si no, en la columna de la desviación típica se indicará la inexistencia de variación.
- Para el caso de medidas a dos terminales, se anotará el valor que se obtenga al restar al valor medido la resistencia de cables. Este será el valor final de la resistencia de la caja.
- En la columna final se anotará la corrección de la resistencia de la caja en cada punto, que es la diferencia entre la resistencia medida por el multímetro y el valor indicado por la caja de décadas, después de aplicar las correcciones necesarias.

La toma de datos se podrá realizar de forma manual o mediante un ordenador que controle al multímetro, aunque los conmutadores de la caja de décadas se accionarán manualmente. En el caso de medir automáticamente se deberá validar el programa informático utilizado antes de realizar la calibración, y se conservarán los ficheros de datos primarios que permitan reconstruir la calibración automática realizada.



6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres.

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [3] y de la guía EAL-R2 [4]. En primer lugar se determinará la expresión de la magnitud de salida (que es la corrección a aplicar a la resistencia de la caja de décadas en cada punto de calibración), en función de las distintas magnitudes de entrada. Se considera preferible considerar como magnitud de salida la corrección en vez de directamente el valor de la resistencia porque cuando se consideren valores de la caja que incluyan varias décadas, la corrección del valor combinado es igual a la suma de las correcciones correspondientes a cada uno de sus dígitos. Por ejemplo, la corrección en 32768 Ω será igual a la suma de las correcciones en 30000 Ω , 02000 Ω , 00700 Ω , 00060 Ω y 00008 Ω .

La determinación de la corrección de la resistencia ΔR_X de la caja de décadas para medidas de resistencia a dos hilos requiere que se realicen dos medidas, una primera con la señal aplicada y una segunda con los cables de medida del multímetro en cortocircuito. Si las medidas se realizan a cuatro terminales hay que suprimir la medida de cortocircuito. La corrección ΔR_X se calcula simplemente restando el valor nominal:

$$\Delta R_{iX} = \left(\bar{R}_{iX} + \delta R_{iXres} + \delta R_{iXcal} + \delta R_{iXcurva} + \delta R_{iXder} + \delta R_{iXTmul} \right) - \left(R_{nom} + \delta R_{iXTcaja} + \delta R_{iXpot} + \bar{R}_{i0} + \delta R_{i0res} + \delta R_{i0cal} + \delta R_{i0curva} + \delta R_{i0der} + \delta R_{i0T} \right)$$

donde:

ΔR_X : corrección al valor de la resistencia de la caja de décadas.

\bar{R}_{iX} : valor medio de las lecturas del multímetro cuando se mide la resistencia de la caja.



δR_{iXres} : corrección de las medidas de la resistencia de la caja de décadas debida a la resolución del multímetro.

δR_{iXcal} : corrección de las medidas de la resistencia de la caja de décadas debida a la incertidumbre de calibración del multímetro, con esperanza matemática igual a cero.

$\delta R_{iXcurva}$: corrección de las medidas de la resistencia de la caja de décadas debida a la curva de calibración del multímetro (función que se utiliza para corregir las lecturas del multímetro, obtenida a partir de los puntos de calibración). En el certificado podrá venir indicado el tipo de ajuste aplicado, junto con el valor que definen dicha curva. En general depende también del propio punto medido.

$$\delta R_{iXcurva} = f_{curva}(R_{iX})$$

NOTA: En el caso de no venir indicados se determinará esta función.

δR_{iXder} : corrección de las medidas de la resistencia de la caja de décadas debida a la deriva del multímetro con el tiempo t , con esperanza matemática cero. Se calcula a partir del historial conocido del instrumento, o en su defecto, de sus especificaciones. Dependerá del tiempo transcurrido desde la última calibración y del punto medido.

$$\delta R_{iXder} = f_{der}(t, R_{iX})$$

δR_{iXTmul} : corrección de las medidas de la resistencia de la caja de décadas debida a la influencia de la temperatura T sobre el multímetro, con esperanza matemática cero. Se calcula a partir de las especificaciones del multímetro, y dependerá de la temperatura a la que se mida y del punto medido.

$$\delta R_{iXTmul} = f_{Tmul}(T, R_{iX})$$



R_{nom} : valor nominal de la resistencia de la caja, igual a la indicación de sus conmutadores. Es un puro número y no genera incertidumbre adicional.

