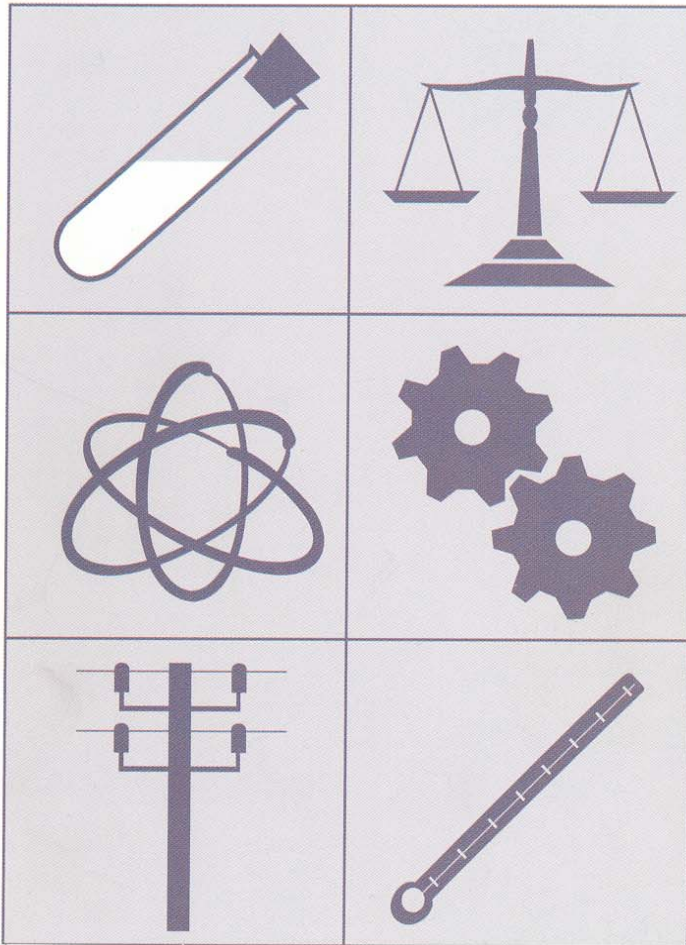


# Metrología

## PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



### PROCEDIMIENTO EL- 006 PARA LA CALIBRACIÓN DE SHUNTS DE CORRIENTE CONTINUA

m 10

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

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

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

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

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



## ÍNDICE

	Página
1. OBJETO .....	4
2. ALCANCE .....	4
3. DEFINICIONES .....	4
4. GENERALIDADES .....	10
5. DESCRIPCIÓN.....	11
5.1. Equipos y materiales .....	11
5.2. Operaciones previas .....	12
5.3. Proceso de calibración .....	14
5.4. Toma y tratamiento de datos.....	16
6. RESULTADOS .....	17
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	17
6.2. Interpretación de resultados.....	30
7. REFERENCIAS .....	30
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración .....	30
7.2. Otras referencias para consulta .....	30
8. ANEXO .....	31



## 1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer la técnica necesaria para realizar la calibración de shunts de corriente continua [2] (06.01) por el método I-V.

## 2. ALCANCE

El ámbito de aplicación de este procedimiento es la calibración de shunts de corriente continua mediante la medida de la caída de tensión en el mismo cuando lo atraviesa a una intensidad de c.c. conocida. Se aplicará tanto a los shunts diseñados específicamente para uso en corriente continua como a la determinación del valor en corriente continua de los que hayan sido diseñados para uso en alterna, tanto pasivos como activos.

Si la incertidumbre de la fuente de intensidad de c.c. y del voltímetro no son adecuadas para calibrar el shunt, éste debe calibrarse usando puentes de resistencia o el método potenciométrico. Estos métodos no se describen aquí.

## 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].

Ajuste (de un sistema de medida) [1] (3.11)

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



NOTA 1 Distintos tipos de ajustes de un sistema de medida son el ajuste de cero, el ajuste del *offset* y el ajuste de la amplitud de la escala (llamado a veces ajuste de ganancia)

NOTA 2 No debe confundirse el ajuste de un sistema de medida con su propia calibración, que es un requisito para el ajuste.

NOTA 3 Después del ajuste, generalmente un sistema de medida debe ser calibrado nuevamente.

### Amplificador de transconductancia [2] (07.10):

Instrumento con capacidad para generar intensidades elevadas en corriente continua (c.c.) y en corriente alterna (c.a.), que puede diseñarse como un instrumento independiente o adicional a un calibrador multifunción. En ambos casos su funcionamiento es el mismo, convierte la tensión aplicada a sus terminales, bien de c.c. o de c.a., en una corriente directamente proporcional a dicha tensión y del mismo tipo, constituyendo, en resumen, un convertidor tensión - intensidad.

### Calibración [1] (2.39)

Operación que bajo condiciones especificadas, establece en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas, y 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 un ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente, auto-calibración, ni con una verificación de la calibración.



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

#### Calibrador multifunción [2] (13.10):

Instrumento que suministra en sus bornes de salida distintos rangos de las magnitudes básicas eléctricas, tensión continua, intensidad continua, tensión alterna, intensidad alterna, y resistencia, que son necesarias para la calibración de multímetros digitales y analógicos, así como de otros instrumentos eléctricos de aplicación más específicos.

#### Fuente de intensidad de corriente continua [2] (06.02):

Instrumento diseñado como generador de intensidad constante que proporciona intensidades de corriente continua sobre un margen determinado con exactitud elevada.

#### NOTA

Específicamente para este procedimiento, cuando se utilice esta expresión se puede estar haciendo referencia a una fuente de intensidad de corriente continua en sentido estricto, a un calibrador multifunción trabajando en su función de intensidad de corriente continua o al conjunto formado por un calibrador y un amplificador de transconductancia. Aunque se trata de instrumentos distintos, cuando se configuran en estos modos de funcionamiento puede considerarse que cumplen esta definición.

#### Shunt activo de corriente alterna y corriente continua [2] (07.02):

Instrumento utilizado para la medida precisa de intensidad de corriente alterna. Se diferencian de los shunt pasivos en que disponen de un amplificador interno que les permite conectar a su través cargas de impedancia muy baja tales como un convertidor térmico.

#### Shunt pasivo de corriente continua [2] (06.01):

Elemento pasivo diseñado para la medida de intensidad de corriente continua de manera precisa. Están construidos como elementos de



cuatro terminales, separando de esta forma los terminales de intensidad de corriente  $I_1$  e  $I_2$ , y de tensión  $V_1$  y  $V_2$ , y anulando así la influencia de la caída de tensión en los cables de conexión que, dados los valores elevados de intensidad de corriente que manejan estos instrumentos, puede ser de consideración.

#### Shunt pasivo de corriente alterna [2] (07.01):

Instrumento utilizado para la medida precisa de intensidad de corriente alterna. Se diseñan como elementos puramente resistivos con valores de reactancia lo más pequeños posibles en todo el margen de frecuencia cubierto. Están contruidos como elementos de cuatro terminales, separando de esta forma los terminales de intensidad de corriente  $I_1$  e  $I_2$ , y de tensión  $V_1$  y  $V_2$ , y anulando así la influencia de la caída de tensión en los cables de conexión.

#### Potenciómetro de corriente continua [2] (04.10):

Instrumento de medida de tensión por comparación con una fuente de tensión conocida mediante detectores que indican el equilibrio o condición de no paso de corriente, presentando en esta circunstancia una impedancia infinita.

#### Voltímetro digital de c.c. [2]:

Instrumento que convierte las señales analógicas de tensión en presentaciones digitales o tensiones de salida codificadas, que pueden emplearse en procesos automáticos de registro o de control.

