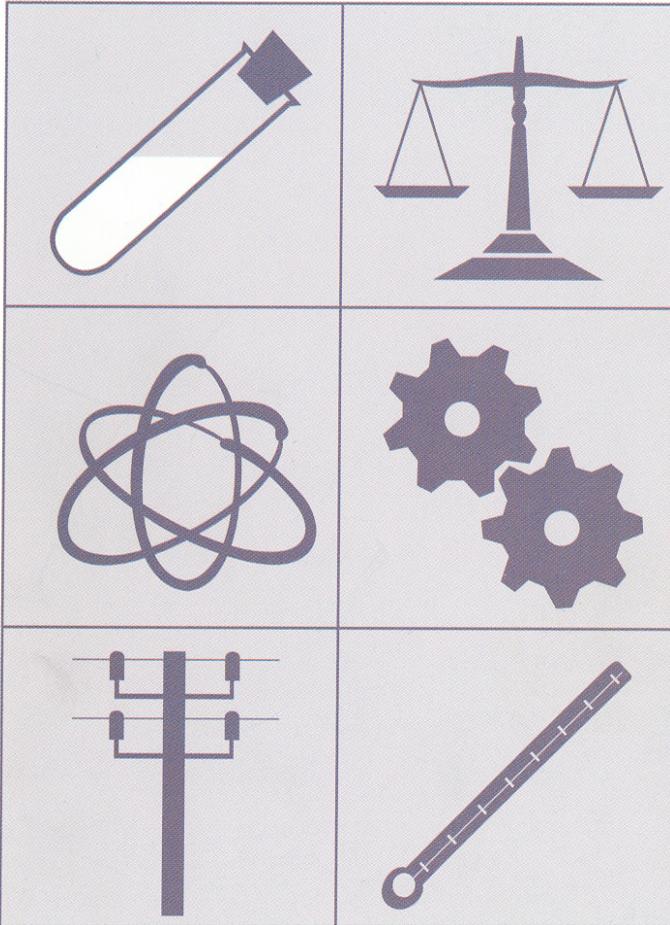


# Metrología

## PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO EL-005 PARA LA  
CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA

ñ 11



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
<b>1. OBJETO</b> .....	4
<b>2. ALCANCE</b> .....	4
<b>3. DEFINICIONES</b> .....	5
<b>4. GENERALIDADES</b> .....	8
<b>5. DESCRIPCIÓN</b> .....	11
5.1. Equipos y materiales .....	11
5.2. Operaciones previas .....	14
5.3. Proceso de calibración .....	16
5.4. Toma y tratamiento de datos .....	18
<b>6. RESULTADOS</b> .....	20
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	20
6.1. Interpretación de resultados.....	25
<b>7. REFERENCIAS</b> .....	26
<b>8. ANEXOS</b> .....	28



## 1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de medidores de energía eléctrica, destinados a trabajar en corriente continua y corriente alterna, en baja frecuencia (incluyendo la frecuencia industrial), identificados con los índices 08-01/02/03/04/10/11/20 en la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica [1] y también para los instrumentos de medida de precisiones media y baja, basados en vatímetros de los tipos electotérmicos y multiplicadores por división de tiempo (TDM).

## 2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se limita a la calibración de medidores de energía mediante comparación con un patrón medidor de energía eléctrica, y no es aplicable a medidores de elevada exactitud, que requieren el uso de instrumentos de mayor nivel metrológico.

Estos medidores pueden ser de medida de energía eléctrica, en corriente continua o en corriente alterna, estos últimos destinados a trabajar en baja frecuencia (incluyendo la frecuencia industrial, 50 Hz).

En corriente alterna los medidores pueden ser de energía eléctrica aparente activa y reactiva, tanto en sistemas monofásicos como polifásicos. Este procedimiento no es aplicable a medida trifásica salvo que estén formados por tres sistemas de medida monofásicos independientes, en cuyo caso se calibrarán cada uno por separado.