$\delta R_{iX Tcaja}$: corrección de los valores de resistencia de la caja de décadas debida a la influencia de la temperatura sobre la propia caja. Se calcula a partir de las especificaciones de la caja, y depende de la temperatura y del punto medido.

$$\delta R_{iX Tcaja} = f_{Tcaja}(T, R_{iX})$$

$\delta R_{iX pot}$: corrección de los valores de resistencia de la caja de décadas debida a la potencia disipada en la caja al realizar las medidas, con esperanza matemática cero. Se calcula a partir de las especificaciones de la caja, y depende de la de la corriente aplicada I y del punto medido.

$$\delta R_{iX pot} = f_{pot}(I, R_{iX})$$

\bar{R}_{i0} : valor medio de las lecturas del multímetro cuando se mide la resistencia de los cables en cortocircuito.

$\delta R_{i0 res}$: corrección de las medidas de la resistencia de la caja de décadas debida a la resolución del multímetro en el punto \bar{R}_{i0}

$\delta R_{i0 cal}$: corrección de las medidas de la resistencia de los cables debida a la incertidumbre de calibración del multímetro, con esperanza matemática igual a cero.

$\delta R_{i0 curva}$: corrección de las medidas de la resistencia de los cables debida a la curva de calibración del multímetro. Se calcula por el mismo procedimiento que $\delta R_{iX curva}$, simplemente variando los datos para aplicarlo al punto cero.



δR_{i0der} : corrección de las medidas de la resistencia de los cables debida a la deriva del multímetro. Se calcula igual que δR_{iXder} , pero para el punto cero.

δR_{i0Tmul} : corrección de las medidas de la resistencia de los cables debida a la influencia de la temperatura sobre el multímetro. Como las componentes anteriores, se calcula igual que su equivalente para la medida de la caja, R_{iXTmul} .

Las correcciones relacionadas con la medida de los cables sólo deben ser consideradas si se realiza dicha medida. Por tanto, si se mide usando el multímetro a cuatro terminales todas estas componentes no estarán presentes.

a) Asignación de las componentes de la incertidumbre.

a.1. Incertidumbre por dispersión de las medidas de la resistencia de la caja: $u(\bar{R}_{iX})$:

Si hay variación en las lecturas que se habían tomado, se calcularán la media aritmética de las cinco lecturas de R_{iX} , la desviación típica experimental, $s(R_{iX})$, y la desviación típica experimental de la media, que coincide con la incertidumbre típica de \bar{R}_{iX} .

$$u_A(\bar{R}_{iX}) = s(R_{iX})/\sqrt{5}$$

a.2 Incertidumbre debida a la resolución del multímetro en la medida de la resistencia de la caja: $u(\delta R_{iXres})$:

Se supone que todos los valores comprendidos en un intervalo de un dígito de amplitud centrado en la lectura son igualmente probables. Así, se aplica una distribución rectangular, de acuerdo a la referencia [3].

$$u(\delta R_{iXres}) = d/\sqrt{12}$$



En esta ecuación d es el valor del último dígito significativo de la lectura. Naturalmente, si en la calibración de la caja se usan varias escalas distintas de medida de resistencia del multímetro, debe aplicarse en cada punto de calibración la resolución de la escala utilizada en ese punto.

- a.3 Incertidumbre debida a la incertidumbre de calibración del multímetro cuando mide la caja : $u(\delta R_{iXcal})$:

La incertidumbre debida a este componente se calcula a partir de los datos indicados en el certificado de calibración de dicho instrumento. En dicho certificado se indicará junto con la incertidumbre expandida de calibración el nivel de confianza que se le atribuye, normalmente el 95%. En tal caso se considera una distribución normal y se divide por el factor de cobertura correspondiente $k=2$.

- a.4 Incertidumbre asociada a la curva de calibración del multímetro en las medidas de la caja : $u(\delta R_{iXcurva})$

El certificado dará, o se obtendrá por el usuario del multímetro, junto con la expresión de la curva, una expresión para su incertidumbre Δf_{curva} , que puede depender del punto concreto de medida, o un valor máximo de desviación entre la curva calculada y los puntos de calibración.

$$u(\delta R_{iXcurva}) = \Delta f_{curva}(R_{iX})$$

Si no se aplican correcciones, por no resultar operativo, habrá que incluir la corrección como parte de la incertidumbre, siguiendo el párrafo F.2.4.5. de la referencia [3].

