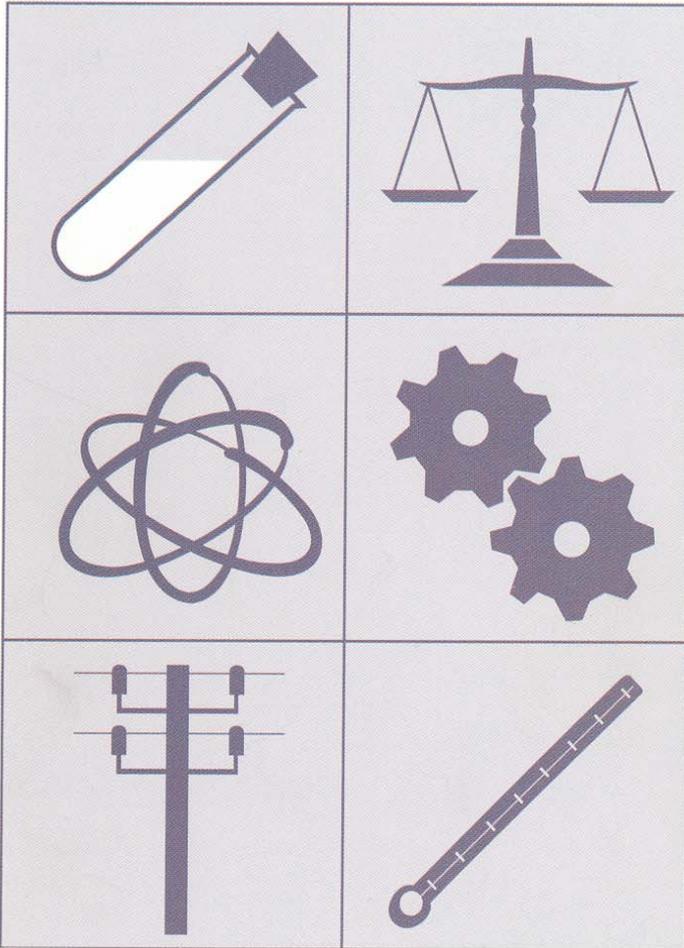


# Metrología

## PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



### PROCEDIMIENTO EL- 014 PARA LA CALIBRACIÓN DE VATÍMETROS DIGITALES

m 08



MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO



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

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

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

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

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



## ÍNDICE

	Página
1. OBJETO .....	4
2. ALCANCE .....	4
3. DEFINICIONES .....	5
4. GENERALIDADES .....	9
5. DESCRIPCIÓN .....	13
5.1. Equipos y materiales .....	13
5.2. Operaciones previas .....	15
5.3. Proceso de calibración.....	17
5.4. Toma y tratamiento de datos .....	18
6. RESULTADOS.....	20
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	20
6.2 Interpretación de resultados.....	27
7. REFERENCIAS .....	28
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración .....	28
7.2. Otras referencias para consulta.....	28
8. ANEXOS .....	29
8.1. Anexo I: Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de calibración de un vatímetro .....	29
8.2. Anexo II: Ajuste por mínimos cuadrados para el cálculo.....	33



## 1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer un método para la calibración de vatímetros digitales, tanto en corriente continua como en corriente alterna.

## 2. ALCANCE

Este procedimiento es aplicable a vatímetros de medida de potencia eléctrica, con indicación digital y que se calibran por comparación, no siendo aplicable a vatímetros de alta exactitud que requerirían un método más complicado y la utilización de instrumentos de un elevado nivel metrológico. Cuando se trata de medidas en corriente alterna los vatímetros miden potencia activa (a los medidores de potencia reactiva se les llama varímetros). En este procedimiento se tratarán sólo redes monofásicas.

La medición de potencia eléctrica puede realizarse con un instrumento que además esté preparado para medir tensión, intensidad de corriente, etc., en este caso este procedimiento sólo sería de aplicación a la calibración parcial del instrumento, en potencia eléctrica.

Existe una gran variedad de vatímetros atendiendo a su grado de exactitud y a sus rangos de medida en tensión , intensidad de corriente y, en el caso de corriente alterna, de la frecuencia. La aplicación de este procedimiento dependerá de la adecuación del sistema de medida utilizado en la calibración al vatímetro a calibrar, que ha de cubrir, al menos, sus rangos de medida y una resolución y exactitud adecuadas, según se indica en el apartado 5.1. del presente procedimiento.

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



### 3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [9] que se indican a continuación, además de otras específicas para [2] el presente procedimiento.

#### Ajuste [2] (4.30):

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

NOTA:

El ajuste puede ser automático, semiautomático o manual.

#### Calibración [2] (6.11):

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

NOTAS:

1. El resultado de una calibración permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando o bien determinar las correcciones a aplicar en las indicaciones.
2. Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metrológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.
3. Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento denominado, a veces **certificado de calibración o informe de calibración**.



### Desviación típica experimental [2] (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 típica de la distribución de la media de  $\bar{x}$ , y se denomina **desviación típica experimental de la media**.
3. La desviación típica experimental de la media en ocasiones se denomina, incorrectamente **error de la media**.

### Error (de indicación) de un instrumento de medida [2] (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. (ver 1.19 y 1.20)
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.

