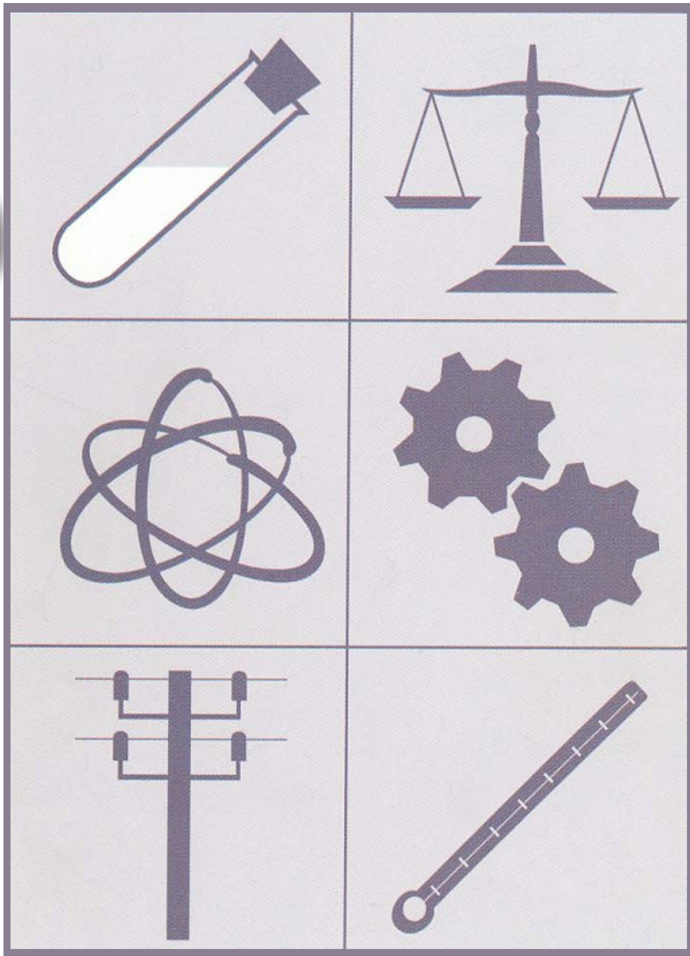
Metrología

Procedimiento de Calibración



PROCEDIMIENTO EL-015 PARA LA CALIBRACIÓN DE RESISTENCIAS PATRÓN EN C. C. MEDIANTE UN SISTEMA DE MEDIDA POTENCIOMÉTRICO

m̃ 12

GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO

CEM
CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA

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

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

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

Correo postal:

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

Correo electrónico:

cem@cem.es

ÍNDICE

Página

1. OBJETO 4

2. ALCANCE 4

3. DEFINICIONES 4

4. GENERALIDADES 9

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales 15
5.2. Operaciones previas 16
5.3. Proceso de calibración 18
5.4. Toma y tratamiento de datos 20

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres 21
6.2. Interpretación de resultados 28

7. REFERENCIAS 29

8. ANEXO 29

1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto la calibración de resistencias patrón en corriente continua a través de un sistema de medida potenciométrico. La calibración de una resistencia patrón consiste en certificar su valor a una temperatura y presión previamente fijadas.

2. ALCANCE

Este procedimiento es de aplicación a las resistencias patrón, y para llevarlo a cabo es necesario disponer de una o varias fuentes de intensidad de corriente continua, capaces de dar el valor apropiado según el valor nominal de la resistencia patrón objeto de la calibración, y de un voltímetro digital.

3. DEFINICIONES

Calibración [2] (2.39)

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

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

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

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

Fuente de intensidad de corriente continua [1] (06.02)

Es un instrumento diseñado como un generador de intensidad constante y proporciona intensidades de corriente continua sobre un margen determinado con precisión elevada. Sus características se obtienen a partir de la tensión de referencia desarrollada en un diodo Zener, junto con un amplificador de error de muy alta ganancia y de alta estabilidad junto con un conjunto de resistencias especialmente diseñadas para intensidades de corriente elevadas.

Estas fuentes, además de su utilización como de corriente propiamente dicha, en aplicaciones de tipo industrial como caracterización de semiconductores o comprobación de sistemas automáticos de prueba de equipos, son especialmente útiles para calibrar amperímetros de todo tipo, así como para la calibración shunts y shunts de corriente alterna por transferencia CA/CC, en esta aplicación no es tan importante la precisión de la intensidad generada como la estabilidad de la intensidad de corriente generada durante el tiempo de realización del proceso de transferencia.

Otra característica a considerar en una fuente de intensidad de corriente de este tipo, y que determina básicamente su aplicación, alimentación de corriente o calibración, es su resolución o valor mínimo que puede ser diferenciado en su salida. Dependiendo de su aplicación, los márgenes de corriente cubiertos son muy amplios, pudiendo llegar a límites inferiores a 1 nA con resoluciones próximas a 100 fA, e incluso alcanzar valores próximos a 0,01 pA (fuente de pico amperio). El límite superior depende de la aplicación de la fuente pudiéndose alcanzar valores tan elevados como se desee, para aplicaciones de instrumentación se puede decir que este límite se encuentra alrededor de 100 A.

La capacidad de la fuente viene determinada por la potencia suministrada, que en esencia determina la máxima tensión de salida que puede suministrar (*compliance voltage*) y por tanto la máxima carga que puede ser conectada a sus terminales de salida, siendo esta una de las características más importantes de una fuente de intensidad.

Las características a tener en el proceso de selección de una fuente de intensidad de corriente son, fundamentalmente las siguientes:

- Margen cubierto.
- Incertidumbre.
- Potencia de salida (*compliance voltage*).
- Resolución.
- Linealidad.
- Estabilidad.
- Impedancia de salida.
- Protecciones disponibles.
- Indicación simultánea de *I* y *V*.
- Grado de programabilidad.

<u>Incertidumbre de medida</u> [2], [3] (3.9)

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

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

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

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

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

<u>Resistencia patrón</u> [1] (01.01)

Son elementos de referencia de resistencia eléctrica. Lo más frecuente es que sus valores nominales sean potencias enteras de 10, siendo los más habituales los de 1 Ω y 10 kΩ. Se construyen en valores desde 100 μΩ hasta 10 MΩ.

Al más alto nivel, se conserva su valor *óhmico* mediante grupos de estos elementos, difundiéndose éste mediante puentes, potenciómetros y comparadores, en un entorno de temperatura controlada. Para mayor precisión, algunos de estos elementos pueden sumergirse en baños de aceite que minimizan los gradientes de temperatura y los efectos de autocalentamiento durante la comparación.

Para valores óhmicos iguales o inferiores a 100 Ω se deben construir con cuatro terminales: dos para la alimentación de la intensidad y otros dos para la toma de potencial. Algunas veces, se construyen hasta 10 MΩ. Los cuatro terminales son necesarios para disminuir la influencia de las conexiones y fijar con precisión su valor.

Las características más importantes a tener en cuenta para la selección y uso de estos elementos son, normalmente las siguientes:

- Clase de precisión – Límites de error.
- Incertidumbre de calibración.

- Estabilidad, expresada en variación relativa anual de la resistencia.

- Coeficiente de temperatura, expresado en variación de resistencia por °C.

- Potencia aplicable en calibración y máxima permisible.

- Fuerza electromotriz de contacto referida al cobre.

- Coeficiente de carga, expresado en variación de resistencia por vatio disipado.

- Posibilidad de sumergirse en aceite.

- Respuesta a bajas frecuencias (constante de tiempo).

- Tipo de terminales.

- Potencia al aire y sumergida en aceite.

<u>Voltímetro numérico CC o Voltímetro digital</u> [1] (04.12)

Es un instrumento que convierte las señales analógicas de tensión en presentaciones numéricas o tensiones de salida codificadas, que pueden emplearse en procesos automáticos de registro o de control.

La conversión analógico-numérica se realiza siguiendo diferentes técnicas, descritas en la bibliografía. Todos ellos se basan en la comparación de la tensión a medir con otra interna de referencia. Se obtienen, en los mejores, unas precisiones realmente notables, comparables a las de los potenciómetros. Los de menor precisión, por su bajo precio, están desplazando a los analógicos.

Con estos instrumentos, se eliminan los errores de lectura y de paralelaje propios de los analógicos, se aumenta considerablemente la velocidad de lectura y existe la posibilidad, en los más modernos, de programar la medida mediante la incorporación de microprocesadores, lo que les permite formar parte de sistemas de medida automáticos.

En muchos de los voltímetros numéricos, es posible sobrepasar cada alcance de tensión en una cierta cantidad, que se expresa en porcentaje y que recibe el nombre de sobrealcance. Esto añade un dígito a la presentación, que siempre corresponde con el primero de la izquierda. Este dígito de sobrealcance, no toma todos los valores posibles, de 0 a 9, sino 0 ó 1 normalmente, por lo que se denomina “medio dígito”.

Las características más importantes, a tener en cuenta para su selección y empleo, son las siguientes:

- Incertidumbre.
- Alcances de medida cubiertos.
- Resolución.
- Número de dígitos.
- Sensibilidad.
- Velocidad de lectura.
- Rechazos en modos normal y común.
- Tipos de salidas digitales.
- Salida analógica.
- Posibilidad de control por ordenador y bus de datos disponible.

4. GENERALIDADES

La finalidad de este documento es marcar unas directrices para calibración de resistencias patrón en corriente continua con un método potenciométrico que puedan ser de utilidad a las pequeñas y medianas empresas en la realización de sus calibraciones internas.

El principio en el que se basa la calibración consiste en alimentar con una corriente apropiada a dos resistencias patrón conectadas en serie siendo una de ellas la de referencia, calibrada y de valor conocido a través de su certificada de calibración, R_S, y la otra, la que es objeto de la calibración, R_X. Las medidas a realizar serán las caídas de tensión que indique un voltímetro digital en los terminales de tensión de ambas resistencias (V_S y V_X, respectivamente). Ver figura 1.