- a.5 Incertidumbre en la medida de la caja debida a la deriva con el tiempo del multímetro: $u(\delta R_{iXder})$:



En el historial del multímetro, además de la función de corrección f_{der} , se indicará la incertidumbre Δf_{der} , que, dependerá, como la propia corrección, del tiempo y del punto medido

$$u(\delta R_{iXder}) = \Delta f_{der}(t, R_{iX})$$

Es habitual no realizar correcciones por deriva en el multímetro y considerar $u(\delta R_{iXder})$ como el valor máximo de deriva, en valor absoluto, obtenido del análisis de los distintos certificados, dividido por $\sqrt{3}$ (bajo la hipótesis de distribución rectangular).

- a.6 Incertidumbre en la medida de la caja debida a la influencia de la temperatura sobre el multímetro:
 $u(\delta R_{iXTmul})$:

Similarmente a los casos anteriores, en las especificaciones del multímetro se indicará la incertidumbre Δf_{Tmul} de la corrección por temperatura.

$$u(\delta R_{iXTmul}) = \Delta f_{Tmul}(T, R_{iX})$$

Es habitual que las especificaciones del multímetro indiquen un coeficiente de sensibilidad con la temperatura, α_T , expresado en $^{\circ}\text{C}^{-1}$, con lo que la expresión anterior (bajo la hipótesis de distribución rectangular y si no se realizan correcciones por esta causa), sería:

$$u(\delta R_{iXTmul}) = \frac{\alpha_T \cdot R_{iX} \cdot \Delta_{Tmax}}{\sqrt{3}}$$

Siendo Δ_{Tmax} la máxima diferencia de temperatura entre cualquier momento de la calibración que se está realizando y la calibración del multímetro.



- a.7 Incertidumbre en los valores de resistencia de la caja debida a la influencia de la temperatura sobre la propia caja: $u(\delta R_{iXTcaja})$:

Se calcula a partir de las especificaciones de la caja, que incluirán el término Δf_{Tcaja} , de incertidumbre de la corrección por temperatura sobre la caja, de modo similar a la influencia de la temperatura sobre el multímetro.

$$u(\delta R_{iXTcaja}) = \Delta f_{Tcaja}(t, R_{iX})$$

- a.8 Incertidumbre en los valores de resistencia de la caja debida a la potencia disipada en ella durante la medida: $u(\delta R_{iXpot})$:

Se calcula a partir de las especificaciones de la caja, que incluirán la incertidumbre $\Delta f_{ipot}(t, R_{iX})$ de la fórmula $f_{ipot}(t, R_{iX})$ de la corrección por potencia.

Es habitual que las especificaciones de la caja indiquen un coeficiente de sensibilidad con la potencia α_P , expresado en mW^{-1} , con lo que la expresión de $u(\delta R_{iXpot})$, (bajo la hipótesis de distribución rectangular y si no se realizan correcciones por esta causa), sería:

$$u(\delta R_{iXpot}) = \frac{\alpha_P R_{iX} \Delta P}{\sqrt{3}}$$

Siendo ΔP la potencia disipada en la caja en la calibración (bajo la hipótesis de distribución rectangular y si no se realizan correcciones por esta causa).

- a.9 Incertidumbre por dispersión de las medidas de los cables: $u_A(\bar{R}_{i0})$:

Igual que para \bar{R}_{iX} , se calcularán la media aritmética de los valores de R_{i0} , la desviación típica experimental,



$s(\bar{R}_{i0})$, y la desviación típica experimental de la media, que es la incertidumbre típica de \bar{R}_{i0} .

$$u_A(\bar{R}_{i0}) = s(R_{i0})/\sqrt{5}.$$

- a.10 Incertidumbre debida a la resolución del multímetro en la medida de la resistencia de los cables: $u(R_{i0res})$:
Se calcula igual que $u(R_{iXres})$.

$$u(\delta R_{i0res}) = d/\sqrt{12}.$$

- a.11 Incertidumbre debida a la incertidumbre de calibración del multímetro cuando mide los cables: $u(\delta R_{i0cal})$:

Se calcula igual que la incertidumbre $u(\delta R_{iXcal})$, simplemente aplicando los datos del certificado de calibración para el punto R_{i0} .