Error intrínseco (de un instrumento de medida) [2] (5.24):

Error de un instrumento de medida, determinado en las condiciones de referencia.

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

Esta definición es la de la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” donde sus bases están expuestas con detalle (en particular ver 2.2.4 y el anexo D [3]).



### Patrón de referencia [2] (6.6):

Patrón, en general de la más alta calidad metrológica disponible en un lugar dado o en una organización determinada, del cual se derivan las mediciones realizadas en dicho lugar.

### Patrón de trabajo [2] (6.7):

Patrón que se utiliza corrientemente para calibrar o controlar medidas materializadas, instrumentos de medida o materiales de referencia.

#### NOTAS:

1. Un patrón de trabajo es habitualmente calibrado con un patrón de referencia.
2. Un patrón de trabajo utilizado corrientemente para asegurar que las medidas están realizadas correctamente se denomina **patrón de control**.

### Resolución (de un dispositivo visualizador) [2] (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 [2] (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.

#### 4. GENERALIDADES

La potencia consumida en un determinado elemento ( $R$ , en la Figura 1) que se encuentra a una tensión  $U$  circulando una intensidad de corriente  $I$ , ambas continuas, está definida por:

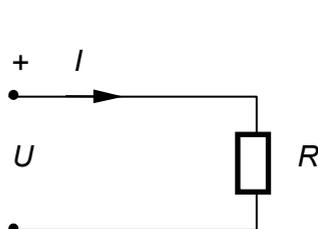


Figura 1

$$P = U \cdot I$$

o por estas otras expresiones:

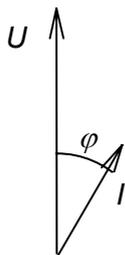
$$P = W / t$$

$$P = R \cdot I^2$$

$$P = U^2 / R$$

puesto que la unidad de  $U$  es el voltio,  $V$ , y la de  $I$  es el amperio,  $A$ , la potencia se obtiene en vatios,  $W$ . El vatio se define como la potencia que da lugar a una producción de energía igual a 1 julio por segundo ((1  $W = 1 J / 1s$ )).

Cuando se trata de corriente alterna, donde el suministro se produce por medio de ondas senoidales de frecuencia  $f$ , se complica la medida de la potencia debido al desfase existente entre la intensidad de corriente y la tensión, que se podría interpretar gráficamente como indica la Figura 2:



**Figura 2**

el ángulo que hay entre  $U$  e  $I$  se llama ángulo de fase, se dice que la carga es inductiva cuando la  $I$  va retrasada con respecto a la  $U$  un ángulo  $\varphi$  y se dice que la carga es capacitiva cuando ocurre lo contrario. A partir de este ángulo se define el factor de potencia como el  $\cos \varphi$ .

Como consecuencia se pueden definir tres expresiones para la potencia:

$S = U \cdot I$ , llamada potencia aparente, coincide con la expresión para la potencia en corriente continua, indicando la potencia máxima que podría alcanzar si no existiera desfase ( $\varphi = 0$ ). Su unidad de medida es el voltamperio, VA.

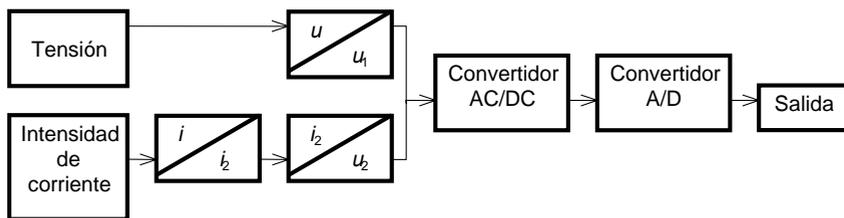
$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ , llamada potencia activa, indica la verdadera potencia útil que se ha obtenido. Su unidad de medida es el vatio, W.

$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ , llamada potencia reactiva, Su medida tiene interés para conocer la calidad de las redes y de los receptores eléctricos. Su unidad de medida es el voltamperio reactivo, var.

Los vatímetros son instrumentos que miden directamente potencia, sin necesidad de recurrir a cálculos. En su uso habitual hay que tener cuidado, ya que al medir potencia activa, es posible que el valor de tensión o el de intensidad de corriente supere los valores máximos admitidos por este instrumento, por eso es aconsejable utilizarlo conjuntamente con un voltímetro y un amperímetro. Además, usándolos conjuntamente se pueden tener los valores de todas las magnitudes implicadas:  $P$ ,  $S$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $I$  y  $\varphi$ .

Un esquema general de como puede ser un vatímetro digital se presenta en el siguiente diagrama de bloques:

**Figura 3**



De las señales de entrada se obtienen  $u_1$  y  $u_2$ , a través de transformadores, ambas pasan al convertidor AC/DC en el que son tratadas adecuadamente (mediante sumadores, moduladores, etc...) para obtener un valor de tensión continua proporcional al valor de la potencia a medir.

El vatímetro posee unos bornes de conexión de manera que se conecta la intensidad de corriente por una parte y la tensión por otra, por lo tanto, habrá medidas de ambas magnitudes. Las medidas de intensidad se han de realizar mediante unas resistencias o shunts que provocan una caída de tensión proporcional a dicha intensidad.