Como consecuencia de existir diferencias funcionales entre los medidores 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 el presente procedimiento.

Patrón de referencia [9] (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 [9] (6.7):

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

NOTA 1: Un patrón de trabajo es habitualmente calibrado con un patrón de referencia.

NOTA 2. Un patrón de trabajo utilizado corrientemente para asegurar que las medidas están realizadas correctamente se denomina patrón de control.

Ajuste [9] (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 [9] (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.

NOTA 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.



NOTA 2: Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metroológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.

NOTA 3: Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento denominado, a veces certificado de calibración o informe de calibración.

### Desviación estándar experimental [9] (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:

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

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

NOTA 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.

NOTA 2: La expresión  $s / \sqrt{n}$  es una estimación de la desviación estándar de la distribución de la media de  $\bar{x}$ , y se denomina desviación estándar experimental de la media.

NOTA 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 [9] (5.20):

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

NOTA 1: Dado que un valor verdadero no puede determinarse, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero.



NOTA 2: Este concepto se aplica principalmente cuando se compara el instrumento con un patrón de referencia.

NOTA 3: Para una medida materializada, la indicación es el valor que le ha sido asignado.

### Error intrínseco (de un instrumento de medida) [9] (5.24):

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

### Incertidumbre de medida [9] (3.9):

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

NOTA 1: El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado.

NOTA 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 sus desviaciones estándar, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.

NOTA 3: Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor de 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”[10] donde sus bases están expuestas con detalle (en particular ver el punto 2.2.4 y el anexo D de la misma).

### Resolución (de un dispositivo visualizador) [9] (5.12):

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



NOTA 1: Para un dispositivo visualizador digital, diferencia de la indicación que corresponde al cambio de una unidad en la cifra menos significativa.

NOTA 2: Este concepto se aplica también a un dispositivo registrador

Trazabilidad [9] (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 función de un medidor de energía es sumar e indicar este trabajo eléctrico que corresponde al consumo de la energía, en forma continua.

La unidad de energía en el S.I. es el julio, pero, por razones comerciales, para la energía eléctrica, la unidad utilizada es el vatio-hora (Wh) o el kilovatio-hora (kWh). La relación entre ambas es:  $1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J} = 3,6 \text{ kJ}$ .

Los medidores pueden ser de medida de energía eléctrica en corriente continua y en corriente alterna. En el segundo caso lo que ocurre es que la tensión y la intensidad de corriente no suelen estar en fase y ello conlleva que la energía activa no coincida con la aparente, como ocurre en corriente continua. Cuando se trata de ondas senoidales (como ocurre en la red de suministro industrial), se tienen tres tipos de energía, que se definen a continuación, y para cada uno de ellos existe un tipo de medidor:

- **Energía eléctrica activa**

$$W_P = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot \cos \varphi \cdot dt \quad (2)$$

expresada esta magnitud en vatios-hora (Wh).

- **Energía eléctrica reactiva**

$$W_Q = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot \text{sen } \varphi \cdot dt \quad (3)$$

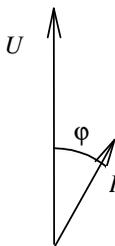
expresada esta magnitud en voltamperios reactivos-hora (varh).

- **Energía eléctrica aparente**

$$W_S = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot dt \quad (4)$$

expresada esta magnitud en voltamperios-hora (vah).

Donde  $\varphi$  de estas ecuaciones 1 y 2 es la fase entre la tensión y la intensidad de corriente y el  $\cos \varphi$  es el llamado factor de potencia.



**Fig. 1: Factor de potencia  $\cos \varphi$**

Un vatihorímetro es un medidor de energía eléctrica (activa si se trata de corriente alterna) cuya indicación viene en vatios-hora (Wh), y un varihorímetro es un medidor de energía eléctrica reactiva cuya indicación viene en voltamperios reactivos-hora (varh).