- a.12 Incertidumbre asociada a la curva de calibración del multímetro en las medidas de los cables : $u(\delta R_{i0curva})$

La incertidumbre se calcula siguiendo el mismo procedimiento que para el cálculo de $u(\delta R_{iXcurva})$, pero aplicando los datos para el punto R_{i0} .

$$u(\delta R_{iXcurva}) = \Delta f_{curva}(R_{i0})$$

- a.13 Incertidumbre en la medida de la caja debida a la deriva con el tiempo del multímetro: $u(\delta R_{i0der})$:

Se calcula igual que $u(\delta R_{iXder})$, a partir del historial del multímetro.

$$u(\delta R_{iXder}) = \Delta f_{der}(t, R_{i0})$$

- a.14 Incertidumbre en la medida de la caja debida a la influencia de la temperatura sobre el multímetro: $u(\delta R_{i0Tmul})$:



Se calcula igual que $u(\delta R_{iXTmul})$, particularizando para el punto R_{i0} .

$$u(\delta R_{iXTmul}) = \Delta f_{Tmul}(T, R_{i0})$$

NOTAS:

1. Es posible que existan otras contribuciones no consideradas aquí, debidas a la influencia de la humedad, la presión, interferencias electromagnéticas o cualquier otra variable. En tal caso se tratarían de manera similar a las mencionadas en este procedimiento.
2. Frecuentemente, varias de las componentes asociadas a un instrumento aparecen conjuntamente en sus especificaciones, y no desglosadas como se han presentado aquí.
3. Si existe algún estudio de comportamiento del multímetro o de la caja, los datos proporcionados por este estudio serán preferibles a las especificaciones del fabricante, ya que éstas suelen indicar un comportamiento genérico de los instrumentos del mismo modelo mientras que el estudio se refiere al equipo concreto que se va a utilizar.

b) Cálculo de la incertidumbre combinada y expandida.

b.1. Cálculo de la incertidumbre combinada.

Se calculará la incertidumbre combinada, a partir de la ley de propagación de las incertidumbres, como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todas las componentes aplicables (considerando éstas como independientes entre sí):

$$u^2(\Delta R_X) = u_A^2(\bar{R}_{iX}) + u^2(\delta R_{iXres}) + u^2(\delta R_{iXcal}) + u^2(\delta R_{iXcurva}) + u^2(\delta R_{iXder}) + u^2(\delta R_{iXTmul}) + u^2(\delta R_{iXTcajd}) + u^2(\delta R_{iXpol}) + u_A^2(\bar{R}_{i0}) + u^2(\delta R_{i0res}) + u^2(\delta R_{i0cal}) + u^2(\delta R_{i0curva}) + u^2(\delta R_{i0der}) + u^2(\delta R_{i0Tmul})$$

$$u(\Delta R_X) = \sqrt{u^2(\Delta R_X)}$$

Presentamos en forma de tabla el resumen de todo el análisis de incertidumbres:

Tabla I

Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre típica (Ω) $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad C_i	Contribuc. incert. (Ω)(1)
R_{iX}	$\Sigma R_{iX}/5$	$s(R_{iX})/\sqrt{5}$	1	$u_1(\Delta R_{iX})$
δR_{iXres}	0	$d/\sqrt{12}$	1	$U_2(\Delta R_{iX})$
δR_{iXcal}	0	$u(\delta R_{iXcal})$	1	$U_3(\Delta R_{iX})$
$\delta R_{iXcurva}$	$f_{curva}(R_{iX})$	$\Delta f_{curva}(R_{iX})$	1	$U_4(\Delta R_{iX})$
δR_{iXder}	$f_{der}(t, R_{iX})$	$\Delta f_{der}(t, R_{iX})$	1	$u_5(\Delta R_{iX})$
δR_{iXTmul}	$f_{Tmul}(T, R_{iX})$	$\Delta f_{Tmul}(T, R_{iX})$	1	$u_6(\Delta R_{iX})$
R_{norm}	R_{norm}	0	-1	0
$\delta R_{iXTcaja}$	$f_{Tcaja}(T, R_{iX})$	$\Delta f_{Tcaja}(T, R_{iX})$	-1	$u_7(\Delta R_{iX})$
δR_{iXpot}	$f_{pot}(l, R_{iX})$	$\Delta f_{Xpot}(l, R_{iX})$	-1	$u_8(\Delta R_{iX})$
R_{i0}	$\Sigma R_{i0}/5$	$s(R_{i0})/\sqrt{5}$	-1	$u_9(\Delta R_{iX})$
δR_{i0res}	0	$d/\sqrt{12}$	-1	$u_{10}(\Delta R_{iX})$
δR_{i0cal}	0	$u(\delta R_{i0cal})$	-1	$u_{11}(\Delta R_{iX})$
$\delta R_{i0curva}$	$f_{curva}(R_{i0})$	$\Delta f_{curva}(R_{i0})$	-1	$u_{12}(\Delta R_{iX})$
δR_{i0der}	$f_{der}(t, R_{i0})$	$\Delta f_{der}(t, R_{i0})$	-1	$u_{13}(\Delta R_{iX})$
δR_{i0Tmul}	$f_{Tmul}(T, R_{i0})$	$\Delta f_{Tmul}(T, R_{i0})$	-1	$u_{14}(\Delta R_{iX})$
ΔR_{iX}				$u(\Delta R_{iX}) = \sqrt{\sum u_i^2(\Delta R_{iX})}$