Los vatímetros digitales tienen un convertidor analógico/digital que convierte la entrada analógica en una salida digital, la cual se envía al visualizador del instrumento, mostrando éste el resultado de la medición realizada, asimismo la salida digital puede enviarse a salidas de control (como IEEE 488 o RS232).

La calibración de los vatímetros se va a realizar por comparación con otro vatímetro de mejores características metroológicas, que actuará como patrón en la comparación. En un laboratorio habrá un patrón de referencia que tendrá un certificado de calibración externo, con él se calibrarán los patrones de trabajo del laboratorio, caso de existir, y con estos últimos o con el patrón de referencia, se calibrarán los vatímetros, según el nivel de éstos.



El proceso de calibración, en ambos casos, sigue el siguiente esquema: se conecta una carga (tal y como se describe en 5.1) con el fin de que el instrumento a calibrar mida la potencia; con otro sistema de medida que actúa como patrón, se realiza la misma medida, que se toma como valor de referencia, se comparan los resultados obtenidos y se calcula el error que ha cometido el instrumento a calibrar con respecto al patrón y finalmente se determina una incertidumbre de calibración.

### Símbolos y Abreviaturas

$a$  valor del máximo error cometido como consecuencia de la resolución de un instrumento.

$a, b$  coeficientes de la recta de regresión:  $y = ax + b$ .

$c$  corrección de la medida.

$D_{\frac{1}{q}}$  valor de la corrección de las medidas del patrón de acuerdo con su certificado de calibración a partir de la interpolación de los valores especificados en su certificado de calibración.

$E$  error de un punto de medida.

$E_r\%$  error relativo en tanto por ciento.

$L_M$  lectura de la medida indicada por el medidor a calibrar.

$L_P$  lectura de la medida indicada por el patrón.

$n$  número de mediciones realizadas para un mismo punto de calibración.

$q_k$  cada observación independiente, que corresponde al valor de la corrección.

$\bar{q}$  la media aritmética de los valores que toma  $q_k$ .



$r$  coeficiente de correlación.

$s(q)$  desviación típica experimental de cada estimación de las magnitudes de entrada, en este caso de las correcciones en un punto de calibración.

$\overline{s(q)}$  desviación estándar experimental de la media de las correcciones en un punto de calibración.

$U$  incertidumbre expandida.

$U'$  incertidumbre expandida expresada en tanto por ciento.

$u(\delta_i)$  incertidumbre debida a la corrección  $\delta_i$ .

$u(y)$  incertidumbre estándar combinada.

$X, y$  coordenadas de la recta.

$\delta_i$  corrección debida a la contribución de "I".

## 5. DESCRIPCIÓN

### 5.1. Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario disponer de un sistema de medida compuesto por los siguientes equipos:

- Un vatímetro, que actuará como patrón en la calibración, cuya exactitud debiera ser mejor que la del medidor a calibrar; en los instrumentos de este tipo se suele aconsejar que la incertidumbre de calibración sea al menos cuatro veces más pequeña que la tolerancia del instrumento a calibrar.



El patrón de referencia de un laboratorio debe poseer un certificado de calibración en vigor, el cual debiera haber sido extendido por un laboratorio acreditado en el ámbito de su acreditación o un laboratorio nacional.

- Un sistema capaz de suministrar los distintos valores de potencia que han de ser medidos, cuyas características sean las adecuadas. Estará formado por una fuente de tensión y otra de intensidad de corriente, que serán independientes la una de la otra. Cuando se trate de corriente alterna se tendrá la precaución de que ambas fuentes tengan una alimentación común para asegurar que la frecuencia sea la misma, y como será necesario utilizar cargas con distinto ángulo de fase, para conseguirlo, el sistema incorporará un decalador de fase, que es un dispositivo que permite retrasar o adelantar la onda de tensión con respecto a la de intensidad con el fin de corregir el ángulo de fase entre ellas. A este tipo de carga generada por dos fuentes que se regulan de forma independiente se le llama carga “fantasma” o “ficticia”, y es la empleada en la calibración de medidores de energía.

La distorsión de la onda de tensión y de la onda de intensidad será inferior a la que admita el patrón y el medidor a calibrar, y vendrá indicada en su manual, y en caso contrario se tendrá en cuenta su influencia.

NOTA:

El patrón puede ser un sistema de medida integrado, es decir, compuesto por todos los equipos mencionados hasta ahora. Así que, únicamente hay que conectar el medidor a calibrar a los bornes de salida del sistema.

Además serán necesarios:

- Un ordenador, cuando la calibración se realiza controlando los instrumentos mediante un software.



- Cables adecuados. La fuente de intensidad suele tener una tensión muy baja, por ello la sección del cable ha de ser de diámetro grande o de su longitud pequeña para que se obtenga el valor deseado. En el caso de la fuente de tensión hay que decir lo mismo, la sección y la longitud han de ser tales que no se produzca una caída de tensión significativa. Y en su caso adaptadores según la compatibilidad de los medidores.
- Termómetro. Con él se tomarán los valores de la temperatura a la que se realiza la calibración, hasta la décima de grado.
- Fasímetro o cofímetro. Con él se mide el ángulo de fase entre la tensión y la intensidad de corriente. Como para ángulos grandes el factor de potencia se ve afectado por el error cometido por el desfasador, sería conveniente que midiese centésimas de grado.