Como se ha visto la energía depende de la tensión, la intensidad de corriente, el tiempo, y si se trata de una red de corriente alterna, además depende del factor de potencia. El funcionamiento de un medidor de energía, consecuentemente, está basado en estas magnitudes, aunque el diseño y la construcción sea diferente para los distintos tipos de medidores; no obstante, en general, tienen dos bornes de tensión y dos



de intensidad de corriente que alimentan de forma separada sus circuitos de tensión y de intensidad.

Se va a calibrar un medidor de energía eléctrica por comparación con otro medidor. En este procedimiento se llamará patrón al medidor que actúa como calibrador y medidor al que va a ser calibrado. Se elige el método por comparación por ser el más sencillo y el más fiable.

Puesto que la energía es una magnitud que depende del tiempo, éste será muy importante durante la realización de las medidas. El tiempo de medida ha de ser el mismo para los dos medidores y las medidas hay que realizarlas a la vez, para asegurarse de que las medidas son, exactamente, sobre la misma cantidad de energía en las mismas condiciones. El tiempo ha de ser lo suficientemente largo para evitar errores debidos a la fluctuación de las ondas, por otra parte los dos medidores han de estar sincronizados, es decir, el tiempo de medida ha de ser el mismo y al mismo tiempo. Esto asegura que ambos instrumentos midan la misma señal, así que lo que nos interesa es la diferencia de lecturas entre ambos.

Un sistema trifásico es una combinación de tres sistemas monofásicos cuyas tensiones están desfasadas  $120^\circ$  en el tiempo. Por lo tanto, la energía activa total medida por un medidor de energía trifásico es la suma de la individuales de cada uno de los sistemas monofásicos.

- **Símbolos y Abreviaturas**

$E_r \%$	error relativo en tanto por ciento
$L_{\text{Patrón}}$	lectura de la medida indicada por el patrón
$L_{\text{Medidor}}$	lectura de la medida indicada por el medidor a calibrar
$q_k$	cada observación independiente
$\bar{q}$	la media aritmética
$D_{-q}$	valor de la corrección de las medidas del patrón de acuerdo con su certificado de calibración
$s(q)$	desviación típica de cada estimación de las magnitudes de entrada
$\overline{s(q)}$	desviación típica experimental de la media



$U$	<i>incertidumbre expandida</i>
$\delta_i$	<i>corrección debida a la contribución de “i”.</i>
$u (y)$	<i>incertidumbre típica combinada</i>
$a, b$	<i>coeficientes de la recta de regresión: <math>y = ax+b</math></i>
$x, y$	<i>coordenadas de la recta</i>
$r$	<i>coeficiente de correlación</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 y características:

- Un medidor de energía eléctrica, que actuará como patrón en la calibración, cuya exactitud debiera ser mejor que la del medidor a calibrar (siempre se aconseja que sea al menos cuatro veces mejor).

Este patrón de referencia del laboratorio debe poseer un certificado de calibración en vigor, el cual habrá sido extendido por un laboratorio acreditado en el ámbito de su acreditación o un laboratorio nacional, esto asegura la trazabilidad de las medidas.

- Un sistema que suministre la energía que ha de ser medida. 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 conseguir 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.

- Contador de pulsos patrón, en el caso de que exista una salida de pulsos en el medidor de energía.