NOTA: (1) $u_i(\Delta R_{iX}) = C_i \cdot u(x_i)$



b.2. Cálculo de la incertidumbre expandida.

Deben calcularse los grados de libertad efectivos del proceso de medida usando para ello la fórmula de Welch-Satterthwaite (ver [4], anexo E y [3] Anexo G.4):

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

En esta fórmula u es la incertidumbre combinada y u_i las distintas contribuciones individuales a la incertidumbre.

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

NOTA: Como la fórmula de Welch-Satterthwaite es muy complicada de manejar y con frecuencia no se dispone de los datos de grados de libertad de algunos componentes, muchas veces no es posible ni práctico calcular los grados efectivos de libertad. En este caso, si todos los componentes son del mismo orden de magnitud o si dominan los componentes de tipo B, se puede suponer que v_{eff} es muy alto y entonces $k=2$. Si, por el contrario, es dominante la incertidumbre de tipo A debida a las medidas podemos suponer que v_{eff} es igual a 4 (grados de libertad de este componente) y entonces $k=2,87$.

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

$$U(\Delta R_{iX}) = ku(\Delta R_{iX})$$

NOTA: En el caso de que no se hayan realizado correcciones a las indicaciones del multímetro en función del certificado de



calibración, la incertidumbre final debiera estimarse, según se indica en el apartado F.2.4.5 de la referencia [3], como $U(\langle R_{ix} \rangle) = k u(\langle R_{ix} \rangle + b_{\max})$, siendo b_{\max} el valor máximo de la corrección no realizada.

6.2. Interpretación de resultados

Se deberán establecer, en función del uso previsto para la caja de décadas de resistencia, unos límites de tolerancia de calibración, a partir de los cuales se considerará adecuada o no para su uso. En función de los límites de tolerancia y de las correcciones e incertidumbres obtenidos pueden distinguirse los siguientes casos:

- a) La suma de los valores absolutos de la corrección e incertidumbre es inferior al límite de tolerancia para la calibración. La caja de décadas puede destinarse libremente a su uso previsto sin necesidad de aplicar las correcciones.
- b) La incertidumbre es inferior a la tolerancia pero la suma de los valores absolutos de la corrección e incertidumbre es superior. En este caso, será necesaria la aplicación de las correcciones para que la caja se pueda emplear en su uso previsto. Si la aplicación de correcciones resulta inconveniente, por la complicación adicional, entonces la caja de décadas debe retirarse o destinarse a otro uso que admita mayor tolerancia en la resistencia de la caja.
- c) La incertidumbre es superior a la tolerancia para el uso previsto. La caja debe retirarse del servicio o destinarse a una aplicación menos exigente.

Un período razonable para la recalibración de estos instrumentos será entre 6 y 12 meses, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente del uso que se realice de la caja, y de la variación que se observe con el paso del tiempo. El usuario del equipo será siempre el responsable de asignar el período de recalibración, y de revisarlo cuando sea preciso, considerando, por ejemplo, los



resultados obtenidos con respecto a las calibraciones anteriores y a las tolerancias consideradas.

7. REFERENCIAS

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

Manual de instrucciones de la caja de décadas de resistencia a calibrar.

Manual de funcionamiento del multímetro digital empleado.