NOTA:

Generalmente va incorporado en el sistema de suministro de potencia.

## 5.2. Operaciones previas

Antes de iniciar la calibración se comprobará que:

- El instrumento a calibrar está identificado de forma permanente y unívoca, como puede ser con su marca, modelo y número de serie; si no lo estuviera se le asignará una identificación unívoca que se fijará sobre el instrumento para poder asociarle los resultados de esta calibración y de las que se le hagan en el futuro.
- Todos los bornes están marcados de forma que puedan ser identificados sin ambigüedad.

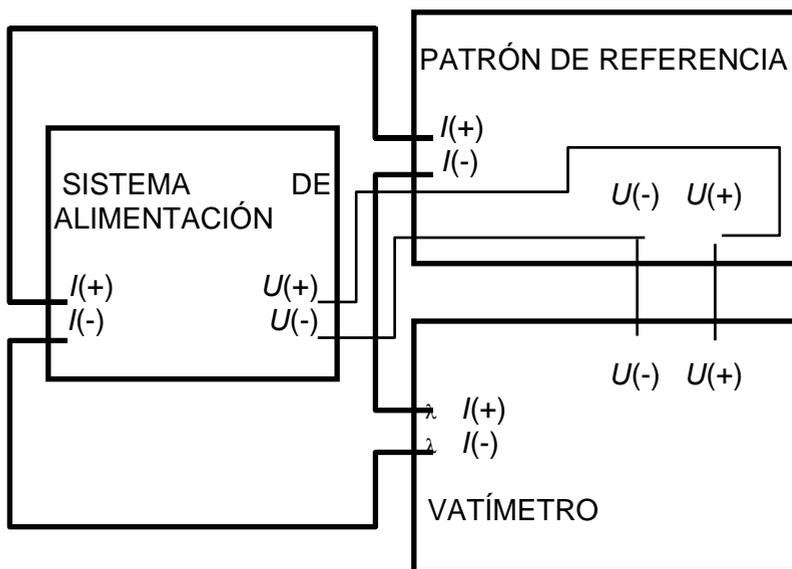


- Se dispondrá del manual del medidor a calibrar, para que se conecte correctamente el medidor y se conozcan exactamente sus límites de medida y los pasos a seguir para su utilización. E incluso, en caso de que sea necesario y exista la opción, el ajuste del medidor.
- Asimismo, se dispondrá del manual del patrón, y del sistema completo de calibración.
- Se verificará que el vatímetro funciona correctamente, conectándolo, revisando que no tiene golpes, ni daños que puedan afectar a su operatividad, etc. Si funcionara con batería se comprobará su estado.
- Antes de iniciar las medidas, el patrón deberá permanecer en el laboratorio donde se van a realizar las medidas un mínimo de 24 horas para alcanzar su equilibrio térmico. También es aconsejable que los instrumentos estén alimentados por la red un tiempo mínimo aconsejado por el fabricante, que variará de unos medidores a otros por sus características constructivas (si no se aconsejara ninguno se podría dejar durante media hora, por ejemplo). Una vez alimentados los circuitos de medida se esperará un tiempo prudencial para tomar datos, hasta que la señal a medir se haya estabilizado.
- El patrón y los indicadores de tensión, intensidad y  $\cos \varphi$  se encuentran calibrados y son trazables.
- Deberán mantenerse unas condiciones de referencia (ambientales, tensión, etc...) adecuadas para el medidor patrón y para el medidor de energía a calibrar. Estas condiciones de referencia serán las que indique el fabricante en el manual del aparato. (Generalmente, los laboratorios de medida de magnitudes eléctricas tienen la temperatura controlada a  $23 \pm 1$  °C). El patrón de referencia de un laboratorio no debería moverse de su emplazamiento, porque no suelen tener buenas características de transportabilidad y podría alterar sus propiedades metrológicas.

### 5.3. Proceso de calibración

Se conectarán el vatímetro y el patrón a la fuente con la tensión en paralelo, la intensidad de corriente en serie tal y como se indica en la Figura 4:

Figura 4



Puesto que la potencia es un magnitud que, a su vez, depende de otras magnitudes, como se ha visto anteriormente, sus puntos de medida no se expresan en unidades de energía sino en los valores de tensión e intensidad de corriente, y cuando se trate de corriente alterna también de fase,  $\varphi$ . Por ejemplo, un punto de medida sería: 120 V, 5 A,  $\cos\varphi = 1$  y 50 Hz, ajustándose las fuentes a estos valores.



Existen infinidad de combinaciones posibles de tensión e intensidad de corriente: se deben elegir los puntos de medida que tengan una importancia particular en la práctica (por ejemplo, en función del uso que vaya a hacer el propietario del medidor a calibrar), según las necesidades del laboratorio, o con las que se manifiesten con más efecto ciertas causas de error.

Los medidores de potencia se calibrarán en varios puntos, de manera que cubra todos sus valores de tensión, intensidad y frecuencia nominal y con distintos factores de potencia (como ejemplo ver el que se cita en el anexo I).

Es aconsejable realizar las medidas de cada punto varias veces (como número de mediciones se tomará  $n = 5$ ).

Cuando se esté realizando la calibración en corriente continua hay que realizar todas las medidas intercambiando la polaridad de la fuente y tomando la media de ambos valores como resultado.