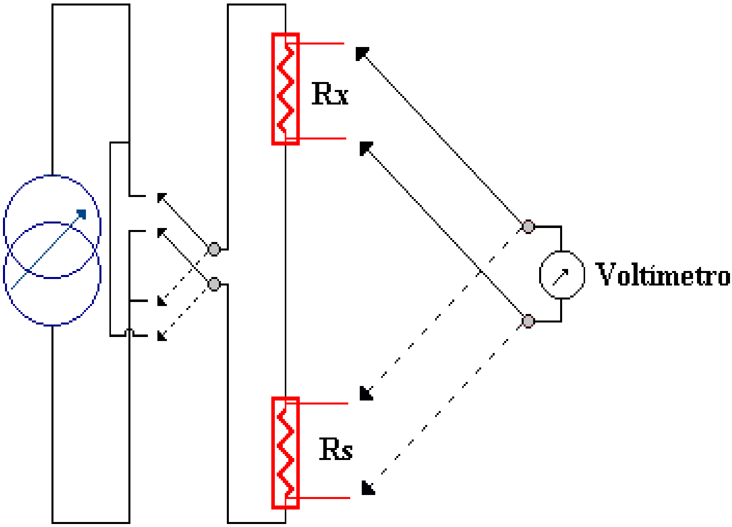


Fig.1 Esquema del sistema de calibración

Dado que la corriente que pasa por ambas resistencias es la misma, la relación entre las tensiones medidas será la relación entre los valores resistivos: $\frac{R_X}{R_S} = \frac{V_X}{V_S}$. Conocidas las magnitudes R_S, V_S y V_X conoceremos la magnitud R_X.

Un aspecto ha tener en cuenta en este sistema de medida es que el valor nominal de la intensidad de corriente que pasa por las resistencias debe ser tal que la potencia disipada en ambas resistencias sea de unos pocos mA. La exactitud de este valor carece de importancia, pero no la precisión y la estabilidad. Durante el proceso de medida nos interesa una fuente de corriente muy estable y precisa para que las tensiones leídas sean estables y precisas.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en cualquier sistema de medida de resistencias patrón es que éstas poseen coeficientes de temperatura, y algunas presentan coeficientes de presión, de valor apreciable y que afectan al valor resistivo. La resistencia patrón de referencia, R_S, es de valor conocido a través de su certificado de calibración para una determinada temperatura y presión, si procede, que denominaremos condiciones de referencia. A la hora de aplicar cualquier sistema de medida la temperatura y presión a la que se encuentra la resistencia patrón, que denominaremos condiciones de medida, no serán exactamente iguales a la temperatura y presión de las condiciones de referencia. De igual modo, si nuestro objetivo es calibrar una resistencia patrón a una determinada temperatura y presión, que denominaremos condiciones de referencia, es muy probable que al realizar las medidas la resistencia patrón objeto de la calibración se encuentre a otra temperatura y a otra presión, que denominaremos condiciones de medida. Por lo tanto hay que tener en cuenta las condiciones de referencia de temperatura y presión y las condiciones de medida de temperatura y presión en ambas resistencias.

Utilizamos los siguientes símbolos y/o abreviaturas:

- R_{XCM}: valor de la resistencia objeto de la calibración en condiciones de medida.

- t_{XCM}: Temperatura de medida de la resistencia objeto de la calibración.

- R_{XCR}: valor de la resistencia objeto de la calibración en condiciones de referencia.

- t_{XCR}: Temperatura de referencia de la resistencia objeto de la calibración.

- α_X y β_X: coeficientes de temperatura de la resistencia objeto de la calibración a temperatura t_{XCR}.

- α_S y β_S: coeficientes de temperatura de la resistencia de referencia temperatura t_{SCR}.
- γ_S: coeficiente de presión de la resistencia de referencia.
- γ_X: coeficiente de presión de la resistencia objeto de la calibración.
- p_{SCM}: presión de medida de la resistencia de referencia.
- ρ: densidad del aceite termorregulador.
- R_S: Resistencia patrón.
- R_{SCM}: Valor de la resistencia de referencia en condiciones de medida.
- R_{SCR}: valor de la resistencia de referencia en condiciones de referencia, es decir, el valor del certificado de calibración.
- R_X: Resistencia a calibrar.
- P_{XCM}: Presión de medida de la resistencia a calibrar.
- p_{SCR}: Presión de referencia de la resistencia de referencia.
- P_{XCR}: Presión de referencia de la resistencia a calibrar.
- t_{SCM}: Temperatura de medida de la resistencia de referencia.
- t_{SCR}: Temperatura de referencia de la resistencia de referencia.
- c_1 a c_{13}: Coeficientes de sensibilidad de todas las contribuciones a la incertidumbre.
- g: Módulo de la aceleración de la gravedad.
- h: Altura de aceite por encima de la resistencia.

- I: Intensidad de corriente que pasa por una resistencia genérica.
- i: Índice de un ciclo de medida. i =1,..., n.
- k: Factor de cobertura.
- n: Número de ciclos de medida.
- p: presión, en términos generales.
- $R_{XCR}]_i$: Valor de la resistencia a calibrar en el ciclo de medida i.
- $u_A(R_{XCR}]_i)$: Incertidumbre debida a la dispersión de los n valores obtenidos de la resistencia a calibrar.
- $u(\alpha_S)$: Incertidumbre del coeficiente lineal de temperatura en la resistencia patrón de referencia.
- $u(\alpha_X)$: Incertidumbre del coeficiente lineal de temperatura en la resistencia test.
- $u(\beta_S)$: Incertidumbre del coeficiente cuadrático de temperatura en la resistencia patrón de referencia.
- $u(\beta_X)$: Incertidumbre del coeficiente cuadrático de temperatura en la resistencia test.
- $u(\gamma_S)$: Incertidumbre del coeficiente de presión en la resistencia patrón de referencia.
- $u(\gamma_X)$: Incertidumbre del coeficiente de presión en la resistencia test. $u(R_{XCR})$: Incertidumbre total combinada de la resistencia a calibrar.
- $u\left(\bar{p}_{\mathrm{SCM}}\right)$: incertidumbre del medidor de presión de la resistencia de referencia.

- $u(\overline{p}_{\mathrm{XCM}})$: incertidumbre del medidor de presión de la resistencia a calibrar.
- $u(R_{\mathrm{SCR}})$: Incertidumbre de la resistencia de referencia.
- $u(\bar{t}_{\mathrm{SCM}})$: incertidumbre del medidor de temperatura de la resistencia de referencia.
- $u(\bar{t}_{\mathrm{XCM}})$: incertidumbre del medidor de temperatura de la resistencia a calibrar.
- $u(V_{\mathrm{X}})$: Incertidumbre debido a la medida de V_{X}.
- $u(V_{\mathrm{X}})$: Incertidumbre debido a la medida de V_{S}.
- V: Tensión que cae en una resistencia genérica.
- V_{S}: Tensión que cae en la resistencia a calibrar.
- V_{X}: Tensión que cae en la resistencia patrón.

Nota 1: La barra horizontal sobre la letra que representa a una magnitud indica que se trata del valor medio de todos los ciclos de medida.

Nota 2: Las expresiones encabezadas por *u* se refieren a incertidumbres particulares, desviaciones y resoluciones necesarias para el cálculo de las incertidumbres de tipo B.

Las siguientes ecuaciones representan la dependencia de ambas resistencias con la presión y la temperatura:

$$R_{\mathrm{XCM}} = R_{\mathrm{XCR}} \bullet \left(1 + \alpha_{\mathrm{X}} (t_{\mathrm{XCM}} - t_{\mathrm{XCR}}) + \beta_{\mathrm{X}} (t_{\mathrm{XCM}} - t_{\mathrm{XCR}})^2 + \gamma_{\mathrm{X}} (p_{\mathrm{XCM}} - p_{\mathrm{XCR}})\right) \quad (1)$$

$$R_{\mathrm{SCM}} = \mathrm{R}_{\mathrm{SCR}} \bullet \left(1 + \alpha_{\mathrm{S}} (t_{\mathrm{SCM}} - t_{\mathrm{SCR}}) + \beta_{\mathrm{S}} (t_{\mathrm{SCM}} - t_{\mathrm{SCR}})^2 + \gamma_{\mathrm{S}} (p_{\mathrm{SCM}} - p_{\mathrm{SCR}})\right) \quad (2)$$

NOTA 1: La temperatura es uno de los parámetros que más afecta a los patrones de resistencia eléctrica. Los coeficientes de temperatura deberán ser conocidos a través del fabricante del patrón o determinados en el laboratorio.

NOTA 2: Debido a la geografía existente en España la presión atmosférica es muy dispar en los distintos laboratorios. Como algunas de las resistencias patrón no están herméticamente cerradas y poseen un coeficiente de presión apreciable el valor resistivo puede variar una cantidad significativa al variar la presión de manera notable. Por ejemplo, si un tipo de resistencia patrón de valor nominal 1 Ω, de marca muy conocida y usada en los laboratorios, que posee un coeficiente de presión genérico de 1,5 nΩ/hPa, es calibrada por un laboratorio de Sevilla y después se utiliza en un laboratorio de Ávila, el valor resistivo varía en torno a unas partes en 10^{-7} Ω. Por ello y dependiendo de la capacidad óptima de medida que el laboratorio quiera alcanzar, el valor de la presión ha de tenerse en cuenta en algunos casos y el valor del coeficiente de presión ha de ser previamente determinado o indicado por el fabricante.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Resistencia patrón de referencia, con certificado de calibración para una determinada temperatura y presión (si procede), con conocidos coeficientes de temperatura y presión (si procede), de valor nominal próximo a la resistencia a calibrar y con una clase de precisión superior o igual a la resistencia patrón que se desea calibrar. La relación entre los valores nominales de ambas resistencias debería ser 1 ó en su defecto y como máximo, 10.

Resistencia patrón objeto de la calibración.

Fuente de corriente continua, la cual puede estar constituida por un todo o por una fuente de tensión estabilizada de corriente continua o un patrón de tensión electrónico y una resistencia atenuadora. Hay que tener en cuenta el valor nominal para que la potencia disipada en ambas resistencias no exceda de unos pocos mW y que la estabilidad de la fuente sea la máxima posible.