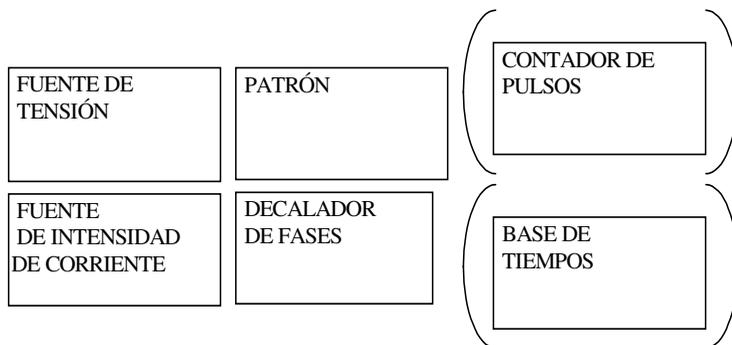
NOTA: Los medidores poseen dos formas de transmitir su información, directamente, mediante la lectura que aparece en el visualizador o mediante una relación numérica entre la cantidad de energía registrada por el medidor y una señal de salida que puede ser: una salida de pulsos (por ejemplo TTL), una salida de pulsos ópticos (un led que emite destellos), o un disco giratorio con una marca que permite contar el número de revoluciones que da ese disco.

Para utilizar esta segunda forma de información será necesario el uso de un contador de pulsos, el cual estará conectado a la salida de pulsos del medidor en el primer caso y a una cámara lectora de pulsos ópticos o de revoluciones del disco en los otros dos casos. En todos los casos la cantidad de energía registrada será proporcional al número de pulsos. Esta proporción el fabricante la expresa como una constante, y es la llamada constante del medidor, puede venir expresada en cantidad de energía por pulso o en número de pulsos por unidad de energía (por ejemplo 20 000 pulsos/kWh).

Los contadores de pulsos tienen dos entradas de pulsos, así tienen por una los pulsos del medidor y por la otra los pulsos del patrón, los que hacen es comparar la cantidad de energía medida por uno y por otro y dar el error relativo directamente.

- Sistema de sincronización. Cuando no se esté utilizando un contador de pulsos, y el patrón no disponga de un sistema propio de sincronización (a menudo, los patrones están provistos de un sistema de este tipo, pudiendo utilizar una base de tiempos propia o externa, para controlar a otros instrumentos), pero el instrumento a calibrar y el patrón tienen una entrada de sincronización, se puede utilizar una base tiempos externa provista de un interruptor de arranque/parada, para que empiecen la medida y la terminen al mismo tiempo.

- Un sistema de medida constará de todos estos elementos (el contador de pulsos y la base de tiempo sólo si procede), véase figura 2.



**Figura 2: Sistema de medida**

- 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:

- 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. Y en su caso adaptadores según la compatibilidad de los medidores.
- Cronómetro. Cuando los instrumentos no se pueden sincronizar como se ha supuesto en el párrafo anterior, porque carecen de sistema de sincronización se utilizará un cronómetro para tomar lecturas de los visualizadores a intervalos regulares de tiempo, el periodo de medición debe ser lo suficientemente grande como para eliminar las diferencias entre las dos medidas debido a la falta de sincronía.
- Nivel, para asegurar la posición en que se coloca el medidor, en caso de que sea necesario.



- Termómetro. Con él se tomarán los valores de la temperatura a la que se realiza la calibración.
- Fasímetro o cofímetro. Con él se mide el ángulo de fase entre la tensión y la intensidad de corriente.

NOTA: Generalmente va incorporado en el sistema de suministro de energía.

## 5.2. Operaciones previas

Antes de iniciar la calibración se comprobará que:

- El medidor ha de estar identificado de forma permanente y unívoca con su marca, modelo y número de serie; si no lo estuviera se le asignará una identificación unívoca (por ejemplo, la del usuario) que se fijará sobre el instrumento para poder asociarle los resultados de esta calibración y de las que se le hagan en el futuro.
- Los bornes están marcados de forma que puedan ser identificados sin ambigüedad, y si el instrumento es trifásico debe acompañarle un esquema de conexionado (a ser posible fijado a la caja).
- 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
- 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. Una vez alimentados los circuitos de medida se esperará un tiempo prudencial para tomar datos, hasta que la señal a medir se haya estabilizado.