#### 5.4. Toma y tratamiento de datos

Hay dos posibilidades, tomar las lecturas a mano utilizando las lecturas de los visualizadores o utilizando un sistema de adquisición de datos.

Cuando no se disponga de sistema de adquisición de datos, se toman a mano las lecturas de los dos medidores  $L_M$  (lectura del medidor) y  $L_P$  (lectura del patrón), a intervalos regulares de tiempo. En algunos medidores existe la posibilidad de programarlo para que visualice una medida cada cierto tiempo elegido por el usuario.

El resultado de la calibración será el error en cada punto de medida:

$$E = L_M - L_P$$



o la corrección:

$$c = L_P - L_M$$

Pero en electricidad lo usual es expresar el error de la medición en error relativo de la forma:

$$E_r \% = \frac{L_M - L_P}{L_P} \times 100$$

La expresión del error de una de estas formas se elegirá en función del objeto de la calibración.

La calibración se realizará en las condiciones de referencia y se rechazarán aquellos datos de los que se sospeche que no se obtuvieron en ellas. En el caso de que no sea posible, habrá que tener en cuenta su influencia. En cualquier caso, nunca se sobrepasarán los márgenes de funcionamiento del medidor ni del patrón durante la calibración.

Los datos se tomarán de forma que quede reflejado el lugar, fecha y hora a la que se obtuvieron, así como los valores de las magnitudes involucradas, con una tabla, como por ejemplo:

Nº	U (V)	I (A)	cos φ	(Hz)	Temp. (°C)	L <sub>M</sub>	L <sub>P</sub>	c (q <sub>k</sub> )	$\bar{q}$	s(q)



donde,  $\bar{q}$ , es la media de los errores que se hayan tomado; a partir de ahora a cada  $c$  se llamará  $q_k$ :

$$\bar{q} = \frac{\sum_{k=1}^n q_k}{n}$$

y,  $s(q)$ , es la desviación típica experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n - 1}}$$

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la guía EA-4/02 [5].

Como resultado de la calibración se toma la corrección cuya expresión, considerando todas aquellas correcciones que afectarían al resultado (aunque como corrección sea nula) sería:

$$c = (L_P - L_M) - \delta_{Pcal} - \delta_{Pder} - \delta_{Pcam} - \delta_{Pr es} + \delta_{Mres} + \delta_{Mcam} - \delta_{Pint}$$

El significado de cada término de esta ecuación se recoge a continuación.

NOTA:



Podrían existir otras contribuciones (base de tiempos, frecuencia, forma de onda, etc...) pero normalmente serán despreciables si se siguen las indicaciones del procedimiento, para los patrones y equipos que son objeto del mismo normalmente, en caso contrario se debieran considerar.

Aplicando la ley de propagación de las varianzas, considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, se obtiene:

$$u^2(c) = u^2(L_P - L_M) + u^2(\delta_{Pcal}) + u^2(\delta_{Pder}) + u^2(\delta_{Pcam}) + u^2(\delta_{Ptes}) + u^2(\delta_{Mres}) + u^2(\delta_{Mcam}) + u^2(\delta_{Pint})$$

A continuación se indica como se estima cada una de estas contribuciones.

NOTA:

En el desarrollo de la expresión anterior se ha tomado  $L_P - L_M$  como una sola variable, ya que al repetir medidas puede que no se repita para un mismo punto de calibración el valor de  $L_M$  por lo que se obtendría una mayor dispersión que no es debida a errores en los aparatos sino a diferentes valores de potencia generados.

- Primero se calculará la desviación típica experimental, para la que se utilizarán los datos obtenidos durante la calibración. (contribución a la incertidumbre de tipo A):

$$u(L_P - L_M) = s(\bar{q})$$

donde:  $s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}}$  y  $s(q)$  es la que se obtuvo en la sección

5.4.

- Contribución a la incertidumbre debida a la calibración del patrón  $u(\delta_{Pcal})$ . Como el patrón de referencia tiene un certificado de calibración externo en el que viene reflejada su incertidumbre de calibración expandida  $U_P$  indicando su nivel



de confianza y el factor de cobertura,  $k$ , este dato se utilizará para hallar la:

$$u(\delta_{Pcal}) = U_P/k$$

La  $U_P$  viene expresada en tanto por ciento, porque es costumbre expresar los errores y las incertidumbres en error relativo en las magnitudes eléctricas, a veces, los certificados de calibración incluyen, además, el valor en absoluto, poniéndolo de la siguiente manera:

$$U_P = U_P' \cdot 10^{-2} \cdot L_P, \text{ en este caso se elegirá el valor } U_P.$$

En el caso de que en el certificado del patrón no figure el punto de calibración, o uno muy próximo, se tomará el máximo  $U_{Pcal}/k_{Pcal}$ .