7.2. Otras referencias para consulta.

- [1] Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología (VIM)-CEM. Segunda edición en español. 2000. NIPO: 165-00-003-5
- [2] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía.
- [3] Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Versión Española. Centro Español de Metrología. 2ª Edición. 2000. NIPO: 165-00-004-0.
- [4] El Sistema Internacional de Unidades. Segunda edición en español. 2008. NIPO: 706-07-001-1.
- [5] EA-4/02 (rev.00) Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (including supplement 1 to EA-4/02). Dic 1999.
- [6] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 1. 1998.

8. ANEXOS

Anexo I: Ejemplo de Calibración.



ANEXO I EJEMPLO DE CALIBRACIÓN

Se desea calibrar una caja de décadas de resistencia que tiene cinco décadas. En la década más significativa (la de mayores valores) el valor óhmico es de 10 k Ω por escalón. Debido al uso previsto de la caja, sólo es necesario calibrar las tres primeras décadas y medir la resistencia mínima (resistencia de cero) de la caja.

Las especificaciones de la caja de décadas de resistencia se indican en la tabla II:

Tabla II

Res Total Década (Ω)	Res/Paso (Ω)	Precisión Inicial (%)	Precisión a Largo Plazo (%)	Coef. Temp. (ppm/ $^{\circ}$ C)	Coef. Potencia (ppm/mW /paso)	Potencia Máxima (mW/Paso)	Corriente Máxima (mA)	Tensión de Pico (V/paso)
100k	10k	0,01	0,02	± 5	$\pm 0,15$	1000	32	1500
10k	1k	0,01	0,02	± 5	$\pm 0,15$	1000	100	1500
1k	100	0,012	0,025	± 15	$\pm 0,45$	1000	320	1500
100	10	0,03	0,07	± 20	$\pm 0,6$	1000	1000	1500
10	1	0,2	0,5	± 60	± 3	500	2200	1500
1	0,1	2	5	± 400	± 60	160	4000	1500

En la tabla III se muestran los puntos a medir para la calibración completa de la primera década de la caja:

Tabla III

Valor leído (Ω)	Valor equivalente (Ω)
10000.0	10000.0
20000.0	20000.0
30000.0	30000.0
40000.0	40000.0
50000.0	50000.0
60000.0	60000.0
70000.0	70000.0
80000.0	80000.0
90000.0	90000.0
X0000.0	100000.0



En las tablas IV y V, análogamente, se presentan los puntos a medir para la calibración completa de las décadas segunda y tercera.

Tabla IV

Valor leído (Ω)	Valor equivalente (Ω)
01000.0	1000.0
02000.0	2000.0
03000.0	3000.0
04000.0	4000.0
05000.0	5000.0
06000.0	6000.0
07000.0	7000.0
08000.0	8000.0
09000.0	9000.0
0X000.0	10000.0

Tabla V

Valor leído (Ω)	Valor equivalente (Ω)
00100.0	100.0
00200.0	200.0
00300.0	300.0
00400.0	400.0
00500.0	500.0
00600.0	600.0
00700.0	700.0
00800.0	800.0
00900.0	900.0
00X00.0	1000.0

Además de los puntos indicados hay que medir la resistencia mínima de la caja, es decir la resistencia cuando los conmutadores están en la posición "00000.0".

Para completar el ejemplo, se muestra el cálculo de la resistencia y de la incertidumbre de calibración para un punto concreto de la caja de décadas.



La indicación de los conmutadores es 30000.0, una resistencia nominal de 30 k Ω .

Se han tomado 5 lecturas de la resistencia (R_{iX}) y otras 5 de los cables en cortocircuito (R_{i0}), cuyos resultados son:

Lectura (Ω)	R_{iX}	R_{i0}
1	30001,5	00000,5
2	30000,2	00000,5
3	30000,8	00000,5
4	30001,4	00000,5
5	30000,9	00000,7

De estos datos se pueden obtener R_{iX} , $u(R_{iX})$ y $u(R_{i0})$. Para ello se calculan la media y la desviación típica de la media de R_{iX} y de R_{i0} . Entonces:

$$R_X = \bar{R}_{iX} - \bar{R}_{i0} = 30000,97 - 0,54 = 30000,43 \Omega$$

$$u_A(\bar{R}_{iX}) = \frac{s(R_{iX})}{\sqrt{5}} = 0,27 \Omega$$

$$u_A(\bar{R}_{i0}) = \frac{s(R_{i0})}{\sqrt{5}} = 0,04 \Omega$$

El multímetro tiene en la escala de 100 k Ω una resolución de 0,1 Ω , que da lugar, tanto en la medida de la resistencia de la caja como en la de los cables, a una incertidumbre:

$$u(\delta R_{iXres}) = u(\delta R_{i0res}) = \frac{0,1 \Omega}{\sqrt{12}} = 0,029 \Omega$$