Conmutadores para la inversión de corriente y para la elección de la resistencia en la cual se lee la tensión.

Voltímetro digital con resolución de al menos 7 dígitos.

Cables de Cobre de baja fuerza electromotriz suficientemente largos para realizar todas las conexiones entre los terminales de corriente de las resistencias y la fuente de corriente, y entre los terminales de tensión de las resistencias y el voltímetro digital.

Baños de aceite y/o baños de aire en los que se introduzcan las resistencias patrón programados a temperaturas lo más cercanas posible a las temperaturas de referencia de la resistencia patrón de referencia y de la resistencia patrón objeto de la calibración. Dependiendo de la fabricación de las resistencias patrón, éstas pueden haber sido diseñadas para ser introducidas en baños de aceite o en baños de aire. Los baños de aceite están disponibles comercialmente con estabilidades de 10 mK e incluso más, y los baños de aire suelen ser de fabricación especial con estabilidad de 10 mK, aunque los hay comercializados para un tipo y modelo de resistencia patrón, a una determinada temperatura y con capacidad para un único patrón. Si no se dispone de un baño de aire la resistencia patrón deberá colocarse en un lugar sin grandes gradientes de temperatura, alejada de focos de frío y/o calor, en un lugar de ventilación constante.

Medidores de temperatura, con su certificado de calibración, diseñados de tal manera que si es posible puedan ser introducidos en los orificios que poseen algunos de los patrones de resistencia eléctrica destinados para ello, con resolución de 1 mK a 10 mK e incertidumbre de unos 10 mK o incluso menor.

Medidor de presión atmosférica, con su certificado de calibración, resolución mínima de 1 hPa e incertidumbre máxima de 1 hPa.

5.2. Operaciones previas

Para proceder a la calibración de las resistencias patrón en corriente continua, éstas deben encontrarse perfectamente identificadas en lo que se refiere a marca, valor nominal y número de serie. En caso de que no exista alguno de estos datos, se procederá a la identificación de la resistencia patrón de la mejor forma posible (por ejemplo, mediante etiqueta fuertemente adherida a la resistencia patrón, con un código único que podría ser el dado por el propio usuario o uno dado por el laboratorio) de forma que no surja duda alguna en cuanto a la correspondencia entre el patrón calibrado y el Certificado emitido.

El certificado de calibración de la resistencia patrón de referencia deberá contener al menos, la siguiente información:

- Laboratorio Emisor.
- Identificación del equipo calibrado.
- Fecha de emisión del certificado.
- Condiciones ambientales o condiciones de medida de temperatura y presión (si procede).
- Referencia al procedimiento de calibración utilizado y valor nominal de la intensidad de corriente a la que fue calibrada.
- Resultados obtenidos en la calibración y la temperatura y presión (si procede) de referencia, así como el valor de los coeficientes de temperatura y presión.
- Incertidumbre.
- Declaración de trazabilidad.

Si la relación entre los valores nominales de las resistencias es de 1 no nace falta que el voltímetro digital esté calibrado pero para otro valor de relación si es necesaria la calibración previa.
La corriente que debe pasar por las resistencias patrón (de referencia y de calibración) debe estar previamente estudiada de manera que la potencia disipada en ellas no sea muy grande y que el voltímetro digital mida en su punto óptimo de medida (cercano al fondo de escala). Para ello se debe tener una buena fuente de corriente variable. Una buena alternativa es utilizar resistencias atenuadoras colocadas a la salida de la

fuente de corriente o sustituir la fuente por un patrón de tensión constante y una resistencia atenuadora.

Realizar todas las conexiones de los cables de corriente y tensión como en el circuito de medida de la figura anterior, cuidando la limpieza en los extremos. Introducir las resistencias en sus baños correspondientes (aceite y/o aire) que previamente deberán estar lo más cercanas a las temperaturas de referencia necesarias para realizar las medidas. Mantener al menos 24 horas ó 48 horas de estabilización de las resistencias.

Introducir las sondas de temperatura en los orificios de las resistencias o en su defecto cercanas a ellas. Colocar el medidor de presión próximo al circuito de medida y tener en cuenta, si procede, que hay que añadir el valor de la presión debida al aceite, $p = \rho \cdot g \cdot h$, para lo cual debemos conocer su densidad ρ y la altura existente de aceite h por encima de la resistencia.

Encender los equipos de medida (fuente de corriente, voltímetro digital, conmutadores, termómetros, medidores de presión...) para que se vayan estabilizando y establecer un periodo de tiempo suficiente para que la intensidad de corriente (de valor previamente escogido) que pasa por las resistencias sea lo más constante posible y el voltímetro se haya estabilizado, así como la temperatura en las resistencias.

5.3. Proceso de calibración

El proceso de calibración consiste en ir anotando los valores de cada de tensión en las resistencias Rx y Rs, así como los valores de presión y temperatura en cada una de ellas, con la corriente en un sentido y en sentido contrario. De forma detallada, cada ciclo de medida sería:

5.3.1. Corriente en un sentido (directa) en R_x

Medida de la tensión, medida de la temperatura y medida de la presión. Anotación de todos estos valores.

Conmutación de la corriente.

5.3.2. Corriente en el otro sentido (inversa) en R_x

Medida de la tensión, medida de la temperatura y medida de la presión. Anotación de todos estos valores.

Conmutación de la tensión.

5.3.3. Corriente en sentido inverso en R_s

Medida de la tensión, medida de la temperatura y medida de la presión. Anotación de todos estos valores.

Conmutación de la corriente.

5.3.4. Corriente en sentido directo en R_s

Medida de la tensión, medida de la temperatura y medida de la presión. Anotación de todos estos valores.

Repetir de nuevo la toma de medidas.

Conmutación de la corriente.

5.3.5. Corriente en sentido inverso en R_s

Medida de la tensión, medida de la temperatura y medida de la presión. Anotación de todos estos valores.

Conmutación de la tensión.

5.3.6. Corriente en sentido inverso en R_x

Medida de la tensión, medida de la temperatura y medida de la presión. Anotación de todos estos valores.

Conmutación de la corriente.

5.3.7. Corriente en sentido directo en R_x

Medida de la tensión, medida de la temperatura y medida de la presión. Anotación de todos estos valores.

Calculando los valores medios de tensión, temperatura y presión, en R_x y R_s, en directa y en inversa, obtendremos los datos de las medidas de cada ciclo: V_X, t_{XCM}, p_{XCM}, V_S, t_{SCM} y p_{SCM}.

Los ciclos de medidas se harán $n \geq 10$ veces y consecutivamente. Así se obtendrán n valores de la resistencia objeto de la calibración.

5.4. Toma y tratamiento de datos

Para cada ciclo de medida i tenemos los siguientes datos: V_X, t_{XCM}, p_{XCM}, V_S, t_{SCM} y p_{SCM}.

Entonces:

$$\frac{V_X}{V_S} = \frac{R_{XCM}}{R_{SCM}} \Rightarrow R_{XCM} = \frac{V_X}{V_S} \bullet R_{SCM} \qquad (3)$$

Como:

$$R_{XCM} = R_{XCR} \bullet \left(1 + \alpha_X (t_{XCM} - t_{XCR}) + \beta_X (t_{XCM} - t_{XCR})^2 + \gamma_X (p_{XCM} - p_{XCR})\right) \qquad (4)$$

$$R_{SCM} = R_{SCR} \bullet \left(1 + \alpha_S (t_{SCM} - t_{SCR}) + \beta_S (t_{SCM} - t_{SCR})^2 + \gamma_S (p_{SCM} - p_{SCR})\right) \qquad (5)$$

y los datos R_{SCR}, t_{SCR}, p_{SCR}, α_S, β_S, γ_S, t_{XCR}, p_{XCR}, α_X, β_X y γ_X son conocidos previamente, tendremos:

$$R_{XCR} = \frac{V_X}{V_S} \bullet R_{SCR} \frac{1 + \alpha_S (t_{SCM} - t_{SCR}) + \beta_S (t_{SCM} - t_{SCR})^2 + \gamma_S (p_{SCM} - p_{SCR})}{1 + \alpha_X (t_{XCM} - t_{XCR}) + \beta_X (t_{XCM} - t_{XCR})^2 + \gamma_X (p_{XCM} - p_{XCR})} \qquad (6)$$

para cada ciclo i de medida.

Dado que los coeficientes de presión y temperatura en las resistencias patrón son relativamente pequeños (normalmente provocan cambios resistivos del orden de nΩ/hPa, 10^{-6} Ω/°C y 10^{-6}

$\Omega/°C^2$, respectivamente) esta ecuación puede aproximarse a la siguiente expresión (despreciando los términos de partes en 10^{-12} y aplicando el desarrollo de Taylor) para cada ciclo *i* de medida.

$$R_{XCR} = \frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \left[1 + \alpha_S (t_{SCM} - t_{SCR}) + \beta_S (t_{SCM} - t_{SCR})^2 + \gamma_S (p_{SCM} - p_{SCR}) - \right.$$
$$\left. - \alpha_X (t_{XCM} - t_{XCR}) - \beta_X (t_{XCM} - t_{XCR})^2 - \gamma_X (p_{XCM} - p_{XCR}) \right] \tag{7}$$

El valor final que se le asigna a la resistencia patrón objeto de la calibración, a la temperatura t_{XCR} y presión p_{XCR} de referencia, será el valor medio de los *n* ciclos de medida:

$$R_{XCR} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[R_{XCR} \right]_i}{n} \tag{8}$$

De la misma manera se considerarán los valores medios de los *n* ciclos de medida, para la temperatura y presión de medida de cada resistencia, con el objeto de promediar las condiciones de medida en ambas resistencias utilizándose este grupo de fórmulas:

$$\bar{t}_{XCM} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[t_{XCM} \right]_i}{n}, \qquad \bar{t}_{SCM} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[t_{XCM} \right]_i}{n},$$
$$\bar{p}_{XCM} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[p_{XCM} \right]_i}{n} \qquad \bar{p}_{SCM} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[p_{XCM} \right]_i}{n} \tag{9}$$

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

El cálculo de incertidumbres se ha realizado aplicando los criterios establecidos en la Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, 3ª ed. en español (traducción de 1ª ed. 2008 en inglés), Centro Español de Metrología, 2009 [3] y la Guía CEA-ENAC-LC/02, Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones, Rev. 1, Enero 1998 [4].