#### Desviación típica experimental [1] (3.8)

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.

#### NOTAS

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

#### Error (de indicación) de un instrumento de medida [1] (5.20)

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] (3.9)

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 estándar experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones estándar, 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.

### Resolución (de un dispositivo visualizador) [1] (5.12)

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] (6.10)



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.

#### NOTAS

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

## 4. GENERALIDADES

Un shunt de corriente continua es un instrumento cuya función es permitir que se pueda calcular una intensidad desconocida de corriente continua en a través de una medida de tensión eléctrica.

Para mayor precisión, los shunts siempre están contruidos a cuatro terminales; a través de dos de estos terminales se conecta la fuente de intensidad de corriente a medir y la tensión se mide con un voltímetro de corriente continua conectado a los otros dos. En el instrumento debe estar indicado claramente cuáles son los terminales de entrada de intensidad y cuáles son los terminales de toma de tensión.

Como un shunt de corriente continua es, esencialmente, una resistencia, se puede calibrar por cualquiera de los métodos bien conocidos de calibración de resistencias. El método elegido para este procedimiento es el método I-V, consistente en aplicar una intensidad de corriente continua conocida y medir la caída de tensión generada. Los diferentes tipos de voltímetros analógicos no tienen exactitud suficiente para esta aplicación, por lo que para la medida de tensión se debe emplear un voltímetro digital o un potenciómetro.

Debe calibrarse el shunt a varios valores diferentes de intensidad dentro de su margen de utilización, para evaluar los posibles errores por autocalentamiento.



Aunque en la Clasificación de Instrumentos de Metrología Eléctrica [2] se habla de instrumentos (voltímetro, amperímetro, ohmímetro, multímetro) numéricos, en este procedimiento se utiliza 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, preferentemente con los nombres castellanizados aceptados por la Real Academia Española de la Lengua, que son los más empleados.

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

Para la intensidad de corriente: ampere o amperio, (símbolo: A)

Para la resistencia eléctrica: ohm u ohmio, (símbolo:  $\Omega$ )

## 5. DESCRIPCIÓN

### 5.1. Equipos y materiales

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

- Una fuente de intensidad de corriente continua. Esta fuente debe ser capaz de generar el margen de intensidades de corriente para los que se vaya a emplear el shunt. La fuente de intensidad continua puede ser sustituida por un calibrador multifunción en su función de intensidad continua. Si el shunt a calibrar trabaja en intensidades altas puede ser necesario emplear en su lugar un amplificador de transconductancia controlado por un calibrador de tensión continua (o por un calibrador multifunción en su función de tensión continua) para generar las corrientes requeridas. Como ya se ha indicado en el apartado de Definiciones, todas estas combinaciones de instrumentos se designarán simplemente como fuente de intensidad de c.c.



- Si no se puede invertir la polaridad de la fuente, será necesario también un conmutador inversor, manual o automático, que soporte la intensidad a manejar. Su resistencia de contacto debe ser lo suficientemente baja para que la caída de tensión en él sumada a las caídas en el shunt y en los cables no supere el límite de tensión en la fuente. Asimismo, su resistencia de aislamiento debe ser lo suficientemente alta para que la corriente que se derive a su través no sea significativa comparada con la que pasa por el shunt.
- Un medidor de tensión continua de gran exactitud que puede ser un potenciómetro de corriente continua o un voltímetro digital. Así mismo, este instrumento puede ser un multímetro digital trabajando en su función de tensión continua. Como en el caso anterior, se usará el término voltímetro para cubrir todas estas posibilidades.

La incertidumbre combinada de los dos instrumentos debería ser, como mínimo, tres veces menor que la tolerancia permitida para el shunt en la calibración.

## 5.2. Operaciones previas

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

- a) Se comprobará que el shunt está identificado 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 del shunt, si fuese necesario, para que la persona que realice la calibración conozca su manejo.
- c) Se fijará cuál es la tolerancia de calibración admisible para el shunt, pudiendo estar determinada de acuerdo con las



especificaciones del fabricante, o en función de la aplicación concreta para la que esté destinado.

- d) Se dispondrá del manual de instrucciones del voltímetro y de la fuente de intensidad, y la persona que realice la calibración estará familiarizada con el manejo de ambos instrumentos.
- e) Se comprobará el estado de calibración de la fuente y del voltímetro: existencia de certificados de calibración en vigor de ambos instrumentos, y si tales certificados garantizan la trazabilidad e incertidumbre apropiadas a las medidas necesarias para esta calibración.
- f) Se comprobará que el valor nominal de la tensión de alimentación y las posibles variaciones son adecuadas para el funcionamiento de la fuente y del voltímetro. Normalmente una tensión de  $220\text{ V} \pm 10\%$  es adecuada para el funcionamiento de la mayoría de los instrumentos de medida. En todo caso, se deberán consultar los manuales de instrucciones de los dos instrumentos para asegurar los límites tolerables. En ocasiones, el shunt puede incluir un refrigerador que también requiera alimentación a la red.
- g) Se conectarán a la red de alimentación eléctrica la fuente de intensidad y el voltímetro (y el shunt, si incluye refrigerador eléctrico), 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 los manuales de los instrumentos.
- h) La calibración se realizará manteniendo una temperatura adecuada para el shunt y para los patrones utilizados de acuerdo con lo que indican sus manuales; esta temperatura puede estar comprendida entre  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  que es el margen normal en el que los instrumentos de Metrología Eléctrica mantienen sus especificaciones. Es posible realizar la calibración a temperaturas distintas de las anteriormente indicadas, pero en este caso será necesario tener en cuenta



este hecho en la asignación de incertidumbres de calibración, considerando los coeficientes de temperatura de todos los instrumentos.

- i) La humedad relativa no debe superar los límites establecidos en los manuales de los equipos que intervienen en la calibración. El valor máximo recomendado puede ser el 70 %, aunque en algunos casos es posible admitir valores de hasta el 80 % o superiores.
- j) Se comprobará que los equipos que requieran conexión a red están conectados a enchufes que incluyan un conductor de tierra como medida elemental de protección.
- k) Si el shunt incluye fusibles de protección contra sobrecorrientes, debe comprobarse que no estén fundidos. Si el instrumento no tiene tales fusibles, deben tomarse precauciones para evitar intensidades excesivas de corriente.
- l) Se verificará si los cables de intensidad pueden soportar la intensidad máxima que se vaya a aplicar al shunt durante la calibración. Normalmente estará indicado en las especificaciones del cable o en el catálogo del fabricante.
- m) Utilizar cables con terminales o bananas que una vez introducidas en las bornes correspondientes estén aislados, tanto térmica como eléctricamente.
- n) Antes de realizar cualquier conexión eléctrica a los bornes de la fuente, comprobar que no hay señal de intensidad y que la fuente está inactiva (indicador STANDBY o similar). Debe estar también en ese mismo estado cuando esté en abierto o desconectada del shunt.

### 5.3. Proceso de calibración

#### 5.3.1. Puntos de medida

Se recomienda medir la resistencia del shunt en, al menos, tres puntos:

El punto más bajo debe ser la menor intensidad a la que se prevea emplear el shunt, que normalmente es la intensidad máxima del shunt disponible con rango inmediatamente inferior o, si ésta no se conoce una intensidad de aproximadamente el 10 % de la nominal del shunt. El punto más alto será una intensidad próxima a la nominal o máxima del shunt. Además, se medirá en un punto intermedio entre los dos extremos.

Por ejemplo, si el shunt a calibrar alcanza una intensidad máxima de 100 A, y no se va a usar para intensidades menores de 10 A porque se dispone de otro shunt de dicho valor nominal, unos puntos adecuados para la calibración serían 10 A, 50 A y 100 A.