- Contribución a la incertidumbre debida a la deriva de las medidas del patrón  $u(\delta_{Pder})$ . Ésta se puede conocer con los resultados de calibraciones anteriores, se tendrá un historial del cual se obtendrá un valor de deriva de la siguiente manera: para un punto de medida concreto se obtienen diferentes correcciones, en distintos instantes de tiempo, la diferencia en la corrección ha sido su deriva en ese periodo de tiempo, de todas estas derivas parciales se elegirá la mayor, que en este procedimiento se llamará  $D_{max}$ . Haciendo hipótesis de distribución rectangular:

$$u(\delta_{Pder}) = U_P/\sqrt{3}$$

NOTA:

La deriva también puede obtenerse considerando la regresión lineal de los datos del historial (tomando en el eje de abscisas el valor de la corrección y en el eje de ordenadas el tiempo se obtiene una distribución de la corrección con el tiempo, estos puntos de la gráfica se ajustarán lo mejor posible a una recta, por ejemplo por mínimos



cuadrados, ver Anexo II, con o que se obtendría un valor de deriva en función del tiempo.)

- Contribución a la incertidumbre debida a la realización de la calibración a una temperatura diferente de la temperatura de referencia a la que se calibró el patrón  $u(\delta_{Pcam})$ . Su influencia en la incertidumbre será del tipo distribución rectangular. Teniendo como coeficiente de temperatura  $C_0$  (expresado en tanto por ciento de error por grado de temperatura) y una variación de temperatura  $\Delta t$  obtenida como la máxima diferencia, entre la temperatura de calibración y la temperatura de la calibración actual. Se obtendrá la contribución a la incertidumbre  $u(\delta_{Pcam})$ :

$$u(\delta_{Pcam}) = \frac{C_0 \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \frac{L_P}{100}$$

- Contribución a la incertidumbre debida a la resolución patrón  $u(\delta_{Pres})$ . En un instrumento digital se considera que el máximo error debido a la resolución es de  $\pm 0,5$  veces el último dígito. Si designamos por  $a_P$  este valor, considerando la hipótesis de distribución rectangular:

$$u(\delta_{Pres}) = \frac{a_P}{\sqrt{3}}$$

- Contribución a la incertidumbre debida a la resolución del equipo a calibrar  $u(\delta_{Mres})$ . Igual que en el epígrafe anterior, designando por  $a_M$  este valor, considerando la hipótesis de distribución rectangular:

$$u(\delta_{Mres}) = \frac{a_M}{\sqrt{3}}$$

- Contribución a la incertidumbre debida a la realización de la calibración a la variación de temperatura durante la calibración



$u(\delta_{Mcam})$ . Su influencia en la incertidumbre será del tipo distribución rectangular. Teniendo como coeficiente de temperatura  $C_M$  (expresado en tanto por ciento de error por grado de temperatura) y una variación de temperatura  $\Delta t'$  obtenida como el semiintervalo de temperaturas durante la calibración. Se obtendrá la contribución a la incertidumbre  $u(\delta_{Mcam})$ :

$$u(\delta_{Mcam}) = \frac{C_M \cdot \Delta t'}{\sqrt{3}} \frac{L_M}{100}$$

- Contribución a la incertidumbre debida a la interpolación asociada a la corrección de las medidas del patrón de acuerdo con el certificado de calibración y ésta sería,  $u(\delta_{Pint})$ .

A partir de los resultados del certificado de calibración del patrón se podrían corregir las medidas del patrón a través de una recta que se ajuste lo mejor posible a los valores obtenidos en la calibración (por ejemplo, un ajuste por mínimos cuadrados). En general, esto no se va a poder hacer, se podría hacer, por ejemplo, para un valor de tensión concreto, variando la intensidad con un mismo factor de potencia.

En este caso la lectura del patrón se corregiría con el valor indicado por esta recta y se tendría una contribución a la incertidumbre que se podría estimar como la máxima desviación de cualquiera de los puntos del certificado de calibración con respecto a la recta  $D_{int}$  dividido por raíz de 3 si se considera la hipótesis de distribución rectangular; por tanto:

$$u(\delta_{Pint}) = \frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$$

Otra posibilidad sería tomar la corrección dada por el certificado de calibración en cada punto o en uno próximo al de calibración (si se hubiese tomado esta precaución al definir los puntos de



calibración) con lo que desaparecería esta contribución (habitualmente esto no es factible en todos los puntos).

NOTA:

En el caso de que no se realicen correcciones a las indicaciones del patrón en función de los resultados de la calibración, esta contribución no se consideraría y se aplicaría lo indicado en [6] F2.4.5, esto es, a la incertidumbre, calculada a través de la ley de propagación de las varianzas según se indica en este apartado se sumaría el valor máximo de la corrección no realizada sobre el patrón de acuerdo con su certificado de calibración  $U^* = U + C_{\max}$ .

La incertidumbre típica,  $u(y)$ , asociada con la salida estimada viene dada por:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$$

donde:  $u_i^2(y) = u^2(\delta_i)$

Ahora se trata de averiguar cual es el factor de cobertura. Según el Anexo E de la referencia [5] hay que calcular primero los grados de libertad efectivos de  $u(y)$  según:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

teniendo en cuenta que para la incertidumbre de tipo A se tiene,  $\nu_i = n - 1$ , y para la de tipo B se podría hacer infinito si se han tomado precauciones (tal y como dice EA-04/02 son tomar los límites superior e inferior del intervalo  $a+$  y  $a-$ , de forma que la probabilidad de que haya valores que caigan fuera de estos límites sea extremadamente pequeña) a la hora de



tomar los valores de la  $u_i(y)$ . Una vez hallado los grados de libertad efectivos se hará uso de la siguiente tabla para determinar el factor de cobertura  $k$ , para un nivel de confianza del 95,45%:

$\nu_{\text{eff}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
$k$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

**Tabla 1**

Finalmente se calcula la incertidumbre expandida  $U$  como:

$$U = k \cdot u(y)$$

que es la incertidumbre de calibración del instrumento para un determinado nivel de confianza y un factor de cobertura  $k$ .