Para el estudio de las incertidumbres partimos de la ecuación:

$$R_{XCR} = \frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR}\left[1 + \alpha_S(\bar{t}_{SCM} - t_{SCR}) + \beta_S(\bar{t}_{SCM} - t_{SCR})^2 + \gamma_S(\bar{p}_{SCM} - p_{SCR}) - \right.$$
$$\left. - \alpha_X(\bar{t}_{XCM} - t_{XCR}) - \beta_X(\bar{t}_{XCM} - t_{XCR})^2 - \gamma_X(\bar{p}_{XCM} - p_{XCR})\right] \tag{10}$$

Considerando que las magnitudes no están correlacionadas y según la ley de propagación de incertidumbres, el cuadrado de la incertidumbre típica asociada al valor de la resistencia objeto de la calibración será:

$$u^2(R_{XCR}) = u_A^2(R_{XCR}]_i) + c_1^2 \cdot u^2(V_X) + c_2^2 \cdot u^2(V_S) + c_3^2 \cdot u^2(R_{SCR}) + c_4^2 \cdot u^2(\bar{t}_{SCM}) +$$
$$+ c_5^2 \cdot u^2(\bar{p}_{SCM}) + c_6^2 \cdot u^2(\alpha_S) + c_7^2 \cdot u^2(\beta_S) + c_8^2 \cdot u^2(\gamma_S) + c_9^2 \cdot u^2(\bar{t}_{XCM}) +$$
$$+ c_{10}^2 \cdot u^2(\bar{p}_{XCM}) + c_{11}^2 \cdot u^2(\alpha_X) + c_{12}^2 \cdot u^2(\beta_X) + c_{13}^2 \cdot u^2(\gamma_X) \tag{11}$$

en donde:

- $u_A(R_{XCR}]_i)$ es la incertidumbre de tipo A debida a la dispersión de los n valores obtenidos de la resistencia patrón a calibrar, la desviación típica de la media:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n}(R_{XCR}]_i - R_{XCR})^2}{n \cdot (n-1)}} \tag{12}$$

- $u(V_X)$ es la incertidumbre típica asociada al voltímetro digital en la medida de la magnitud V_X, cuya estimación δV_X en un intervalo simétrico depende de la incertidumbre de la calibración del voltímetro y de su resolución, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular, de manera que $u(V_X) = \frac{\delta V_X}{\sqrt{3}}$

(13)

- $u(V_S)$ es la incertidumbre típica asociada al voltímetro digital en la medida de la magnitud V_S, cuya estimación δV_S en un intervalo simétrico depende de la incertidumbre de la calibración del voltímetro y de su resolución, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular, de manera que $u(V_S)= \dfrac{\delta V_S}{\sqrt{3}}$

(14)

- $u(R_{SCR})$ es la incertidumbre típica asociada al valor actualizado de la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\ R_{SCR}$ se obtiene a partir de su certificado de calibración y deriva para un nivel de confianza de k en una distribución de probabilidad normal, de manera que $u(R_{SCR})= \dfrac{\delta R_{SCR}}{k}$ (15)

- $u(\bar{t}_{SCM})$ es la incertidumbre típica de la sonda de temperatura media en la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\bar{t}_{SCM}$ se obtiene a partir de la combinación cuadrática de su certificado de calibración, resolución y desviación típica experimental de la media, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que $u(V_S)= \dfrac{\delta\bar{t}_{XCM}}{\sqrt{3}}$ (16)

- $u(\bar{p}_{SCM})$ es la incertidumbre típica del medidor de la presión media en la resistencia de referencia, cuya estimación

- $\delta\bar{p}_{SCM}$ se obtiene a partir la combinación cuadrática de su certificado de calibración, resolución y desviación típica experimental de la media, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que $u(V_S)= \dfrac{\delta\ \bar{p}_{SCM}}{\sqrt{3}}$ (17)

- $u(\alpha_S)$ es la incertidumbre típica del coeficiente lineal de temperatura de la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\alpha_S$ se obtiene del fabricante del patrón o de los estudios realizados por el laboratorio, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que $u(\alpha_S)= \dfrac{\delta\alpha_S}{\sqrt{3}}$ (18)

- $u(\beta_S)$ es la incertidumbre típica del coeficiente cuadrático de temperatura de la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\beta_S$ se obtiene del fabricante del patrón o de los estudios realizados por el laboratorio, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que $u(\beta_S)= \dfrac{\delta\beta_S}{\sqrt{3}}$ (19)

- $u(\gamma_S)$ es la incertidumbre típica del coeficiente de presión de la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\gamma_S$ se obtiene del fabricante del patrón o de los estudios realizados por el laboratorio, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que

$$u(\gamma_S)= \frac{\delta\gamma_S}{\sqrt{3}} \tag{20}$$

- $u(\bar{t}_{XCM})$ es la incertidumbre típica de la sonda de temperatura media en la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\bar{t}_{XCM}$ se obtiene a partir de la combinación cuadrática su certificado de calibración, resolución y desviación típica experimental de la media, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que $u(V_X)= \dfrac{\delta\bar{t}_{XCM}}{\sqrt{3}}$ (21)

- $u(\bar{p}_{XCM})$ es la incertidumbre típica del medidor de la presión media en la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\bar{p}_{XCM}$ se obtiene a partir de su la combinación cuadrática certificado de calibración, resolución y desviación típica experimental de la media, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que $u(V_X)= \dfrac{\delta\,\bar{p}_{XCM}}{\sqrt{3}}$ (22)

- $u(\alpha_X)$ es la incertidumbre típica del coeficiente lineal de temperatura de la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\alpha_X$ se obtiene del fabricante del patrón o de los estudios realizados por el laboratorio, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que $u(\alpha_X)= \dfrac{\delta\alpha_X}{\sqrt{3}}$ (23)

- $u(\beta_X)$ es la incertidumbre típica del coeficiente cuadrático de temperatura de la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\beta_X$ se obtiene del fabricante del patrón o de los estudios realizados por el laboratorio, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que $u(\beta_X)= \dfrac{\delta\beta_X}{\sqrt{3}}$ (24)

- $u(\gamma_X)$ es la incertidumbre típica del coeficiente de Presión de la resistencia de referencia, cuya estimación $\delta\gamma_X$ se obtiene del fabricante del patrón o de los estudios realizados por el laboratorio, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, de manera que

$$u(\gamma_X)= \frac{\delta\gamma_X}{\sqrt{3}} \tag{25}$$

y con los siguientes coeficientes de correlación:

$$c_1 = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial V_X} \approx \frac{1}{V_S}\cdot R_{SCR} \tag{26}$$

$$c_2 = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial V_S} \approx -\frac{V_X}{V_S^2}\cdot R_{SCR} \tag{27}$$

$$c_3 = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial R_{SCR}} \approx \frac{V_X}{V_S} \tag{28}$$

$$c_4 = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \overline{\overline{t}}_{SCM}} = \frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\alpha_S + 2\beta_S \cdot (\overline{t}_{SCM} - t_{SCR})) \tag{29}$$

$$c_5 = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \overline{\overline{p}}_{SCM}} = \frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot \gamma_S \tag{30}$$

$$c_6 = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \alpha_S} = \frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\overline{t}_{SCM} - t_{SCR}) \tag{31}$$

$$c_7 = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \beta_S} = \frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\overline{t}_{SCM} - t_{SCR})^2 \tag{32}$$

$$c_8 = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \gamma_S} = \frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\overline{p}_{SCM} - p_{SCR}) \tag{33}$$

$$c_9 = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \overline{\overline{t}}_{XCM}} = -\frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\alpha_X + 2\beta_X \cdot (\overline{t}_{XCM} - t_{XCR})) \tag{34}$$

$$c_{10} = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \overline{\overline{p}}_{XCM}} = -\frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot \gamma_X \tag{35}$$

$$c_{11} = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \alpha_X} = -\frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\overline{t}_{XCM} - t_{XCR}) \tag{36}$$

$$c_{12} = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \beta_X} = -\frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\overline{t}_{XCM} - t_{XCR})^2 \tag{37}$$

$$c_{13} = \frac{\partial R_{XCR}}{\partial \gamma_X} = -\frac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\overline{p}_{XCM} - p_{XCR}) \tag{38}$$

A continuación, en la tabla 1, se presenta un resumen de las contribuciones a la incertidumbre asociada a la resistencia a calibrar.