### 5.3.2. Conexiones y realización de las medidas

Se conectan los terminales de intensidad del shunt a los de salida de la fuente y los terminales de tensión a los terminales de entrada del voltímetro, siguiendo el esquema de la figura 1. La fuente debe mantenerse apagada o, si tiene la posibilidad, en espera (STANDBY) mientras se realizan las conexiones.

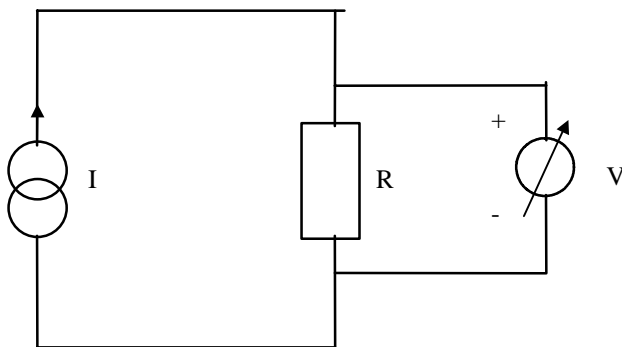


Figura 1



Cuando se hayan completado las conexiones, se ajusta la fuente a la corriente deseada y se pone en estado operativo. Se observan las indicaciones del voltímetro hasta que muestren únicamente una variación aleatoria y no una deriva constante. Entonces se toman 5 lecturas. El proceso se repite invirtiendo el sentido de la corriente. Se realizarán cinco grupos de medidas en directa (D) y otros tantos en inversa (I) según la secuencia: D-I-I-D-D-I-I-D-D-I.

#### 5.4. Toma y tratamiento de datos

Para cada punto de calibración se anotarán los siguientes datos:

- Intensidad de corriente generada por la fuente.
- Lecturas obtenidas en el voltímetro, tanto con polaridad directa como inversa de la fuente. Cada determinación del valor de la resistencia  $R$  del shunt se calculará a partir de la intensidad de corriente  $I$  generada por la fuente y la semidiferencia entre la indicación del voltímetro obtenida con polaridad directa y la conseguida con polaridad inversa. El valor de la resistencia  $R$  del shunt será el cociente entre la semidiferencia entre directa e inversa de las lecturas del voltímetro y la intensidad aplicada por la fuente. Una vez calculadas las cinco determinaciones del valor de la resistencia del shunt, se hallará la media aritmética y la desviación típica.
- Datos ambientales, especialmente temperatura y humedad.
- Configuración del voltímetro (rango de medida, número de dígitos, tiempo de integración, etc.).
- Configuración de la fuente (rango, número de dígitos).

La toma de datos se podrá realizar de forma manual o mediante ordenador y un bus de comunicación IEEE-488, RS232 o similares, que controle a los equipos, generalmente al voltímetro y,





a veces, también a la fuente. En este caso se deberá validar el programa informático utilizado antes de realizar la calibración de forma que se pueda asegurar que 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 EA-4/02 [3] y de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida editada por el Centro Español de Metrología [4]. En primer lugar se determinará la expresión de la magnitud de salida (que es el valor de la resistencia del shunt en cada punto de calibración), en función de las distintas magnitudes de entrada.

$$R = \frac{V}{I}$$

$V$  es la tensión que cae en el shunt pasivo;  $I$ , la intensidad de la corriente que circula a su través; y  $R$ , la magnitud que se desea determinar, esto es, la resistencia del shunt.

La ley de propagación de incertidumbres, considerando  $V$  e  $I$  como variables independientes, se escribe como:

$$u_B^2(R) = \left(\frac{\partial R}{\partial V}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{\partial R}{\partial I}\right)^2 u^2(I)$$

Lo que después de operar se transforma en:

$$u_B(R) = \sqrt{\frac{1}{I^2} u^2(V) + \frac{V^2}{I^4} u^2(I)}$$



O expresada en valores relativos:

$$\frac{u_B(R)}{R} = \sqrt{\frac{u^2(V)}{V^2} + \frac{u^2(I)}{I^2}}$$

Es decir, además de la componente tipo A de la incertidumbre debida a las distintas determinaciones de  $R$ , se debe considerar la contribución procedente del voltímetro -  $u(V)$  - y la proveniente de la fuente de corriente -  $u(I)$  -.

a) Contribución del voltímetro -  $u(V)$  -:

En cuanto al voltímetro, su contribución a la incertidumbre se desglosa como sigue:

$$V = V_i + \delta V_{cal} + \delta V_{der} + \delta V_{int} + \delta V_{res} + \delta V_{amb}$$

donde:

- $V_i$ : Lectura o indicación del voltímetro.
- $\delta V_{cal}$ : Corrección debida al error de calibración del voltímetro.
- $\delta V_{der}$ : Corrección debida a la deriva del voltímetro.
- $\delta V_{int}$ : Corrección por interpolación debida al error de ganancia del voltímetro.
- $\delta V_{res}$ : Corrección debida a la resolución finita del voltímetro.
- $\delta V_{amb}$ : Corrección debida a las condiciones ambientales que pueden afectar al voltímetro.

Las diferentes indicaciones  $V_i$  del voltímetro son las causantes de la incertidumbre debida a su repetitividad, la cual ya está recogida en la incertidumbre tipo A de la resistencia del shunt  $u_A(R)$ .

Por otra parte, la resistencia interna del voltímetro se supone lo bastante elevada para que no cause ningún error.



Aplicando la ley de propagación de incertidumbres, tomando estas contribuciones como independientes, se puede escribir:

$$u(V) = \sqrt{u_{\text{calibración}}^2(V) + u_{\text{deriva}}^2(V) + u_{\text{interpolación}}^2(V) + u_{\text{resolución}}^2(V) + u_{\text{ambiente}}^2(V)}$$

NOTA:

Existen dos planteamientos a la hora de considerar las correcciones de las tensiones leídas por el voltímetro ( $\delta V_{\text{cal}}$ ) indicadas en el certificado de calibración. El primero de ellos, aconsejado en la referencia [4] aunque más laborioso, consiste en aplicar en cada punto la corrección del error señalado en el certificado. El segundo planteamiento no realiza corrección alguna pero suma aritméticamente esta corrección no realizada a la incertidumbre con la consiguiente mayoración de ésta. De este modo, la incertidumbre expandida se escribiría como:  $U = ku_c + \delta V_{\text{cal}}$ . En el presente procedimiento se optará por la primera solución, aplicando a las lecturas obtenidas por el voltímetro la corrección pertinente obtenida del certificado de calibración.

$u_{\text{calibración}}$ : Esta componente se debe a la incertidumbre de calibración del voltímetro en el punto considerado. Normalmente procederá del certificado de calibración del instrumento. En dicho certificado aparecerá, para el punto de trabajo concreto, su incertidumbre expandida,  $U$ , o bien para un factor de cobertura  $k = 2$  y un nivel de confianza del 95,45 %, o bien para  $k = 1,96$  y un nivel de confianza del 95 %, siempre que se supongan distribuciones de probabilidad normales o de Gauss. En cualquier caso:

$$u_{\text{calibración}} = \frac{U}{k}$$

NOTA:

Si en el certificado de calibración no aparece el punto de trabajo considerado, se tomará como incertidumbre la mayor de todas las que aparezcan dentro de la escala utilizada.