- 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.
- Si se trata de un medidor que tenga una posición de funcionamiento determinada será importante asegurarse de que se encuentra en esa posición con el nivel.
- Algunos medidores de energía vienen equipados con el llamado puente de tensión, que es un puente que une los bornes positivos (o "high") de tensión e intensidad de corriente (de una misma fase, si se trata de un sistema polifásico), estos medidores toman por el mismo borne la tensión, para su circuito de tensión, y la intensidad de corriente para su circuito de intensidad. Cuando hay que verificarlos en el lugar donde están instalados, hay que usar carga real. La carga real no permite la regulación independiente de la tensión y la intensidad de corriente, la verificación es de menor precisión y supone un elevado gasto de energía. Hoy día existen equipos de medida (son equipos de precisión media y alta, y coste elevado) que permiten realizar una calibración reproduciendo las condiciones de carga real (con el puente de tensión puesto), aunque, por supuesto, siguen siendo equipos de carga ficticia o fantasma, por lo que sí se pueden regular la tensión y la intensidad de forma independiente. Cuando se les haga una calibración con carga fantasma, sin simular condiciones reales, habrá que quitar el puente de tensión para que el medidor reciba separadamente la alimentación de sus circuitos.
- Cuando se disponga un patrón con buenas características de transportabilidad se podrán realizar las calibraciones in situ, tomando las precauciones necesarias para su transporte, pero, en general, los patrones no deben moverse de su emplazamiento habitual, ya que al trasladarlo de un lugar a otro podrían variar sus características metroológicas. Por lo tanto, las calibraciones deben realizarse en el laboratorio o sala de calibración donde se encuentra el patrón.

### 5.3. Proceso de calibración

Se conectarán el medidor y el patrón, o los patrones, a la fuente con la tensión en paralelo, la intensidad de corriente en serie tal y como se indica en la figura 3, y en el caso de que sea necesario la señal de sincronización. Si hay contador de pulsos, también se conectarán a éste las salidas de pulsos.

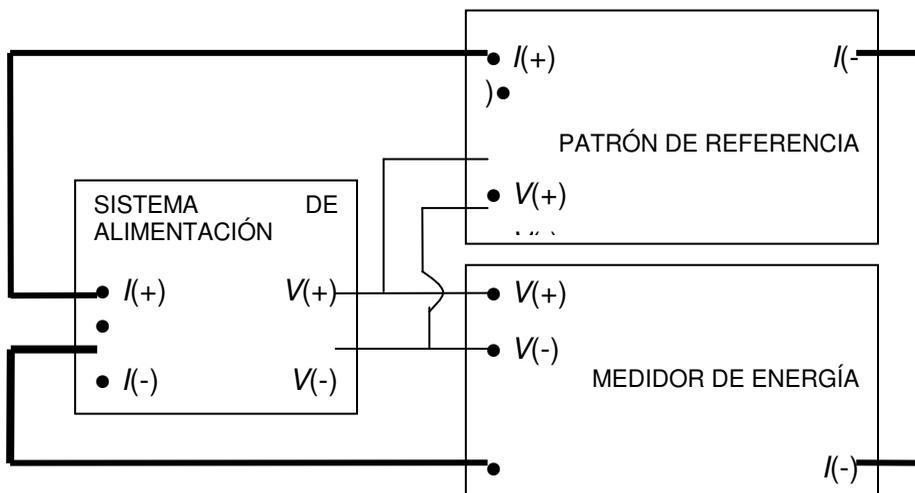


Figura 3: Conexiones

Puesto que la energía es una 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,  $\cos\varphi = 1$ , entonces se ajustan las fuentes a estos valores.

Existen infinitas 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 energía se calibrarán en varios puntos, de manera que cubra todos sus valores de tensión e intensidad nominal y con distintos factores de potencia. En el ANEXO III se ponen algunos ejemplos.