Tabla 1. Resumen de las contribuciones a la incertidumbre

Magnitud	Estimación de la incertidumbre	Incertidumbre típica	Coeficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre típica
$R_{XCR}]_i$		$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n}(R_{XCR}]_i - R_{XCR})^2}{n\cdot(n-1)}}$	1	$u_A(R_{XCR}]_i)$
V_X	δV_X	$\frac{\delta V_X}{\sqrt{3}}$	$c_1 = \frac{1}{V_S}\cdot R_{SCR}$	$c_1\cdot u(V_X)$
V_S	δV_S	$\frac{\delta V_S}{\sqrt{3}}$	$c_2 = -\frac{V_X}{V_S^2}\cdot R_{SCR}$	$c_2\cdot u(V_S)$
R_{SCR}	δR_{SCR}	$\frac{\delta R_{SCR}}{k}$	$c_3 = \frac{V_X}{V_S}$	$c_3\cdot u(R_{SCR})$
$\bar{t}_{SCM}$	$\delta \bar{t}_{SCM}$	$\frac{\delta \bar{t}_{SCM}}{\sqrt{3}}$	$c_4 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\alpha_S + 2\beta_S(\bar{t}_{SCM} - t_{SCR}))$	$c_4\cdot u(\bar{t}_{SCM})$
$\bar{p}_{SCM}$	$\delta \bar{p}_{SCM}$	$\frac{\delta \bar{p}_{SCM}}{\sqrt{3}}$	$c_5 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot\gamma_S$	$c_5\cdot u(\bar{p}_{SCM})$
α_S	$\delta\alpha_S$	$\frac{\delta\alpha_S}{\sqrt{3}}$	$c_6 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{t}_{SCM} - t_{SCR})$	$c_6\cdot u(\alpha_S)$
β_S	$\delta\beta_S$	$\frac{\delta\beta_S}{\sqrt{3}}$	$c_7 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{t}_{SCM} - t_{SCR})^2$	$c_7\cdot u(\beta_S)$
γ_S	$\delta\gamma_S$	$\frac{\delta\gamma_S}{\sqrt{3}}$	$c_8 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{p}_{SCM} - p_{SCR})$	$c_8\cdot u(\gamma_S)$
$\bar{t}_{XCM}$	$\delta \bar{t}_{XCM}$	$\frac{\delta \bar{t}_{XCM}}{\sqrt{3}}$	$c_9 = -\frac{V_X}{V_S}R_{SCR}(\alpha_X + 2\beta_X(\bar{t}_{XCM} - t_{XCR}))$	$c_9\cdot u(\bar{t}_{XCM})$
$\bar{p}_{XCM}$	$\delta \bar{p}_{XCM}$	$\frac{\delta \bar{p}_{XCM}}{\sqrt{3}}$	$c_{10} = -\frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot\gamma_X$	$c_{10}u(\bar{p}_{XCM})$
α_X	$\delta\alpha_X$	$\frac{\delta\alpha_X}{\sqrt{3}}$	$c_{11} = -\frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{t}_{XCM} - t_{XCR})$	$c_{11}\cdot u(\alpha_X)$
β_X	$\delta\beta_X$	$\frac{\delta\beta_X}{\sqrt{3}}$	$c_{12} = -\frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{t}_{XCM} - t_{XCR})^2$	$c_{12}\cdot u(\beta_X)$
γ_X	$\delta\gamma_X$	$\frac{\delta\gamma_X}{\sqrt{3}}$	$c_{13} = -\frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{p}_{XCM} - p_{XCR})$	$c_{13}\cdot u(\gamma_S)$

Los grados de libertad efectivos del proceso de medida deberían calcularse usando para ello la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$\nu_{eff} = \frac{u^4}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4}{\nu_i}} \qquad (39)$$

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.

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 o 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 ν_{eff} es muy alto y entonces k = 2.

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

$$U(R_{\mathrm{XCR}}) = k \cdot u(R_{\mathrm{XCR}}) \qquad (40)$$

6.2. Interpretación de resultados

La calibración de una resistencia patrón es simplemente una determinación del valor de la resistencia patrón con su incertidumbre asociada a una temperatura y presión fijadas. Lo más importante de la calibración de una resistencia patrón es la precisión de su valor y no su exactitud con el valor nominal.

En el caso de que la resistencia muestre un comportamiento anómalo (dispersión inusualmente grande de las medidas, un valor muy alejado del nominal, etc.) puede indicársele al propietario del equipo para que tome las medidas que considere oportunas.

Los periodos de recalibración se aconsejan anuales, ya que todas las resistencias patrón derivan su valor a lo largo del tiempo como consecuencia del envejecimiento y otras razones, aunque una vez que la deriva pueda considerarse lineal y predecible, se aconseja cada dos años. En cualquier caso el responsable final de asignar el período de recalibración es siempre el usuario del equipo.

7. REFERENCIAS

[1] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía. 1994.

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

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

[4] Guía CEA-ENAC-LC/02, Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones, Rev. 1, Enero 1998.

[5] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 2, Tres Cantos, Madrid. Año 2000.

8. ANEXO: Ejemplo de la calibración de una resistencia patrón de 10 000 Ω.

Se dispone a calibrar una resistencia patrón de 10 000 Ω mediante un método potenciométrico.

La resistencia objeto de la calibración es una resistencia patrón de 10 kΩ diseñada para ser introducida en un baño de aceite. La calibración de esta resistencia pide el cliente que se haga a la temperatura de 25 °C y a la presión de 101 325 Pa. Mediante una fotocopia del certificado del fabricante del patrón, informa el cliente al laboratorio de calibración de los valores de los coeficientes de presión y temperatura, sin que se especifique la incertidumbre asociada a ellos. Estos valores son:

$\alpha_{\mathrm{X}} = 0{,}03 \cdot 10^{-6}$ /°C.

$\beta_{\mathrm{X}} = -0{,}05 \cdot 10^{-6}$ /°C^2.

$\gamma_{\mathrm{X}} = 0{,}03 \cdot 10^{-9}$ /Pa.

Al desconocer la incertidumbre asociada se estima la última cifra significativa:

$\delta\alpha_{\mathrm{X}} = 0{,}01 \cdot 10^{-6}$ /°C.

$\delta\beta_{\mathrm{X}} = 0{,}01 \cdot 10^{-6}$ /°C^2.

$\delta\gamma_{\mathrm{X}} = 0{,}01 \cdot 10^{-9}$ /Pa.

Además se sabe que t_{XCR} es 25 °C y p_{XCR} es 101 325 Pa.

El laboratorio de calibración procede a introducir la resistencia patrón en un baño de aceite de densidad 850 kg/m^3, a una profundidad de 10 cm, y a una temperatura cercana a 25 °C.

Como resistencia de referencia se elige un patrón de 10 kΩ diseñado para baño de aire, calibrado hace seis meses a 23 °C y con los coeficientes de temperatura y presión certificados por ellos mismos. Estos valores son:

$R_{\mathrm{SCR}} = 10\ 000{,}005\ \Omega$.

$u(R_{\mathrm{SCR}}) / R_{\mathrm{SCR}} = 2 \cdot 10^{-7}$ para un $k = 2$.

Deriva de R_{SCR} anual = - 0,000 6 Ω $\Rightarrow$ Valor actualizado R_{SCR} = 10 000,004 7 Ω.

$\alpha_S = 0{,}05 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}.

$\delta\alpha_S = 0{,}02 \cdot 10^{-6}$ /°C.

$\beta_S = -0{,}025 \cdot 10^{-6}$ /°C^2.

$\delta\beta_S = 0{,}003 \cdot 10^{-6}$ /°C^2.

γ_S = 0 (despreciable).

$\delta\gamma_S$ = 0 (despreciable).

Además se sabe que t_{SCR} es 23 °C y p_{SCR} es 101 325 Pa.

Como fuente de corriente se opta por un patrón de tensión continua de 10 V y una resistencia atenuadora de 80 kΩ, de manera que en cada resistencia cae una tensión de aproximadamente 1 V.

El voltímetro digital fue autocalibrado o ajustado al inicio de este procedimiento "con artefactos". La resolución es $1 \cdot 10^{-6}$ V. Las especificaciones del fabricante del voltímetro digital dicen que éste tiene una exactitud de $5 \cdot 10^{-6}$ de la lectura + 2 μV, lo que significa $7 \cdot 10^{-6}$ V, en ambas resistencias de 10 000 Ω.

NOTA: Calibrar un voltímetro digital con artefactos consiste en realizar un ajuste de la electrónica asociada al voltímetro. Con patrones de tensión continua de 1 V y 10 V, de valores conocidos y certificados en una calibración previa, se calibra el voltímetro, es decir, se introduce en la electrónica asociada los valores calibrados de los patrones de 1 V y 10 V de manera que el voltímetro se ajusta de forma automática para que los valores medidos de los patrones coincidan con los valores calibrados.

Las sondas de temperatura con una resolución de 0,01 °C, son calibradas por laboratorios externos una vez al año, con unas incertidumbres típicas de ± 0,05 °C para un k =1 que incluye la deriva anual, y los medidores de presión con una resolución de

1 Pa son calibrados por laboratorios externos una vez al año, con unas incertidumbres típicas de ± 100 Pa para un k = 2 que incluye la deriva anual.

Para el ciclo i = 1 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

Vx en Directa =	1,000 005	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 330	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 002	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 320	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 997	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 500	Pa
Vs en Directa =	0,999 992	V	t_{SCM} =	25,02	° C	p_{SCM} =	93 520	Pa
Vs en Directa =	0,999 993	V	t_{SCM} =	25,02	° C	p_{SCM} =	93 530	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 996	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 540	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 002	V	t_{XCM} =	23,03	° C	p_{XCM} =	94 360	Pa
Vx en Directa =	1,000 006	V	t_{XCM} =	23,01	° C	p_{XCM} =	94 370	Pa

Vx =	1,000 003 8	V	t_{XCM} =	23,020	° C	p_{XCM} =	94 345	Pa
Vs =	0,999 994 5	V	t_{SCM} =	25,015	° C	p_{SCM} =	93 523	Pa

Para el ciclo i = 2 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

Vx en Directa =	1,000 004	V	t_{XCM} =	23,01	° C	p_{XCM} =	94 430	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 001	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 430	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 997	V	t_{SCM} =	25,03	° C	p_{SCM} =	93 610	Pa
Vs en Directa =	0,999 994	V	t_{SCM} =	25,02	° C	p_{SCM} =	93 620	Pa
Vs en Directa =	0,999 993	V	t_{SCM} =	25,04	° C	p_{SCM} =	93 630	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 997	V	t_{SCM} =	25,03	° C	p_{SCM} =	93 640	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 002	V	t_{XCM} =	23,03	° C	p_{XCM} =	94 470	Pa
Vx en Directa =	1,000 005	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 480	Pa

Vx =	1,000 003 0	V	t_{XCM} =	23,020	° C	p_{XCM} =	94 453	Pa
Vs =	0,999 995 3	V	t_{SCM} =	25,030	° C	p_{SCM} =	93 625	Pa