*U<sub>deriva</sub>*: Incertidumbre debida a la variación que, a partir del tiempo en el que se realizó la última calibración del voltímetro, puede experimentar la tensión leída para un mismo estímulo en la entrada. Se estimará a partir de los datos históricos que se posean del equipo. En caso de carecer de ellos, y como solución menos recomendable, puede acudirse para estimar la deriva a los errores máximos que los fabricantes suelen presentar en sus especificaciones. Dichos errores varían en función del período de tiempo considerado (un día, un mes, tres meses, un año, etcétera) y observando dicha variación se puede calcular la deriva máxima del instrumento. Si se dispone del historial del voltímetro, puede obtenerse una cota superior de esta contribución a partir de la deriva máxima observada entre dos calibraciones consecutivas del equipo y asumir una distribución de probabilidad rectangular.

$$u_{deriva} = \frac{deriva}{\sqrt{3}}$$

*U<sub>interpolación</sub>*: En ocasiones puede ocurrir que el voltímetro no esté calibrado para el punto concreto de trabajo donde se desea medir sino que se disponga de una curva de calibración trazada a partir de algunos puntos calibrados de la escala. En este caso, habrá que realizar una interpolación en dicha curva (que suele ser un polinomio de primer grado, esto es, una recta) con objeto de conocer cuál es la tensión que realmente está midiendo el equipo. La realización de esta interpolación supone añadir otra contribución a la incertidumbre del voltímetro debido a su error de ganancia. Dicha contribución se evalúa teniendo en cuenta que la tensión medida por un voltímetro puede expresarse de este modo:

$$V_{medida} = GV_{real} + b$$



Donde  $G$  es la ganancia del medidor, la cual corresponde a la pendiente de su recta de linealidad y puede obtenerse a partir de la caracterización del instrumento a través de su curva de calibración o, siendo menos recomendable, de las especificaciones del fabricante. El término independiente  $b$  de la recta de ajuste puede considerarse como inexistente puesto que se cancela al realizar las medidas con polaridad directa e inversa de la fuente. En efecto, con una intensidad de corriente  $I$  circulando en sentido directo, la caída de tensión en la resistencia  $R$  del shunt reflejada por la indicación del voltímetro sería:  $V_+ = G(IR) + b$ . Al invertir el sentido de circulación, la indicación quedaría:  $V_- = G(-IR) + b$ . Al hacer la semidiferencia de las tensiones registradas por el voltímetro resulta que:

$$V = \frac{V_+ - V_-}{2} = GIR$$

El error de ganancia se escribe entonces como:

$$\varepsilon_{ganancia} = V_{medida} - V_{real}$$

Substituyendo la primera ecuación en la segunda queda:

$$\varepsilon_{ganancia} = V_{medida} \left( 1 - \frac{1}{G} \right)$$

Puede considerarse a  $V_{medida}$  como el límite superior de las lecturas tomadas con objeto de simplificar los cálculos y mayorar la incertidumbre. Ésta se calcula, asumiendo una distribución de probabilidad rectangular:

$$u_{interpolacion} = \frac{\varepsilon_{ganancia}}{\sqrt{3}}$$



#### NOTA:

En cuanto al error de ganancia, si no se dispone de datos históricos, los fabricantes suelen dar unas tablas donde se señala que la exactitud puede escribirse en función de un término referente a la lectura y otro a la escala. El primero está relacionado con la pendiente de la recta y, como se va a demostrar, de él se obtiene el error de ganancia del voltímetro. En efecto, de las características del voltímetro cabe interpretar que:

$$V_{medida} = V_{real} \pm (\text{error}) \times V_{medida}$$

donde el término “error” corresponde al coeficiente de las especificaciones dadas por el fabricante por el que se ha de multiplicar la lectura. La anterior expresión puede expresarse entonces de este modo:

$$V_{medida} - V_{real} = \pm (\text{error}) \times V_{medida}$$

Por otra parte y tal como se ha definido el error de ganancia resulta de identificar términos que:

$$\text{error} = 1 - (1/G)$$

Por lo tanto, para evaluar el error de ganancia, bastará con multiplicar el coeficiente de error relativo a la lectura por la mayor indicación que muestre el voltímetro.

*U<sub>resolución</sub>*: Incertidumbre debida a la resolución del medidor empleado. Si se asume que se emplea un voltímetro digital con una resolución  $\delta V$  en la escala utilizada, su contribución a la incertidumbre se calcula considerando que el valor del estímulo que produce una misma indicación  $X$  se ajusta a una distribución rectangular en el intervalo  $(X - \delta V/2, X + \delta V/2)$ , esto es,  $\pm 0,5$  veces el último dígito. Por lo tanto:



$$u_{resolucion} = \sqrt{\frac{(\delta V)^2}{12}} = \sqrt{\frac{(\delta V / 2)^2}{3}} = \frac{\delta V / 2}{\sqrt{3}}$$

$U_{ambiente}$ : Si se trabaja en las condiciones ambientales indicadas por el fabricante, las correcciones debidas a posibles coeficientes de temperatura, presión o humedad, son despreciables. Si fuese necesario el realizar alguna corrección, ésta se hará a partir del coeficiente de temperatura, presión o humedad proporcionado en las especificaciones. La incertidumbre de esta corrección se calculará asumiendo una distribución de probabilidad rectangular:

$$u_{ambiente} = \frac{corrección}{\sqrt{3}}$$

b) Contribución de la fuente de intensidad de corriente -  $u(I)$  -:

En cuanto a la fuente de corriente se refiere su contribución a la incertidumbre se desglosa como sigue:

$$I = I_0 + \delta I_{cal} + \delta I_{der} + \delta I_{int} + \delta I_{res} + \delta I_{amb} + \delta I_{est}$$

donde:

$I_0$ : Indicación de la fuente de corriente.

$\delta I_{cal}$ : Corrección debida al error de calibración de la fuente.

$\delta I_{der}$ : Corrección debida a la deriva de la fuente.

$\delta I_{int}$ : Corrección por interpolación debida al error de linealidad de la fuente.

$\delta I_{res}$ : Corrección debida a la resolución finita de la fuente.



$\delta I_{amb}$ : Corrección debida a las condiciones ambientales que pueden afectar a la fuente.

$\delta I_{est}$ : Corrección debida a la estabilidad de la fuente.

En cuanto a la corrección por estabilidad de la fuente debidas a fluctuaciones a corto plazo en su salida bien por la aparición de un posible rizado, bien por variaciones de la tensión de alimentación, bien por cualquier otra causa, su contribución a la incertidumbre ya está recogida en la de tipo A de la resistencia del shunt  $u_A(R)$ .

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres, tomando estas contribuciones como independientes, se puede escribir:

$$u(I) = \sqrt{u_{calibración}^2(I) + u_{deriva}^2(I) + u_{interpolación}^2(I) + u_{resolución}^2(I) + u_{ambiente}^2(I)}$$

NOTA:

Existen dos planteamientos a la hora de considerar las correcciones de la corriente suministrada por la fuente ( $\delta I_{cal}$ ) indicadas en el certificado de calibración. El primero de ellos, aconsejado en la referencia [4] aunque más laborioso, consiste en aplicar en cada punto la corrección del error señalado en el certificado. El segundo planteamiento no realiza corrección alguna pero suma aritméticamente esta corrección no realizada a la incertidumbre con la consiguiente mayoración de ésta. De este modo, la incertidumbre expandida se escribiría como:  $U = k u_c + \delta I_{cal}$ . En el presente procedimiento se optará por la primera solución, aplicando a la indicación de la corriente suministrada por la fuente, la corrección pertinente obtenida del certificado de calibración.