Por otra parte, el certificado de calibración del multímetro asigna al rango de 100 k Ω una incertidumbre de 0,5 Ω con un intervalo de confianza del 95%. Esto significa un factor de cobertura $k=2$ y, por lo tanto, la incertidumbre típica de calibración será:

$$u(\delta R_{iXcal}) = u(\delta R_{i0cal}) = \frac{0,5 \Omega}{2} = 0,25 \Omega$$



Según el mismo certificado de calibración, su curva de calibración asociada es lineal, de la forma:

$$f_{curva} = GR_{leido} + C$$

donde G y C son, respectivamente, las correcciones de ganancia y de cero del multímetro, y valen:

$$G = (3 \pm 2) \times 10^{-6}$$

$$C = (0,3 \pm 0,1) \Omega$$

NOTA: Los valores de incertidumbre se consideran como incertidumbres típicas.

De acuerdo con esto las correcciones $\delta R_{iXcurva}$ y $\delta R_{i0curva}$ serán:

$$\delta R_{iXcurva} = 3 \times 10^{-6} \times 30000 \Omega + 0,3 \Omega = 0,39 \Omega$$

$$\delta R_{i0curva} = 3 \times 10^{-6} \times 0 \Omega + 0,3 \Omega = 0,3 \Omega$$

y sus incertidumbres asociadas:

$$u(\delta R_{iXcurva}) = 2 \times 10^{-6} \times 30000 \Omega + 0,1 \Omega = 0,16 \Omega$$

$$u(\delta R_{i0curva}) = 2 \times 10^{-6} \times 0 \Omega + 0,1 \Omega = 0,1 \Omega$$

El historial del multímetro muestra una tendencia de deriva con el tiempo de $-(5 \times 10^{-6} \times \text{lectura} + 0,3 \Omega) \times t/\text{año}$ con una incertidumbre típica de $(3 \times 10^{-6} \times \text{lectura} + 0,2 \Omega) \times t/\text{año}$. Han transcurrido seis meses (medio año) desde la última calibración del multímetro.

Es decir, que las correcciones δR_{iXder} y δR_{i0der} serán:

$$\delta R_{iXder} = (-5 \times 10^{-6} \times 30000 \Omega - 0,3 \Omega) \times 0,5 = -0,225 \Omega$$

$$\delta R_{i0der} = (-5 \times 10^{-6} \times 0 \Omega - 0,3 \Omega) \times 0,5 = -0,15 \Omega$$



y sus incertidumbres respectivas:

$$u(\delta R_{iXder}) = (3 \times 10^{-6} \times 30000 \Omega + 0,2 \Omega) \times 0,5 = 0,145 \Omega$$

$$u(\delta R_{i0der}) = (3 \times 10^{-6} \times 0 \Omega + 0,2 \Omega) \times 0,5 = 0,1 \Omega$$

Las especificaciones del multímetro indican un coeficiente de temperatura igual a cero, con una incertidumbre típica de $\pm(3 \times 10^{-6} \times \text{lectura} + 0,1 \Omega) \times (T - T_{cal})$ (siendo T_{cal} la temperatura de referencia de la calibración del multímetro, $T_{cal}=23$), donde T viene expresado en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Las medidas se han realizado a una temperatura entre $22,7^{\circ}\text{C}$ y $23,3^{\circ}\text{C}$.

Así, las correcciones δR_{iXTmul} y δR_{i0Tmul} serán nulas:

$$\delta R_{iXTmul} = \delta R_{i0Tmul} = 0$$

y sus incertidumbres respectivas:

$$u(\delta R_{iXTmul}) = (3 \times 10^{-6} \times 30000 \Omega + 0,1 \Omega) \times 0,3 = 0,057 \Omega$$

$$u(\delta R_{i0Tmul}) = (3 \times 10^{-6} \times 0 \Omega + 0,1 \Omega) \times 0,3 = 0,03 \Omega$$

Las especificaciones de la caja indican un coeficiente de temperatura igual a cero, con una incertidumbre típica de $\pm 5 \times 10^{-6} \times \Delta T$, donde ΔT (variación de temperatura durante la calibración) viene expresado en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Las medidas se han realizado a una temperatura entre $22,7^{\circ}\text{C}$ a $23,3^{\circ}\text{C}$.