Para el ciclo *i* = 3 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

Vx en Directa =	1,000 005	V	t_{XCM} =	23,03	° C	p_{XCM} =	94 500	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 002	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 500	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 998	V	t_{SCM} =	25,03	° C	p_{SCM} =	93 680	Pa
Vs en Directa =	0,999 994	V	t_{SCM} =	25,04	° C	p_{SCM} =	93 690	Pa
Vs en Directa =	0,999 994	V	t_{SCM} =	25,04	° C	p_{SCM} =	93 700	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 997	V	t_{SCM} =	25,05	° C	p_{SCM} =	93 710	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 000	V	t_{XCM} =	23,03	° C	p_{XCM} =	94 540	Pa
Vx en Directa =	1,000 006	V	t_{XCM} =	23,04	° C	p_{XCM} =	94 550	Pa

Vx =	1,000 003 3	V	t_{XCM} =	23,030	° C	p_{XCM} =	94 523	Pa
Vs =	0,999 995 8	V	t_{SCM} =	25,040	° C	p_{SCM} =	93 695	Pa

Para el ciclo *i* = 4 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

Vx en Directa =	1,000 004	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 450	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 001	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 450	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 996	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 630	Pa
Vs en Directa =	0,999 992	V	t_{SCM} =	25,00	° C	p_{SCM} =	93 640	Pa
Vs en Directa =	0,999 990	V	t_{SCM} =	25,02	° C	p_{SCM} =	93 650	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 995	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 660	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 003	V	t_{XCM} =	23,01	° C	p_{XCM} =	94 490	Pa
Vx en Directa =	1,000 003	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 500	Pa

Vx =	1,000 002 8	V	t_{XCM} =	23,018	° C	p_{XCM} =	94 473	Pa
Vs =	0,999 993 3	V	t_{SCM} =	25,010	° C	p_{SCM} =	93 645	Pa

Para el ciclo *i* = 5 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

Vx en Directa =	1,000 006	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 370	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 002	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 370	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 996	V	t_{SCM} =	25,03	° C	p_{SCM} =	93 550	Pa
Vs en Directa =	0,999 993	V	t_{SCM} =	25,04	° C	p_{SCM} =	93 560	Pa
Vs en Directa =	0,999 991	V	t_{SCM} =	25,02	° C	p_{SCM} =	93 570	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 997	V	t_{SCM} =	25,04	° C	p_{SCM} =	93 580	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 003	V	t_{XCM} =	23,01	° C	p_{XCM} =	94 410	Pa
Vx en Directa =	1,000 004	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 420	Pa

Vx =	1,000 003 8	V	t_{XCM} =	23,018	° C	p_{XCM} =	94 393	Pa
Vs =	0,999 994 3	V	t_{SCM} =	25,033	° C	p_{SCM} =	93 565	Pa

Para el ciclo *i* = 6 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

Vx en Directa =	1,000 005	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 290	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 001	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 290	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 997	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 470	Pa
Vs en Directa =	0,999 992	V	t_{SCM} =	25,03	° C	p_{SCM} =	93 480	Pa
Vs en Directa =	0,999 994	V	t_{SCM} =	25,02	° C	p_{SCM} =	93 490	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 996	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 500	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 000	V	t_{XCM} =	23,04	° C	p_{XCM} =	94 330	Pa
Vx en Directa =	1,000 006	V	t_{XCM} =	23,01	° C	p_{XCM} =	94 340	Pa

Vx =	1,000 003 0	V	t_{XCM} =	23,023	° C	p_{XCM} =	94 313	Pa
Vs =	0,999 994 8	V	t_{SCM} =	25,018	° C	p_{SCM} =	93 485	Pa

Para el ciclo *i* = 7 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

Vx en Directa =	1,000 004	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 470	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 001	V	t_{XCM} =	23,04	° C	p_{XCM} =	94 470	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 997	V	t_{SCM} =	25,03	° C	p_{SCM} =	93 650	Pa

Vs en Directa =	0,999 995	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 660	Pa
Vs en Directa =	0,999 994	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 670	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 998	V	t_{SCM} =	25,02	° C	p_{SCM} =	93 680	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 000	V	t_{XCM} =	23,03	° C	p_{XCM} =	94 510	Pa
Vx en Directa =	1,000 005	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 520	Pa

Vx =	1,000 002 5	V	t_{XCM} =	23,028	° C	p_{XCM} =	94 493	Pa
Vs =	0,999 996 0	V	t_{SCM} =	25,018	° C	p_{SCM} =	93 665	Pa

Para el ciclo i = 8 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

Vx en Directa =	1,000 006	V	t_{XCM} =	23,03	° C	p_{XCM} =	94 540	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 001	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 540	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 999	V	t_{SCM} =	25,00	° C	p_{SCM} =	93 720	Pa
Vs en Directa =	0,999 994	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 730	Pa
Vs en Directa =	0,999 995	V	t_{SCM} =	25,00	° C	p_{SCM} =	93 740	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 998	V	t_{SCM} =	25,00	° C	p_{SCM} =	93 750	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 000	V	t_{XCM} =	23,03	° C	p_{XCM} =	94 580	Pa
Vx en Directa =	1,000 004	V	t_{XCM} =	23,04	° C	p_{XCM} =	94 590	Pa

Vx =	1,000 002 8	V	t_{XCM} =	23,030	° C	p_{XCM} =	94 563	Pa
Vs =	0,999 996 5	V	t_{SCM} =	25,003	° C	p_{SCM} =	93 735	Pa

Para el ciclo i = 9 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

Vx en Directa =	1,000 004	V	t_{XCM} =	23,06	° C	p_{XCM} =	94 490	Pa
Vx en Inversa =	-1,000 001	V	t_{XCM} =	23,04	° C	p_{XCM} =	94 490	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 997	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 670	Pa
Vs en Directa =	0,999 992	V	t_{SCM} =	25,00	° C	p_{SCM} =	93 680	Pa
Vs en Directa =	0,999 990	V	t_{SCM} =	25,02	° C	p_{SCM} =	93 690	Pa
Vs en Inversa =	-0,999 998	V	t_{SCM} =	25,01	° C	p_{SCM} =	93 700	Pa

V_X en Inversa =	-1,000 003	V	t_{XCM} =	23,05	° C	p_{XCM} =	94 530	Pa
V_X en Directa =	1,000 004	V	t_{XCM} =	23,05	° C	p_{XCM} =	94 540	Pa

V_X =	1,000 003 0	V	t_{XCM} =	23,050	° C	p_{XCM} =	94 513	Pa
V_S =	0,999 994 3	V	t_{SCM} =	25,010	° C	p_{SCM} =	93 685	Pa

Para el ciclo *i* = 10 se han apuntado los siguientes datos de medida y calculado los valores medios:

V_X en Directa =	1,000 007	V	t_{XCM} =	23,01	° C	p_{XCM} =	94 410	Pa
V_X en Inversa =	-1,000 003	V	t_{XCM} =	23,02	° C	p_{XCM} =	94 410	Pa
V_S en Inversa =	-0,999 996	V	t_{SCM} =	25,03	° C	p_{SCM} =	93 590	Pa
V_S en Directa =	0,999 992	V	t_{SCM} =	25,04	° C	p_{SCM} =	93 600	Pa
V_S en Directa =	0,999 991	V	t_{SCM} =	25,02	° C	p_{SCM} =	93 610	Pa
V_S en Inversa =	-0,999 996	V	t_{SCM} =	25,04	° C	p_{SCM} =	93 620	Pa
V_X en Inversa =	-1,000 003	V	t_{XCM} =	23,01	° C	p_{XCM} =	94 450	Pa
V_X en Directa =	1,000 005	V	t_{XCM} =	23,00	° C	p_{XCM} =	94 460	Pa

V_X =	1,000 004 5	V	t_{XCM} =	23,010	° C	p_{XCM} =	94 433	Pa
V_S =	0,999 993 8	V	t_{SCM} =	25,033	° C	p_{SCM} =	93 605	Pa

La ecuación:

$$R_{XCR} = \frac{V_X}{V_S} \bullet R_{SCR} \frac{1+\alpha_S\,(t_{SCM}-t_{SCR})+\beta_S(t_{SCM}-t_{SCR})^2+\gamma_S\,(p_{SCM}-p_{SCR})}{1+\alpha_X(t_{XCM}-t_{XCR})+\beta_X(t_{XCM}-t_{XCR})^2+\gamma_X(p_{XCM}-p_{XCR})} \qquad (41)$$

en ésta calibración es:

$$R_{XCR} = \frac{V_X}{V_S} \cdot \frac{10\,000{,}0047\cdot(1+0{,}05\cdot10^{-6}\,(t_{SCM}-23)-0{,}025\cdot10^{-6}(t_{SCM}-23)^2)}{1+0{,}03\cdot10^{-6}(t_{XCM}-25)-0{,}05\cdot10^{-6}(t_{XCM}-25)^2+0{,}03\cdot10^{-9}(p_{XCM}-101\ 325)}\ \Omega \qquad (42)$$

Para cada ciclo *i* se presentan los resultados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados para cada ciclo i

i	R_{XCR} (Ω)	*V*x (V)	*V*s (V)	t_{XCM} (°C)	t_{SCM} (°C)	p_{XCM} (Pa)	p_{SCM} (Pa)
1	10 000,098	1,000 003 8	0,999 994 5	23,020	25,015	94 345	93 523
2	10 000,082	1,000 003 0	0,999 995 3	23,020	25,030	94 453	93 625
3	10 000,080	1,000 003 3	0,999 995 8	23,030	25,040	94 523	93 695
4	10 000,100	1,000 002 8	0,999 993 3	23,018	25,010	94 473	93 645
5	10 000,100	1,000 003 8	0,999 994 3	23,018	25,033	94 393	93 565
6	10 000,087	1,000 003 0	0,999 994 8	23,023	25,018	94 313	93 485
7	10 000,070	1,000 002 5	0,999 996 0	23,028	25,018	94 493	93 665
8	10 000,068	1,000 002 8	0,999 996 5	23,030	25,003	94 563	93 735
9	10 000,092	1,000 003 0	0,999 994 3	23,050	25,010	94 513	93 685
10	10 000,112	1,000 004 5	0,999 993 8	23,010	25,033	94 433	93 605

El valor que se le asigna a la resistencia patrón a calibrar, R_{XCR}, será el valor medio de los n = 10 ciclos de medida: $R_{XCR} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{R_{XCR}]_i}{n} =$ 10 000,09 Ω, con una desviación típica experimental de la media $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (R_{XCR}]_i - R_{XCR})^2}{n \cdot (n-1)}}$ =0,004 5 Ω.