$U_{calibración}$ : Incertidumbre asignada a la fuente de corriente después de su calibración en el punto considerado. Normalmente procederá del certificado de calibración del instrumento. En éste aparecerá, para el punto de trabajo concreto, su incertidumbre expandida,  $U$ , o bien para un factor de cobertura  $k = 2$  y un nivel de confianza del 95,45 %, o bien para  $k = 1,96$  y un nivel de confianza del 95 %, siempre que se supongan





distribuciones de probabilidad normales o de Gauss. En cualquier caso:

$$u_{\text{calibración}} = \frac{U}{k}$$

NOTA:

Si se está empleando un calibrador como fuente de corriente y en el certificado de calibración no aparece el punto de trabajo considerado, se tomará como incertidumbre la mayor de todas las que aparezcan dentro del margen utilizado.

$U_{\text{deriva}}$ :

Incertidumbre debida a la variación que, a partir del tiempo en el que se realizó la última calibración de la fuente, puede experimentar la corriente de salida para una misma indicación. Se estimará a partir de los datos históricos que se posean del equipo. En caso de carecer de ellos, y como solución menos recomendable, puede acudirse para estimar la deriva a los errores máximos que los fabricantes presentan en sus especificaciones. Dichos errores varían en función del período de tiempo considerado (un día, un mes, tres meses, un año, etcétera) y observando dicha variación se puede calcular la deriva máxima del instrumento. Si se dispone del historial de la fuente, puede obtenerse una cota superior de esta contribución a partir de la deriva máxima observada entre dos calibraciones consecutivas del equipo.

$$u_{\text{deriva}} = \frac{\text{deriva}}{\sqrt{3}}$$

$U_{\text{interpolación}}$ :

Si la fuente de corriente no está calibrada para el punto concreto de trabajo sino que se dispone de una curva de calibración trazada a partir de algunos puntos calibrados dentro del margen empleado, habrá que realizar una interpolación en dicha curva con objeto de conocer cuál es la corriente que realmente está



suministrando el equipo. La realización de esta interpolación supone añadir otra contribución a la incertidumbre debido al error de linealidad del equipo. Dicha contribución se evalúa teniendo en cuenta que la indicación de la intensidad de corriente proporcionada por la fuente puede expresarse de este modo:

$$I_{indicada} = GI_{real}$$

Donde  $G$  es la pendiente de su recta de linealidad y puede obtenerse a partir de la caracterización del instrumento a través de su curva de calibración o, siendo menos recomendable, de las especificaciones del fabricante.

El error de linealidad se escribe como:

$$\varepsilon_{linealidad} = I_{indicada} - I_{real}$$

Substituyendo la primera ecuación en la segunda queda:

$$\varepsilon_{linealidad} = I_{indicada} \left(1 - \frac{1}{G}\right)$$

La componente de incertidumbre debida a la interpolación, asumiendo una distribución de probabilidad rectangular, queda:

$$u_{interpolacion} = \frac{\varepsilon_{linealidad}}{\sqrt{3}}$$

*U<sub>resolución</sub>*: Incertidumbre debida a la resolución de la fuente empleada. Por ejemplo, si se utiliza como generador de corriente un calibrador, se atenderá al último dígito que aparezca en el visualizador para el margen de funcionamiento considerado. Si la resolución es  $\delta I$ , su



contribución a la incertidumbre se calcula considerando que el valor del estímulo que produce una misma indicación  $X$  se ajusta a una distribución rectangular en el intervalo  $(X - \delta/2, X + \delta/2)$ , esto es,  $\pm 0,5$  veces el último dígito. Por lo tanto:

$$u_{\text{resolucion}} = \sqrt{\frac{(\delta I)^2}{12}} = \sqrt{\frac{(\delta I / 2)^2}{3}} = \frac{\delta I / 2}{\sqrt{3}}$$

$u_{\text{ambiente}}$ : Si se trabaja en las condiciones ambientales indicadas por el fabricante, las correcciones debidas a posibles coeficientes de temperatura, presión o humedad, son despreciables. Si fuese necesario el realizar alguna corrección, ésta se hará a partir del coeficiente de temperatura, presión o humedad proporcionado en las especificaciones. La incertidumbre de esta corrección se calculará asumiendo una distribución de probabilidad rectangular:

$$u_{\text{ambiente}} = \frac{\text{corrección}}{\sqrt{3}}$$

c) Contribución de la incertidumbre tipo A -  $u_A(R)$  -:

Con las cinco determinaciones de la resistencia del shunt,  $R$ , se calcula la desviación típica experimental según la expresión:

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

La componente tipo A de la incertidumbre será la desviación típica experimental de la media:



$$u_A(R) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Nótese que si se realizan cinco determinaciones, entonces  $n = 5$ .

d) Cálculo de la incertidumbre expandida -  $U(R)$  -:

La incertidumbre combinada será:

$$u_c(R) = \sqrt{u_A^2(R) + u_B^2(R)}$$

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

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

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.

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, podemos suponer que  $k_{eff}$  es igual a 4 (grados de libertad de esta componente ya que se practican 5 medidas) y entonces el factor de cobertura es  $k = 2,87$ .



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

$$U(R) = ku_c(R)$$

Se presenta en forma de tabla el resumen de todo el análisis de incertidumbres:

**Tabla 1**

Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre típica	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre ( $\Omega$ )
$\bar{R}$	$\sum_{i=1}^n R_i / n$	$s/\sqrt{n}$	normal	1	$u_A(R)$
$\delta V_{cal}$	$f_{cal}(V)$	$U/k$	normal	$1/l$	$u_{cal}(V)$
$\delta V_{der}$	$f_{der}(t, V)$	deriva/ $\sqrt{3}$	rectangular	$1/l$	$u_{der}(V)$
$\delta V_{int}$	$f_{gan}(V)$	$\varepsilon_{ganancia}/\sqrt{3}$	rectangular	$1/l$	$u_{int}(V)$
$\delta V_{res}$	0	$(\delta V/2) / \sqrt{3}$	rectangular	$1/l$	$u_{res}(V)$
$\delta V_{amb}$	0	corrección/ $\sqrt{3}$	rectangular	$1/l$	$u_{amb}(V)$
$\delta I_{cal}$	$f_{cal}(I)$	$U/k$	normal	$V/P$	$u_{cal}(I)$
$\delta I_{der}$	$f_{der}(t, I)$	deriva/ $\sqrt{3}$	rectangular	$V/P$	$u_{der}(I)$
$\delta I_{int}$	$f_{lin}(I)$	$\varepsilon_{linealidad}/\sqrt{3}$	rectangular	$V/P$	$u_{int}(I)$
$\delta I_{res}$	0	$(\delta I/2) / \sqrt{3}$	rectangular	$V/P$	$u_{res}(I)$
$\delta I_{amb}$	0	corrección/ $\sqrt{3}$	rectangular	$V/P$	$u_{amb}(I)$



## 6.2. Interpretación de resultados

En función del uso que se vaya a dar al shunt, se deberá fijar una cierta tolerancia para la calibración. El resultado obtenido en la calibración junto con su incertidumbre expandida asociada deberán estar totalmente comprendidos en el interior del entorno de tolerancia fijado. En caso contrario, es decir, siempre que algún punto del intervalo que determina  $R \pm U(R)$  caiga fuera del intervalo de tolerancia, se deberá limitar el uso del shunt.

Un período de tiempo razonable para la recalibración de estos instrumentos puede oscilar entre 6 y 12 meses, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente del conocimiento que se tenga de las características del shunt en cuanto a su pendiente de deriva con el tiempo se refiere. El usuario de shunt 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 aplicadas.

## 7. REFERENCIAS

### 7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

Manual de funcionamiento del voltímetro empleado para la calibración.

Manual de funcionamiento de la fuente de corriente.

Manual de características del shunt a calibrar.