Por tanto, la corrección $\delta R_{iXTcaja}$ será:

$$\delta R_{iXTcaja} = 0$$

y su incertidumbre:

$$u(\delta R_{iXTcaja}) = (5 \times 10^{-6} \times 30000 \Omega) \times 0,3 = 0,045 \Omega$$

Las especificaciones de la caja indican un coeficiente de potencia para esta década igual a cero, con una incertidumbre típica de $\pm 0,15 \times 10^{-6}$



$^6 \times P/\text{paso}$, donde P viene expresado en milivatios. Esto significa que si se aplica una potencia de 1mW a uno de los elementos resistivos de la década, ese elemento variará en términos relativos $0,15 \times 10^{-6}$ de su valor nominal. Las medidas se han realizado con una corriente de 0,1 mA, lo que significa una potencia de 0,1 mW en cada elemento (paso) de los 3 que constituyen la resistencia medida en este punto. Para ponernos en el caso peor, suponemos que todas las posibles variaciones a los tres elementos irían en el mismo sentido, es decir que la variación total de la resistencia de 30000 Ω sería igual a tres veces la variación de un elemento de 10000 Ω .

Por tanto, la corrección δR_{iXpot} será:

$$\delta R_{iXpo} \neq 0$$

y su incertidumbre:

$$u(\delta R_{iXpot}) = 3 \times (0,15 \times 10^{-6} \times 10000 \Omega) \times 0,1 = 0,00045 \Omega$$

De acuerdo al apartado 6.1 la incertidumbre combinada se calculará según la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} u^2(\Delta R_X) &= u_A^2(\bar{R}_{iX}) + u^2(\delta R_{iXres}) + u^2(\delta R_{iXcal}) + u^2(\delta R_{iXcurva}) + u^2(\delta R_{iXder}) + u^2(\delta R_{iXTmul}) + \\ &u^2(\delta R_{iXTcaja}) + u^2(\delta R_{iXpot}) + u_A^2(R_{i0}) + u^2(\delta R_{i0res}) + u^2(\delta R_{i0cal}) + u^2(\delta R_{i0curva}) + \\ &u^2(\delta R_{i0der}) + u^2(\delta R_{i0Tmul}) \\ u(\Delta R_X) &= \sqrt{u^2(\Delta R_X)} \end{aligned}$$

Presentamos en forma de tabla el resumen de todo el análisis de incertidumbres.

Tabla VI

Magnitud	Esperanza matemática(Ω)	Incertidumbre típica (Ω)	Coefficiente sensibilidad c_i	Contribuc incert. (Ω) $u_i(<R_{iX})$
R_{iX}	30000,97	0,27	1	0,27
δR_{iXres}	0	0,029	1	0,029
δR_{iXcal}	0	0,25	1	0,25
$\delta R_{iXcurva}$	0,39	0,16	1	0,16
δR_{iXder}	-0,225	0,145	1	0,145
δR_{iXTmul}	0	0,057	1	0,057
R_{nom}	30000	0	-1	0
$\delta R_{iXTcaja}$	0	0,045	-1	0,045
δR_{iXpot}	0	0,00045	-1	0,00045
R_{i0}	0,54	0,04	-1	-0,04
δR_{i0res}	0	0,029	-1	-0,029
δR_{i0cal}	0	0,25	-1	-0,25
$\delta R_{i0curva}$	0,3	0,1	-1	-0,1
δR_{i0der}	-0,15	0,1	-1	-0,1
δR_{i0Tmul}	0	0,03	-1	-0,03
ΔR_{iX}	0,445			0,53



El número de grados efectivos de libertad será:

$$v_{\text{eff}} = \frac{0,53^4}{\frac{0,27^4}{4} + \frac{0,04^4}{4}} = 60$$

Por lo que tomamos $k \cong 2$

La incertidumbre expandida será:

$$U(\Delta R_{ix}) = ku(\Delta R_{ix}) = 1,06 \Omega$$

Y el resultado final de la calibración para este punto; considerando los criterios de expresión del resultado de la referencia [4] sería:

$$\Delta R_{ix}(30000) = (0,45 \pm 1,11) \Omega \quad (k=2)$$

Este proceso se debe repetir para cada punto de interés.