Calculamos $\bar{t}_{XCM} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{t_{XCM}]_i}{n}$ = 23,025 °C, con desviación típica experimental de la media de 0,003 °C.

Calculamos $\bar{p}_{XCM} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_{XCM}]_i}{n}$ = 94 450 Pa, con desviación típica experimental de la media de 25 Pa.

Calculamos $\bar{t}_{\text{SCM}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{t_{\text{SCM}}]_i}{n}$ = 25,021 °C con desviación típica experimental de la media de 0,004 °C.

Calculamos $\bar{p}_{\text{SCM}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_{\text{SCM}}]_i}{n}$ = 93 623 Pa con desviación típica experimental de la media de 25 Pa.

Con ayuda de todo lo expuesto en el punto 6.1 del procedimiento y siguiendo la Tabla 1, a modo de resumen, se calculan y estiman todas las componentes de incertidumbre en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen contribuciones de todas las incertidumbres

Magnitud	Estimación de la incertidumbre	Incertidumbre típica	Coeficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre típica
$R_{XCR}]_i$		$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n}(R_{XCR}]_i - R_{XCR})^2}{n\cdot(n-1)}}$	1	$u_A(R_{XCR}]_i)$
V_X	δV_X	$\frac{\delta V_X}{\sqrt{3}}$	$c_1 = \frac{1}{V_S}\cdot R_{SCR}$	$c_1\cdot u(V_X)$
V_S	δV_S	$\frac{\delta V_S}{\sqrt{3}}$	$c_2 = -\frac{V_X}{V_S^2}\cdot R_{SCR}$	$c_2\cdot u(V_S)$
R_{SCR}	δR_{SCR}	$\frac{\delta R_{SCR}}{k}$	$c_3 = \frac{V_X}{V_S}$	$c_3\cdot u(R_{SCR})$
$\bar{t}_{SCM}$	$\delta\bar{t}_{SCM}$	$\frac{\delta\bar{t}_{SCM}}{\sqrt{3}}$	$c_4 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\alpha_S + 2\beta_S(\bar{t}_{SCM} - t_{SCR}))$	$c_4\cdot u(\bar{t}_{SCM})$
$\bar{p}_{SCM}$	$\delta\bar{p}_{SCM}$	$\frac{\delta\bar{p}_{SCM}}{\sqrt{3}}$	$c_5 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot\gamma_S$	$c_5\cdot u(\bar{p}_{SCM})$
α_S	$\delta\alpha_S$	$\frac{\delta\alpha_S}{\sqrt{3}}$	$c_6 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{t}_{SCM} - t_{SCR})$	$c_6\cdot u(\alpha_S)$
β_S	$\delta\beta_S$	$\frac{\delta\beta_S}{\sqrt{3}}$	$c_7 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{t}_{SCM} - t_{SCR})^2$	$c_7\cdot u(\beta_S)$
γ_S	$\delta\gamma_S$	$\frac{\delta\gamma_S}{\sqrt{3}}$	$c_8 = \frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{p}_{SCM} - p_{SCR})$	$c_8\cdot u(\gamma_S)$
$\bar{t}_{XCM}$	$\delta\bar{t}_{XCM}$	$\frac{\delta\bar{t}_{XCM}}{\sqrt{3}}$	$c_9 = -\frac{V_X}{V_S}R_{SCR}(\alpha_X + 2\beta_X(\bar{t}_{XCM} - t_{XCR}))$	$c_9\cdot u(\bar{t}_{XCM})$
$\bar{p}_{XCM}$	$\delta\bar{p}_{XCM}$	$\frac{\delta\bar{p}_{XCM}}{\sqrt{3}}$	$c_{10} = -\frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot\gamma_X$	$c_{10}u(\bar{p}_{XCM})$
α_X	$\delta\alpha_X$	$\frac{\delta\alpha_X}{\sqrt{3}}$	$c_{11} = -\frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{t}_{XCM} - t_{XCR})$	$c_{11}\cdot u(\alpha_X)$
β_X	$\delta\beta_X$	$\frac{\delta\beta_X}{\sqrt{3}}$	$c_{12} = -\frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{t}_{XCM} - t_{XCR})^2$	$c_{12}\cdot u(\beta_X)$
γ_X	$\delta\gamma_X$	$\frac{\delta\gamma_X}{\sqrt{3}}$	$c_{13} = -\frac{V_X}{V_S}\cdot R_{SCR}\cdot(\bar{p}_{XCM} - p_{XCR})$	$c_{13}\cdot u(\gamma_S)$

- Para la tensión en la resistencia objeto de la calibración, δV_X se obtiene a partir de la combinación cuadrática de la incertidumbre de la calibración del voltímetro y de su resolución, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir δV_X =

$\sqrt{7^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} \cdot 10^{-6}$ $\approx 7 \cdot 10^{-6}$ V $\Rightarrow$ $u(V_X) = \frac{\delta V_X}{\sqrt{3}}$ $\approx 4 \cdot 10^{-6}$ V y como $c_1 = \frac{1}{V_S} \cdot R_{SCR} \approx 10\ 000$ Ω/V $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_1 \cdot u(V_X)$ es 0,004 Ω.

- Para la tensión en la resistencia de referencia, δV_S se obtiene a partir de la combinación cuadrática de la incertidumbre de la calibración del voltímetro y de su resolución, y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir δV_S = $\sqrt{7^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} \cdot 10^{-6}$ $\approx 7 \cdot 10^{-6}$ V $\Rightarrow$ $u(V_S) = \frac{\delta V_S}{\sqrt{3}}$ $\approx 4 \cdot 10^{-6}$ V y como $c_2 = -\frac{V_X}{V_S^2} \cdot R_{SCR}$ $\approx$ -10 000 Ω/V $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_2\ u(V_S)$ es -0,004 Ω.

- Para la resistencia de referencia, δR_{SCR} se obtiene a partir de su certificado de calibración y deriva para un nivel de confianza de k en una distribución de probabilidad normal, $\delta R_{SCR} = 2 \cdot 10^7 \cdot R_{SCR}$ = 0,002 Ω para un $k = 2$ $\Rightarrow$ $u(R_{SCR}) = \frac{\delta R_{SCR}}{k} = 0{,}001$ Ω y $c_3 = \frac{V_X}{V_S} = 1$ $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_3 \cdot u(R_{SCR})$ es 0,001 Ω.

- Para la temperatura en la resistencia de referencia $\delta \bar{t}_{SCM}$ se obtiene a partir de la combinación cuadrática de su certificado de calibración (0,05 °C para k = 1), resolución (0,01 °C) y desviación típica experimental de la media (0,003 ºC), y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir:

$\delta\,\bar{t}_{\mathrm{SCM}} = \sqrt{(0{,}05)^2 + \left(0{,}01/2\right)^2 + (0{,}003)^2}$ °C ≅ 0,05 °C ⇒ $u(\bar{t}_{\mathrm{SCM}})=$ $\dfrac{\delta\,\bar{t}_{\mathrm{SCM}}}{\sqrt{3}}$ =0,03 °C, y $c_4 = \dfrac{V_{\mathrm{X}}}{V_{\mathrm{S}}} \cdot R_{\mathrm{SCR}}(\alpha_{\mathrm{S}} + 2\beta_{\mathrm{S}}(\bar{t}_{\mathrm{SCM}} - t_{\mathrm{SCR}}))$ ≅[(1/1)10 000(0,05-2·0,025(25,021-25))]10^{-6} Ω/°C = 0,000 5 Ω/°C ⇒ La contribución a la incertidumbre típica $c_4 \cdot u(\bar{t}_{\mathrm{SCM}})$ es 0,000 015 Ω, despreciable.

- Para la presión en la resistencia de referencia $\delta\,\bar{p}_{\mathrm{SCM}}$ se obtiene a partir de la combinación cuadrática de su certificado de calibración (100 Pa para *k* = 2), resolución (1 Pa) y desviación típica experimental de la media (25 Pa), y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir $\delta\,\bar{p}_{\mathrm{SCM}} = \sqrt{(100/2)^2 + \left(1/2\right)^2 + (25)^2}$ Pa ≅ 56 Pa ⇒ $u(\bar{p}_{\mathrm{SCM}})=$ $\dfrac{\delta\,\bar{p}_{\mathrm{SCM}}}{\sqrt{3}}$ =33 Pa, y como $c_5 = \dfrac{V_{\mathrm{X}}}{V_{\mathrm{S}}} \cdot R_{\mathrm{SCR}} \cdot \gamma_{\mathrm{S}} \cong 0$ ⇒ La contribución a la incertidumbre típica $c_5 \cdot u(\bar{p}_{\mathrm{SCM}})$ es nula.

- Para el coeficiente lineal de temperatura en la resistencia de referencia, $\delta\alpha_{\mathrm{S}}$ se obtiene a partir de la incertidumbre que nos proporciona el fabricante de la resistencia patrón o el laboratorio y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir:

  $\delta\alpha_{\mathrm{S}}$ = 0,02·10^{-6} /ºC ⇒ $u(\alpha_{\mathrm{S}})= \dfrac{\delta\,\alpha_{\mathrm{S}}}{\sqrt{3}}$ =0,012·10^{-6} /°C y como

  $c_6 = \dfrac{V_{\mathrm{X}}}{V_{\mathrm{S}}} \cdot R_{\mathrm{SCR}} \cdot (\bar{t}_{\mathrm{SCM}} - t_{\mathrm{SCR}}) \approx$ 10 000·0,025 Ω·°C = 250 Ω·°C

  ⇒ La contribución a la incertidumbre típica $c_6 \cdot u(\alpha_{\mathrm{S}})$ = 250·0,012·10^{-6} Ω = 0,000 003 Ω es despreciable.