### 7.2. Otras referencias para consulta

[1] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados (VIM)-JCGM



200:2008.3ª Edición en español, traducción de la 3ª Edición del VIM. 2008

- [2] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía. 1994.
- [3] Guía EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Edition1. EA 1999.
- [4] Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Versión Española. Centro Español de Metrología. 3ª Edición. 2008. NIPO: 706-09-002-6.
- [5] Norma UNE-EN ISO 10012:2003. Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. (ISO 10012:2003).
- [6] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 4. 2003.
- [7] Norma UNE-EN ISO 10012:2003. Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. (ISO 10012:2003)

## 8. ANEXO

En este anexo se muestra un ejemplo de la calibración de un shunt con el correspondiente cálculo de incertidumbres.

### **EJEMPLO DE CALIBRACIÓN DE UN SHUNT DE CORRIENTE CONTINUA**

Un determinado laboratorio posee un juego de tres shunts de corriente continua utilizados en la medida de intensidades de corriente desde 1 A a 10 A. El primer shunt tiene un alcance de 1 A; el segundo, de 3 A; el tercero, de 10 A. Se desea calibrar el shunt de 3 A cuya resistencia tiene un valor nominal de 1  $\Omega$ . Se dispone de un voltímetro digital de



seis dígitos y medio y como fuente de corriente continua se emplea un calibrador multifunción.

## Voltímetro

El certificado de calibración del voltímetro fue emitido hace seis meses y en él figura lo siguiente:

Escala	Punto de medida	Indicación del voltímetro (V)	Incertidumbre expandida (k = 2)	Temperatura	Humedad relativa
1,000 000 V	1 V	0,999 997	20 $\mu$ V	23,4 °C	< 70 %
1,000 000 V	-1 V	-1,000 002	20 $\mu$ V	23,4 °C	< 70 %

Se suponen distribuciones de probabilidad normales para el cálculo de la incertidumbre expandida.

En la escala de 10,000 00 V, se han calibrado los siguientes puntos: 1 V, -1 V, 3 V, -3 V, 5 V, -5 V, 8 V, -8 V, 10 V y -10 V, con los cuales se ha trazado una curva de ajuste para toda la escala:

$$V_{medida} = GV_{real} + b$$
$$G = 1,000 010; b = 2 \mu\text{V}$$

La incertidumbre expandida, con  $k = 2$ , de los puntos calibrados es: 30  $\mu$ V.

El voltímetro se calibra con periodicidad anual y de los datos históricos que se poseen se estima que la deriva máxima anual es de +5  $\mu$ V.

## Fuente de intensidad de corriente

El certificado de calibración del calibrador fue emitido hace seis meses y en él figura lo siguiente:





Punto de medida	Corriente generada (A)	Incertidumbre expandida (k = 2)	Temperatura	Humedad relativa
1 A	1,000 02	20 $\mu$ A	23,4 °C	< 70 %
2 A	2,000 01	30 $\mu$ A	23,2 °C	< 70 %
3 A	2,999 88	70 $\mu$ A	22,7 °C	< 70 %

Se suponen distribuciones de probabilidad normales para el cálculo de la incertidumbre expandida.

El calibrador multifunción se calibra con periodicidad anual y de los datos históricos que se poseen se estima que la deriva máxima anual es de +20  $\mu$ A. Las especificaciones del fabricante proporcionan una tabla donde figura el coeficiente de temperatura de la salida.

COEFICIENTE DE TEMPERATURA $\pm (10^{-6}$ de la salida + $\mu$ A)/ °C			NOTA: El coeficiente de temperatura se debe añadir a la incertidumbre únicamente cuando se trabaje a $23 \pm 5$ °C.
ESCALA	10 °C - 40 °C	0 °C - 10 °C y 40 °C - 50 °C	Resolución
0 A - 2,199 99 A	2 + 5	6 + 20	10 $\mu$ A
0 - 11 A	40 + 150	60 + 240	100 $\mu$ A

## Condiciones ambientales del laboratorio

Las condiciones ambientales son las usuales en un laboratorio de calibración, con una temperatura ambiente de  $23 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ .

## Solución

El shunt que se desea calibrar es de 3 A, por lo que resultaría adecuado medirlo a 1 A, 2 A y 3 A con el propósito de tenerlo caracterizado en unos puntos intermedios. Para cada punto se realizan cinco medidas, tanto en polaridad directa como inversa de la intensidad



de la corriente según la secuencia D - I - I - D - D - I - I - D - D - I (D  $\equiv$  Directa, I  $\equiv$  Inversa).

### Cálculo de incertidumbres para 1 A

Para 1 A, el voltímetro está trabajando en la escala de 1 voltio y el calibrador en la de 0 a 2 amperios.

En la tabla 2 se muestran las indicaciones dadas por el voltímetro para el primer punto de calibración del shunt (1 A).

**Tabla 2**

I = 1 A	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>
	1,000 619	-1,000 020
	1,000 752	-1,000 063
	1,000 427	-1,000 130
	1,000 352	-1,000 163
	1,000 815	-1,000 073

A estas lecturas habrá que aplicarles la corrección debida al error de calibración del voltímetro que se indica en su certificado de calibración. Recuérdese que para una tensión de 1 V el voltímetro indica 0,999 997 V y para -1 V, la indicación es de -1,000 002 V. Por lo tanto, en 1 V, la corrección consiste en sumar 3  $\mu$ V a los valores anteriores, y en -1 V, habría que sumar 2  $\mu$ V. Además, al haber transcurrido seis meses desde la última calibración, habría que efectuar una corrección por deriva. Si la deriva anual es de +5  $\mu$ V, la corrección a realizar consistiría en sumar 2,5  $\mu$ V a todos los valores anteriores. La tabla 3 muestra como quedan modificadas todas las indicaciones del voltímetro después de tener en cuenta ambas correcciones.



**Tabla 3**

I = 1 A	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>
	1,000 625	-1,000 016
	1,000 758	-1,000 059
	1,000 433	-1,000 126
	1,000 358	-1,000 159
	1,000 821	-1,000 069

Para el voltímetro, las condiciones ambientales en las que se encuentra el laboratorio están dentro de las especificadas por el fabricante por lo que no es necesario efectuar ninguna corrección al respecto ni tampoco existirá contribución a la incertidumbre por este fenómeno.

En la escala de 1 V, la incertidumbre de calibración del voltímetro en el punto de medida de 1 V es de 20  $\mu\text{V}$  para un factor de cobertura  $k = 2$  considerando una distribución de probabilidad de Gauss según se recoge en el certificado de calibración. En consecuencia:

$$u_{\text{calibración}}(\text{V}) = \frac{U}{k} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{2} = 10^{-5} \text{ V}$$

Al haber transcurrido seis meses desde la última calibración y tener ésta una periodicidad anual, si se practica la corrección por deriva, habrá que tener en cuenta el historial del instrumento en el que se dice que la máxima deriva anual es de 5  $\mu\text{V}$ . La contribución a la incertidumbre será, por tanto:

$$u_{\text{deriva}}(\text{V}) = \frac{\text{deriva}}{\sqrt{3}} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ V}$$

Puesto que no se ha realizado ninguna interpolación, no existe componente de incertidumbre debida a este hecho.



La resolución en la escala de 1 V es de 1  $\mu$ V. De ahí:

$$u_{\text{resolucion}}(V) = \frac{\delta V/2}{\sqrt{3}} = \frac{1 \cdot 10^{-6}/2}{\sqrt{3}} = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ V}$$

La contribución del voltímetro a la incertidumbre se calcula combinando cuadráticamente los anteriores términos:

$$u(V) = \sqrt{u_{\text{calibracion}}^2(V) + u_{\text{deriva}}^2(V) + u_{\text{resolucion}}^2(V)}$$

$$u(V) = 1 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

Como se aprecia, el error de calibración del voltímetro es, con mucho, la componente dominante.