NOTA:

En el caso de que no se hubiesen corregido los valores del patrón en función de su certificado de calibración habría que considerar lo indicado en la nota referente a  $u(\delta_{\text{Pint}})$ .



El resumen del análisis de incertidumbres sería:

Magnitud	Estimación	Incertidumbre típica $u(\delta_i)$	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
$L_M - L_P$	$\bar{q}$	$s(\bar{q})$	1	$s(\bar{q})$
$\delta_{Pcal}$	0	$U_P/k$ (*)	1	$U_P/k$ (*)
$\delta_{Pder}$	0	$D_{\max} / \sqrt{3}$	1	$D_{\max} / \sqrt{3}$
$\delta_{Pcam}$	0	$\frac{C_0 \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \frac{L_P}{100}$	1	$\frac{C_0 \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \frac{L_P}{100}$
$\delta_{Mres}$	0	$\frac{a_P}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a_P}{\sqrt{3}}$
$\delta_{Mres}$	0	$\frac{a_M}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a_M}{\sqrt{3}}$
$\delta_{Mcam}$	0	$\frac{C_M \cdot \Delta t'}{\sqrt{3}} \frac{L_M}{100}$	1	$\frac{C_M \cdot \Delta t'}{\sqrt{3}} \frac{L_M}{100}$
$\delta_{Pint}$	$D_{\bar{q}}$	$\frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$
<b>c</b>	<b>y</b>			$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u^2(\delta_i)}$

(\*) o  $U_{Pcal}/k_{Pcal}$

## 6.2. Interpretación de resultados

Se comprobará que los errores obtenidos son inferiores a las tolerancias indicadas por el fabricante o por el usuario del equipo, disminuidos en la incertidumbre de calibración. Si no fuera así habría que estudiar las razones de esa desviación y actuar en consecuencia.

Si como consecuencia de los resultados de la calibración el instrumento ha sido ajustado la calibración dejará de tener validez



y habrá que realizar otra calibración, quedando en el certificado reflejado este hecho, dejando los datos de antes y después del ajuste; si los ajustes son muy frecuentes, es posible, que el aparato necesite una reparación, tras la cual hay que hacer una nueva calibración.

La recalibración de un equipo se hará cuando el usuario del equipo lo estime conveniente; para decidirlo tendrá en cuenta el uso del medidor y los resultados obtenidos en las calibraciones anteriores. Un periodo de calibración normal para este tipo de equipos sería entre 12 y 24 meses, si las medidas derivan a lo largo de un periodo de recalibración menos que lo indicado por el fabricante o por la especificación aplicable, no será necesario que este periodo sea menor; en el caso de que supere dicha especificación habría que rebajarlo. Además si el medidor ha sido ajustado sería recomendable reducir el periodo de calibración, por ejemplo, a la mitad del periodo definido anteriormente.

## 7. REFERENCIAS

### 7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

Manual de funcionamiento del medidor de potencia a calibrar.

Manual de funcionamiento del medidor de potencia patrón.

Manual de funcionamiento del sistema de medida.

### 7.2 Otras referencias para consulta

- [1] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía. Dirección General de Calidad y Seguridad Industrial.
- [2] Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de metrología (VIM)-CEM.2000.



- [3] Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization (ISO), 1ª Ed. corrected and reprinted, 1995, Suiza, ISBN 92-67-10188-9.
- [4] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 2.2000.
- [5] EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations. European cooperation for Accreditation (EA), December 1999. (Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones. CEA-CENELEC-LC/02, Rev. 1, Entidad Nacional de Acreditación, ENAC, Enero 1998. Traducción del EAL-R2, sustituido por EA-4/02).
- [6] Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, versión española 1ª edición, Ministerio de Fomento, Centro Español de Metrología, 1998, Tres Cantos, Madrid.

## 8. ANEXOS

### 8.1. Anexo I: Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de calibración de un vatímetro

Se han realizado las medidas de la calibración de un vatímetro digital en corriente alterna a 50 Hz, por comparación, siguiendo las instrucciones de este procedimiento.

#### Características del patrón

El patrón de referencia no es autorrango y tiene los siguientes rangos nominales:

- Para intensidad de corriente 0,05 A; 0,1 A; 0,5 A; 1 A; 2 A; 5 A; 10 A.
- Para tensión 60 V; 120 V; 240 V; 480 V.



El patrón posee un certificado de calibración en el que se indica que para potencia activa a 50 Hz,, para los rangos de medida considerados,  $U_p' = 0,008\%$  con un nivel de confianza 95,45 % con  $k = 2$ , habiéndose hecho la calibración a  $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .

Dicho certificado contiene los siguientes puntos de medida: para cada tensión nominal con todas las intensidades y factor de potencia 1 y 0,5 inductivo, además para las tensiones 120 V y 240 V con las intensidades 1 A y 5 A a los factores de potencia 0,5 capacitivo, 0,8 inductivo y capacitivo, y finalmente, se han realizado medidas al 50 % de los tres rangos mayores de tensión con 5 A y factor de potencia 1.

Teniendo en cuenta el historial del patrón se observa que su deriva anual es de, a lo sumo, - 0,015 W.

### Características del vatímetro

Es un medidor autorango monofásico con un intervalo de funcionamiento de 60 V a 480 V y de 0,5 A a 5 A.

Según las prescripciones técnicas del instrumento, su intervalo de temperatura de funcionamiento va desde 19 °C hasta 27 °C. Fuera de ese intervalo habría que aplicar correcciones.

Además, indica que para los rangos de medida considerados la resolución es de 0,01 W.

### Cálculo de la incertidumbre

Los puntos donde se va a realizar la calibración son los mismos en los que se realizó la calibración del patrón.



Para el desarrollo de este ejemplo se toma un punto de medida concreto. Los resultados obtenidos quedan reflejados en la siguiente tabla:

Nº	U (V)	I (A)	cosφ	f (Hz)	Temp. (°C)	L <sub>M</sub>	L <sub>P</sub> (corregido)	c (q <sub>k</sub> )	$\bar{q}$	s(q)
1	120	2	1	50	23,5	240,08	240,016	-0,064	-0,060	0,006
						240,07	240,018	-0,052		
						240,08	240,015	-0,065		
						240,08	240,016	-0,064		
						240,07	240,015	-0,055		

La corrección del patrón ha sido de - 0,008 W.

Ahora se calcula la incertidumbre de calibración, teniendo en cuenta todas las contribuciones.

1) Desviación estándar experimental:

$$u(L_P - L_M) = s(\bar{q}) = 0,006 / \sqrt{5} = 0,003 \text{ W}$$

2) Según el certificado de calibración del patrón  $U_p' = 0,008 \%$  con  $k = 2$ .

Entonces, la  $U_p = 0,019 \text{ W}$

$$u(\delta_{Pcal}) = U_p / k = 0,010 \text{ W}$$

3) Deriva del patrón. Se ha observado que  $D_{max} = 0,015 \text{ W}$ :

$$u(\delta_{Pder}) = D_{max} / \sqrt{3} = 0,009 \text{ W}$$



- 4) Como la medida se ha hecho a una temperatura de 23,5 °C que está dentro del margen de temperatura a la que se calibró el patrón no habrá que considerarla.
- 5) La resolución del patrón (0,001 W) es despreciable frente a  $u(\delta_{Pca})$  o la  $u(\delta_{Pder})$ .
- 6) Resolución del equipo a calibrar. El máximo error cometido debido a ella será:  $a = 0,005 \text{ W}$ :

$$u(\delta_{Mres}) = a/\sqrt{3} = 0,003 \text{ W}$$

- 7) Como la calibración se ha hecho dentro del margen de temperaturas de referencia del medidor de potencia no habrá que considerarla.
- 8) Debido a que la corrección aplicada al patrón ha sido la del certificado de calibración se puede eliminar este término.

La incertidumbre estándar:

$$u^2(y) = 0,003^2 + 0,010^2 + 0,006^2 + 0,003^2$$

$$u(y) = 0,012$$

Se calcula ahora la  $\nu_{eff}$ :

$$\nu_{eff} = \frac{0,012^4}{\frac{0,003^4}{4}} = 1024$$



entonces, según la tabla 1 de la sección 6.1 se tiene:  $k = 2$ .

La incertidumbre expandida, es  $U = 0,02 \text{ W}$  con  $k = 2$ .

A continuación un resumen del análisis de incertidumbres:

Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución a la incertidumbre
$L_P - L_M$	-0,060	0,003	1	0,003
$\delta_{Pcal}$	0	0,010	1	0,010
$\delta_{Pder}$	0	0,009	1	0,009
$\delta_{Mres}$	0	0,003	1	0,003
$c$	-0,060			0,012

## 8.2. Anexo II: Ajuste por mínimos cuadrados para el cálculo

Para estimar un mensurando mediante una curva consistente en las observaciones repetidas de dicho mensurando, se recurre a ajustes lineales. Realizar un ajuste lineal por mínimos cuadrados equivale a hallar una recta que haga mínima la suma de los cuadrados de las desviaciones de las medidas, entendiendo por desviación, la diferencia entre un valor medido y la media aritmética de las medidas realizadas.

Se define la *desviación*  $D_i$  como:

$$D_i = x_i - \bar{x}.$$



Se define la *desviación media*  $\bar{D}$  como:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_i|$$

Se trata de ajustar los puntos  $(x_i, y_i)$  a una recta de ecuación:

$$y = ax + b.$$

Como primera hipótesis se supondrá que los puntos  $x_i$  procedentes de  $n$  observaciones se conocen sin incertidumbre. Se demuestra que los coeficientes  $a$  y  $b$  de la recta vienen dados por las siguientes expresiones:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$
$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$



O también:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n D_i y_i}{\sum_{i=1}^n D_i^2}$$

puesto que:

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

La recta de ajuste debe pasar necesariamente por el punto medio  $(\bar{x}, \bar{y})$ :

$$\bar{y} = a\bar{x} + b$$