- Para el coeficiente cuadrático de temperatura en la resistencia de referencia, $\delta\beta_{\mathrm{S}}$ se obtiene a partir de la incertidumbre que nos proporciona el fabricante de la resistencia patrón o el laboratorio y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir $\delta\beta_S$ = 0,003·10^{-6} /°C^2 $\Rightarrow$ $u(\beta_S)= \dfrac{\delta\beta_S}{\sqrt{3}}$ =0,002·10^{-6} /°C^2 y como $c_7 = \dfrac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\bar{t}_{SCM} - t_{SCR})^2$ ≈ 10 000·(0,025)^2 Ω·°C^2 = 6,25 Ω·°C^2 $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_7 \cdot u(\beta_S)$ = 6,25·0,002·10^{-6} Ω es despreciable.

- Para el coeficiente de presión en la resistencia de referencia, $\delta\gamma_S$ se obtiene a partir de la incertidumbre que nos proporciona el fabricante de la resistencia patrón o el laboratorio y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir $\delta\gamma_S$ = 0 $\Rightarrow$ $u(\gamma_S)= \dfrac{\delta\alpha_S}{\sqrt{3}}$ =0 y aunque $c_8 = \dfrac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\bar{p}_{SCM} - p_{SCR})$ = 77 020 000 Ω·Pa tiene un valor significativo $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_8 \cdot u(\gamma_S)$ es nula.

- Para la temperatura en la resistencia objeto de la calibración $\delta\bar{t}_{XCM}$ se obtiene a partir de la combinación cuadrática de su certificado de calibración (0,05 °C para k = 1), resolución (0,01 °C) y desviación típica experimental de la media (0,004 °C), y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir

  $\delta\bar{t}_{XCM} = \sqrt{(0{,}05)^2 + \left(0{,}01/2\right)^2 + (0{,}004)^2}$ °C ≈ 0,05 °C $\Rightarrow$ $u(\bar{t}_{XCM})= \dfrac{\delta\bar{t}_{XCM}}{\sqrt{3}}$ =0,03 °C, y $c_9 = \dfrac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR}(\alpha_X + 2\beta_X(\bar{t}_{XCM} - t_{XCR})) \approx$ [(1/1)10 000(0,03-2·0,05(23,025-23))]10^{-6} Ω/°C ≈ 0,000 3 Ω/°C $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_9 \cdot u(\bar{t}_{SCM})$ es 0,000 009 Ω, despreciable.

- Para la presión en la resistencia objeto de la calibración ……

$\delta \bar{p}_{\text{XCM}}$ se obtiene a partir de la combinación cuadrática de su certificado de calibración (100 Pa para k=2), resolución (1 Pa) y desviación típica experimental de la media (25 Pa), y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular simétrica, es decir:

$\delta \bar{p}_{\text{XCM}} = \sqrt{(100/2)^2 + \left(1/2\right)^2 + (25)^2}$ Pa $\cong$ 56 Pa $\Rightarrow$ $u(\bar{p}_{\text{XCM}}) = \frac{\delta \bar{p}_{\text{XCM}}}{\sqrt{3}}$ =33 Pa, y $c_{10} = \frac{V_{\text{X}}}{V_{\text{S}}} \cdot R_{\text{SCR}} \cdot \gamma_{\text{X}} \approx$ $((1/1)10\,000 \cdot 3)10^{-9}$ Ω/Pa = 0,000 03 Ω/Pa $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_{10} \cdot u(\bar{p}_{\text{XCM}}) \approx 0{,}001\ \Omega$.

- Para el coeficiente lineal de temperatura en la resistencia objeto de la calibración, $\delta\alpha_{\text{X}}$ se obtiene a partir de la incertidumbre que nos proporciona el fabricante de la resistencia patrón o el laboratorio y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir $\delta_{\text{x}} = 0{,}01 \cdot 10^{-6}$ /°C $\Rightarrow$ $u(\alpha_{\text{X}}) = \frac{\delta \alpha_{\text{X}}}{\sqrt{3}}$ =0,006·10^{-6} /°C y como $c_{11} = -\frac{V_{\text{X}}}{V_{\text{S}}} \cdot R_{\text{SCR}} \cdot (\bar{t}_{\text{XCM}} - t_{\text{XCR}}) \approx -10\,000 \cdot 0{,}021$ Ω·°C = -210 Ω·°C $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_{11} \cdot u(\alpha_{\text{X}})$ = $-210 \cdot 0{,}006 \cdot 10^{-6}\ \Omega = 0{,}000\,001\,3\ \Omega$ es despreciable.

- Para el coeficiente cuadrático de temperatura en la resistencia objeto de la calibración, $\delta\beta_{\text{X}}$ se obtiene a partir de la incertidumbre que nos proporciona el fabricante de la resistencia patrón o el laboratorio y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir: $\delta\beta_{\text{X}} = 0{,}01 \cdot 10^{-6}$ /°C^2 $\Rightarrow$ $u(\beta_{\text{X}}) = \frac{\delta \beta_{\text{X}}}{\sqrt{3}} \approx 0{,}006 \cdot 10^{-6}$ /°C^2 y como $c_{12} = -\frac{V_{\text{X}}}{V_{\text{S}}} \cdot R_{\text{SCR}} \cdot (\bar{t}_{\text{XCM}} - t_{\text{XCR}})^2 \approx -10\,000 \cdot (0{,}021)^2$ Ω·°C^2 = 4,41 Ω·°C^2 $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_{12} \cdot u(\beta_{\text{X}}) = 4{,}41 \cdot 0{,}006 \cdot 10^{-6}\ \Omega$ es despreciable.

- Para el coeficiente de presión en la resistencia objeto de la calibración, $\delta\gamma_X$ se obtiene a partir de la incertidumbre que nos proporciona el fabricante de la resistencia patrón o el laboratorio y que se considera como una distribución de probabilidad rectangular y simétrica, es decir:

  $\delta\gamma_X$ = 0,01·10^{-9}/Pa $\Rightarrow$ $u(\gamma_X) = \dfrac{\delta\gamma_X}{\sqrt{3}}$ =0,006·10^{-9}/Pa y como $c_{13} = -\dfrac{V_X}{V_S} \cdot R_{SCR} \cdot (\bar{p}_{XCM} - p_{XCR})$ = 68 740 000 Ω·Pa $\Rightarrow$ La contribución a la incertidumbre típica $c_{13} \cdot u(\gamma_X)$ =0,000 7 Ω.

De forma resumida, se presenta la tabla 4.

Tabla 4. Resumen final de todas las contribuciones a la incertidumbre

Magnitud	Estimación	Incertidumbre típica	Coeficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre típica
$R_{XCR}]_i$		0,0045 Ω		0,0045 Ω
V_X	7·10^{-6} V	4·10^{-6} V	10 000 Ω/V	0,004 Ω
V_S	7·10^{-6} V	4·10^{-6} V	-10 000 Ω/V	-0,004 Ω
R_{SCR}	0,002 Ω	0,001 Ω	1	0,001 Ω
$\bar{t}_{SCM}$	0,05 ºC	0,03 °C	0,0005 Ω/°C	despreciable
$\bar{p}_{SCM}$	56 Pa	33 Pa	0	0
α_S	0,02·10^{-6} /ºC	0,012·10^{-6} /°C	250 Ω·°C	despreciable
β_S	003·10^{-6} /ºC^2	0,002·10^{-6} /°C^2	6,25 Ω·°C^2	despreciable
γ_S	0	0	-77 020 000 Ω·Pa	0
$\bar{t}_{XCM}$	0,05 ºC	0,03 °C	0,0003 Ω/°C	despreciable
$\bar{t}_{XCM}$	56 Pa	33 Pa	0,0003 Ω/Pa	0,001 Ω
α_X	0,01·10^{-6}/°C	0,006·10^{-6}/°C	-210 Ω·°C	despreciable
β_X	0,01·10^{-6} /°C^2	0,006·10^{-6} /°C^2	4,41 Ω·°C^2	despreciable
γ_X	0,01·10^{-9}/Pa	0,006·10^{-9}/Pa	68 740 000 Ω·Pa	0,0007 Ω

Y con la ecuación:

$$
\begin{aligned}
u^2(R_{XCR}) = {} & u_A^2(R_{XCR}]_i) + c_1^2 \cdot u^2(V_X) + c_2^2 \cdot u^2(V_S) + c_3^2 \cdot u^2(R_{SCR}) + c_4^2 \cdot u^2(\bar{t}_{SCM}) + \\
& + c_5^2 \cdot u^2(\bar{p}_{SCM}) + c_6^2 \cdot u^2(\alpha_S) + c_7^2 \cdot u^2(\beta_S) + c_8^2 \cdot u^2(\gamma_S) + c_9^2 \cdot u^2(\bar{t}_{XCM}) + \\
& + c_{10}^2 \cdot u^2(\bar{p}_{XCM}) + c_{11}^2 \cdot u^2(\alpha_X) + c_{12}^2 \cdot u^2(\beta_X) + c_{13}^2 \cdot u^2(\gamma_X)
\end{aligned}
\tag{43}
$$

se obtiene $u(R_{XCR})$= 0,007 4 Ω.

En este caso como todas las componentes son del mismo orden de magnitud y dominan los componentes de tipo B, se puede suponer que los grados de libertad efectivos ν_{eff} es muy alto y entonces k = 2. Se calcula entonces la incertidumbre expandida a partir de la incertidumbre combinada, multiplicando esta última por el factor de cobertura k = 2 corresponde a un intervalo de confianza del 95 % según la distribución de Student:

$$U(R_{\mathrm{XCR}}) = 2 \cdot u(R_{\mathrm{XCR}}) \approx 0{,}02\ \Omega.$$

Como resultado de la calibración se obtiene: R_{XCR} = 10 000,09 Ω ± 0,02 Ω para k = 2.

NIPO: 074-12-010-7