En cuanto a la fuente de corriente empleada, se analizarán una a una las contribuciones tal y como se ha hecho anteriormente con el voltímetro. Tampoco se han de practicar correcciones debidas a las condiciones ambientales puesto que se trabaja conforme a lo especificado por el fabricante ni existirá contribución a la incertidumbre por este motivo.

Empezando con la incertidumbre debida a la calibración del calibrador, en el certificado se manifiesta que la incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k = 2$  para un nivel de confianza del 95,5 % considerando distribuciones normales de probabilidad es:  $U = 20 \mu\text{A}$  en la escala de 1 A.

$$u_{\text{calibracion}}(I) = \frac{U}{k} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{2} = 10^{-5} \text{ A}$$

Del historial del equipo se desprende que la deriva anual es de + 20  $\mu\text{A}$ . Si se efectúa corrección por deriva en la salida de la fuente de corriente, la contribución a la incertidumbre se calcula como:



$$u_{\text{deriva}}(I) = \frac{\text{deriva}}{\sqrt{3}} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

Para la fuente de corriente, al disponer del punto de trabajo calibrado, no es menester realizar interpolación alguna, por lo que no existe contribución a la incertidumbre causada por este concepto.

Para el margen de funcionamiento considerado, de 0 A a 2 A, la resolución es de 10  $\mu$ A. En consecuencia:

$$u_{\text{resolucion}} = \frac{10 \cdot 10^{-6} / 2}{\sqrt{3}} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

Combinando cuadráticamente las anteriores contribuciones se obtiene la incertidumbre debida a la fuente de corriente:

$$u(I) = \sqrt{u_{\text{calibracion}}^2(I) + u_{\text{deriva}}^2(I) + u_{\text{resolucion}}^2(I)}$$
$$u(I) = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

La incertidumbre tipo B resulta ser:

$$u_B(R) = \sqrt{\frac{1}{I^2} u^2(V) + \frac{V^2}{I^4} u^2(I)} = \sqrt{\frac{1}{1^2} (1 \cdot 10^{-5})^2 + \frac{1^2}{1^4} (1,6 \cdot 10^{-5})^2} = 1,9 \cdot 10^{-5} \Omega$$

En la tabla siguiente se muestran los valores de la resistencia del shunt obtenidos según la expresión:

$$R = \frac{(V_+ - V_-) / 2}{I}$$

Téngase en cuenta que al valor nominal de la intensidad de corriente, 1 A, hay que añadirle los términos correspondientes a su calibración y a la deriva, cifrada en +20  $\mu$ A al año. En consecuencia, cuando la



indicación de la fuente de corriente es de 1 A, en realidad está entregando 1,000 02 A más la corrección por deriva que es de + 10  $\mu$ A. En total, cuando la indicación es 1 A, la fuente proporciona 1,000 03 A.

**Tabla 4**

<b>I = 1,000 03 A</b>
<b>R<sub>i</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
1,000 290
1,000 370
1,000 249
1,000 228
1,000 414
<b>Valor medio R (<math>\Omega</math>)</b>
<b>1,000 312</b>
<b>Desviación típica (<math>\mu\Omega</math>)</b>
<b>81</b>

Para hallar la incertidumbre tipo A, téngase en cuenta que lo que se desea es la desviación típica respecto de la media y lo que se tiene la desviación típica de las cinco medidas realizadas. Habrá, entonces, que dividir ésta entre la raíz del número de medidas, esto es:

$$u_A(R) = \frac{s}{\sqrt{5}} = \frac{81 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{5}} = 3,6 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Y la incertidumbre combinada queda:

$$u_c(R) = \sqrt{u_A^2(R) + u_B^2(R)} = \sqrt{(3,6 \cdot 10^{-5})^2 + (1,9 \cdot 10^{-5})^2} = 4,1 \cdot 10^{-5} \cong 4 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Si multiplicamos lo anterior por el factor de cobertura  $k = 2$ , asumiendo una distribución gaussiana, se obtiene la incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 %:



$$U(R) = ku_c(R) = 8 \cdot 10^{-5} \Omega$$

En conclusión, para una intensidad de corriente de 1 A, el valor de la resistencia del shunt es:

$$R = 1,000\ 31 \pm 8 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (k = 2)$$

**Tabla 5**

Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre típica	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre ( $\Omega$ )
$\bar{R}$	1,000 31 $\Omega$	81·10 <sup>-6</sup> $\Omega$	normal	1	3,6·10 <sup>-5</sup>
$\delta V_{cal}$	3 $\mu$ V	10 <sup>-5</sup> V	normal	1	10 <sup>-5</sup>
$\delta V_{der}$	2,5 $\mu$ V	2,9·10 <sup>-6</sup> V	rectangular	1	2,9·10 <sup>-6</sup>
$\delta V_{int}$	-	-	-	-	-
$\delta V_{res}$	0	2,9·10 <sup>-7</sup> V	rectangular	1	2,9·10 <sup>-7</sup>
$\delta V_{amb}$	-	-	-	-	-
$\delta I_{cal}$	2 $\mu$ A	10 <sup>-5</sup> A	normal	1	10 <sup>-5</sup>
$\delta I_{der}$	10 $\mu$ A	1,2·10 <sup>-5</sup> A	rectangular	1	1,2·10 <sup>-5</sup>
$\delta I_{int}$	-	-	-	-	-
$\delta I_{res}$	0	2,9·10 <sup>-6</sup> A	rectangular	1	2,9·10 <sup>-6</sup>
$\delta I_{amb}$	-	-	-	-	-

### **Cálculo de incertidumbres para 2 A**

Para 2 A, el voltímetro está trabajando en la escala de 10 voltios y el calibrador en la de 0 a 2 amperios.

En la tabla 6 se muestran las indicaciones dadas por el voltímetro para el segundo punto de calibración del shunt (2 A).



**Tabla 6**

I = 2 A	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>
	2,001 13	-2,000 25
	2,000 98	-2,000 48
	2,001 58	-2,000 25
	2,000 28	-2,000 57
	2,001 17	-2,000 16

A estas lecturas habrá que aplicarles la corrección debida al error de calibración del voltímetro que se indica en su certificado de calibración. El punto correspondiente a 2 V no está calibrado sino que se dispone de una curva de calibración para la escala de 10 V.

$$V_{medida} = GV_{real} + b$$
$$G = 1,000\ 010; b = 2\ \mu V$$

En consecuencia, los valores medidos de la tabla 6 deben ser corregidos de este modo.

$$V_{real} = \frac{V_{medida} - b}{G}$$

Además, al haber transcurrido seis meses desde la última calibración, habría que efectuar una corrección por deriva. Si la deriva anual es de + 5 V, la corrección a realizar consistiría en sumar 2,5 V a todos los valores anteriores. La tabla 7 muestra como quedan modificadas todas las indicaciones del voltímetro después de tener en cuenta ambas correcciones.





**Tabla 7**

I = 2 A	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>
	2,001 11	-2,000 23
	2,000 96	-2,000 46
	2,001 56	-2,000 23
	2,000 26	-2,000 55
	2,001 15	-2,000 14

Para el voltímetro, las condiciones ambientales en las que se encuentra el laboratorio están dentro de las especificadas por el fabricante por lo que no es necesario efectuar ninguna corrección al respecto.

En la escala de 10 V, la incertidumbre de calibración del voltímetro es de 30 V para un factor de cobertura  $k = 2$  considerando una distribución de probabilidad de Gauss según se recoge en el certificado de calibración. En consecuencia:

$$u_{\text{calibracion}}(V) = \frac{U}{k} = \frac{30 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

Al haber transcurrido seis meses desde la última calibración y tener ésta una periodicidad anual, si se practica la corrección por deriva, habrá que tener en cuenta el historial del instrumento en el que se dice que la máxima deriva anual es de 5 V. La contribución a la incertidumbre será, por tanto:

$$u_{\text{deriva}}(V) = \frac{\text{deriva}}{\sqrt{3}} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ V}$$

Puesto que se ha realizado una interpolación para hallar el valor verdadero del punto de medida a 2 V, la incertidumbre debida a este hecho es:



$$u_{\text{int interpolacion}} = \frac{\varepsilon_{\text{ganancia}}}{\sqrt{3}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

$$\text{En donde: } \varepsilon_{\text{ganancia}} = V_{\text{medida}} \left( 1 - \frac{1}{G} \right) = 2 \cdot 10^{-5}$$

Puede considerarse a  $V_{\text{medida}}$  como el límite superior de las lecturas tomadas con objeto de simplificar los cálculos y mayorar la incertidumbre.

La resolución en la escala de 10 V es de 10  $\mu\text{V}$ . De ahí:

$$u_{\text{resolucion}} (V) = \frac{\delta V/2}{\sqrt{3}} = \frac{10 \cdot 10^{-6}/2}{\sqrt{3}} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ V}$$

La contribución del voltímetro a la incertidumbre se calcula combinando cuadráticamente los anteriores términos:

$$u(V) = \sqrt{u_{\text{calibración}}^2 (V) + u_{\text{deriva}}^2 (V) + u_{\text{interpolación}}^2 (V) + u_{\text{resolución}}^2 (V)}$$

$$u(V) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

Como se aprecia, el error de calibración del voltímetro y el de interpolación son las componentes dominantes.

En cuanto a la fuente de corriente empleada, se analizarán una a una las contribuciones tal y como se ha hecho anteriormente con el voltímetro. Tampoco se han de practicar correcciones debidas a las condiciones ambientales puesto que se trabaja conforme a lo especificado por el fabricante.



Empezando con la incertidumbre debida a la calibración del calibrador, en el certificado se manifiesta que la incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k = 2$  para un nivel de confianza del 95,5 % considerando distribuciones normales de probabilidad es:  $U = 30 \mu\text{A}$  en la escala de 0 a 2 A.

$$u_{\text{calibracion}}(I) = \frac{U}{k} = \frac{30 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

Del historial del equipo se desprende que la deriva anual es de  $+20 \mu\text{A}$ . Si se efectúa corrección por deriva en la salida de la fuente de corriente, la contribución a la incertidumbre se calcula como:

$$u_{\text{deriva}}(I) = \frac{\text{deriva}}{\sqrt{3}} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

Para la fuente de corriente, al disponer del punto de trabajo calibrado, no es menester realizar interpolación alguna, por lo que no existe contribución a la incertidumbre causada por este concepto.

Para el margen de funcionamiento considerado, de 0 A a 2 A, la resolución es de  $10 \mu\text{A}$ . En consecuencia:

$$u_{\text{resolucion}} = \frac{10 \cdot 10^{-6} / 2}{\sqrt{3}} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

Combinando cuadráticamente las anteriores contribuciones se obtiene la incertidumbre debida a la fuente de corriente:

$$u(I) = \sqrt{u_{\text{calibracion}}^2(I) + u_{\text{deriva}}^2(I) + u_{\text{resolucion}}^2(I)}$$

$$u(I) = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$



La incertidumbre tipo B resulta ser:

$$u_B(R) = \sqrt{\frac{1}{I^2} u^2(V) + \frac{V^2}{I^4} u^2(I)} = \sqrt{\frac{1}{2^2} (2 \cdot 10^{-5})^2 + \frac{2^2}{2^4} (1,9 \cdot 10^{-5})^2} = 1,4 \cdot 10^{-5} \Omega$$

En la tabla siguiente se muestran los valores de la resistencia del shunt obtenidos según la expresión:

$$R = \frac{(V_+ - V_-)/2}{I}$$

Téngase en cuenta que al valor nominal de la intensidad de corriente, 2 A, hay que añadirle los términos correspondientes a su calibración y a la deriva, cifrada en +20  $\mu\text{A}$  al año. En consecuencia, cuando la indicación de la fuente de corriente es de 2 A, en realidad está entregando 2,000 01 A más la corrección por deriva que es de +10  $\mu\text{A}$ . En total, cuando la indicación es 2 A, la fuente proporciona 2,000 02 A.

**Tabla 8**

<b>I = 2,000 02 A</b>
<b>R<sub>i</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
1,000 32
1,000 34
1,000 44
1,000 19
1,000 31
<b>Valor medio R (<math>\Omega</math>)</b>
<b>1,000 32</b>
<b>Desviación típica (<math>\mu\Omega</math>)</b>
<b>88</b>



Para hallar la incertidumbre tipo A, téngase en cuenta que lo que se desea es la desviación típica respecto de la media y lo que se tiene la desviación típica de las cinco medidas realizadas. Habrá, entonces, que dividir ésta entre la raíz del número de medidas, esto es:

$$u_A(R) = \frac{s}{\sqrt{5}} = \frac{88 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{5}} = 3,9 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Y la incertidumbre combinada queda:

$$u_c(R) = \sqrt{u_A^2(R) + u_B^2(R)} = \sqrt{(3,9 \cdot 10^{-5})^2 + (1,4 \cdot 10^{-5})^2} = 4,2 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Si multiplicamos lo anterior por el factor de cobertura  $k = 2$ , asumiendo una distribución gaussiana, se obtiene la incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 %:

$$U(R) = ku_c(R) = 8,4 \cdot 10^{-5} \cong 9 \cdot 10^{-5} \Omega$$

En conclusión, para una intensidad de corriente de 2 A, el valor de la resistencia del shunt es:

$$\mathbf{R = 1,000\ 32 \pm 9 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (k = 2)}$$



Tabla 9

Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre típica	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre ( $\Omega$ )
$\bar{R}$	1,000 32 $\Omega$	$88 \cdot 10^{-6} \Omega$	normal	1	$3,9 \cdot 10^{-5}$
$\delta V_{cal}$	0	$1,5 \cdot 10^{-5} V$	normal	1/2	$7,5 \cdot 10^{-6}$
$\delta V_{der}$	2,5 $\mu V$	$2,9 \cdot 10^{-6} V$	rectangular	1/2	$1,5 \cdot 10^{-6}$
$\delta V_{int}$	-22 $\mu V$	$1,2 \cdot 10^{-5} V$	rectangular	1/2	$6,0 \cdot 10^{-6}$
$\delta V_{res}$	0	$2,9 \cdot 10^{-6} V$	rectangular	1/2	$1,5 \cdot 10^{-6}$
$\delta V_{amb}$	-	-	-	-	-
$\delta I_{cal}$	1 $\mu A$	$1,5 \cdot 10^{-5} A$	normal	1/2	$7,5 \cdot 10^{-6}$
$\delta I_{der}$	10 $\mu A$	$1,2 \cdot 10^{-5} A$	rectangular	1	$6,0 \cdot 10^{-6}$
$\delta I_{int}$	-	-	-	-	-
$\delta I_{res}$	0	$2,9 \cdot 10^{-6} A$	rectangular	1/2	$1,5 \cdot 10^{-6}$
$\delta I_{amb}$	-	-	-	-	-



### **Cálculo de incertidumbres para 3 A**

Se calcula del mismo modo que para el caso de 2 A, teniendo en cuenta que ahora la resolución de la fuente de corriente es de  $100 \mu\text{A}$ .