La duración de la medida será la recomendada por el fabricante, o en su defecto la necesaria para minimizar los errores debidos a la sincronización y a la posible distorsión de la señal de la fuente; para ello la cantidad de energía medida será de un valor significativo para la capacidad de medida del aparato. Por ejemplo, si un medidor tiene una resolución de 0,1 Wh, para los rangos de 5 A y 120 V con factor de potencia entre 1 y 0,5 inductivo o capacitivo, la duración será tal que se obtengan al menos 100 Wh.

Los manuales de los medidores suelen incluir el número mínimo de pulsos o de revoluciones que deben contarse para cada punto de medida para poder desprestigiar los posibles errores mencionados en el párrafo anterior. En cualquier caso, un posible criterio sería seleccionar el número de pulsos o revoluciones en función de la constante del medidor y del valor de energía a medir. Por ejemplo, la constante es igual a 60 revoluciones/kWh, por lo tanto, si se desean medir 10 kWh serán necesarias 600 revoluciones.

En muchos casos la recomendación es de tiempo de medida, y entonces el patrón y el medidor de energía a calibrar disponen de señal de sincronización automática que suele ser de 100 s. En caso de que la sincronización sea manual, la incertidumbre en la medida de tiempo (incluida sincronización y parada), deberá aportar una incertidumbre pequeña respecto a la incertidumbre de calibración que se quiera conseguir, para ello si la incertidumbre de medida de tiempo es, por ejemplo, 0,5 s y la incertidumbre de calibración que se pretende obtener es del orden del 0,1 % el tiempo de medida debiera ser de 500 s.

Es aconsejable realizar las medidas de cada punto varias veces (por ejemplo 5 veces) y deben repetirse las mediciones en días diferentes.

NOTA: Como existen redes trifásicas, hay medidores trifásicos y, por tanto, los sistemas de medida son trifásicos. Sin embargo, los patrones de referencia de los que se suele disponer son monofásicos, así que cuando un patrón de trabajo trifásico tiene que referenciarse a un patrón de referencia monofásico han de realizarse las medidas con cada una de las fases de forma sucesiva, o si se



dispone de ellos, utilizar tres patrones monofásicos, cada uno de ellos conectado a cada una de las fases. Cuando, debido a condiciones especiales de cargas, un medidor trifásico sólo pueda medir correctamente en la situación de cargas equilibradas, será necesario utilizar un patrón trifásico y aplicar el método general.

#### 5.4. Toma y tratamiento de datos

Si el sistema de calibración no dispone de un contador de pulsos de manera que ofrezca directamente el error entre las medidas lo que hay que hacer es tomar a mano las lecturas de los dos medidores  $L_{\text{Medidor}}$  y  $L_{\text{Patrón}}$ , cada vez que se detenga la medición.

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

$$E = L_{\text{Medidor}} - L_{\text{Patrón}} \quad (5)$$

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

$$E_r \% = \frac{L_{\text{Medidor}} - L_{\text{Patrón}}}{L_{\text{Patrón}}} \times 100 \quad (6)$$

Si la calibración se hace con un contador de pulsos (o un sistema integrado de medida) el resultado será expresado de esta misma forma directamente por el sistema de medida.

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:



**Tabla 1: Modelo para toma de datos**

Nº	$U$ (V)	$I$ (A)	$\cos \varphi$	Temp. (°C)	$L_{Medidor}$	$L_{Patrón}$	$E$ ( $q_k$ )	$E_r\%$	$\bar{q}$	$s(q)$

o una como la siguiente tabla 2, cuando por las características del sistema de medida empleado sólo se tengan como datos los errores relativos:

**Tabla 2: Modelo para toma de datos sin lecturas  $L$**

Nº	$U$ (V)	$I$ (A)	$\cos \varphi$	Temp. (°C)	$E_r\%$ ( $q_k$ )	$\bar{q}$	$s(q)$

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

$$\bar{q} = \frac{\sum_{k=1}^n q_k}{n} \tag{7}$$

y  $s(q)$ , es la desviación típica que particularizando la ecuación 1 para  $q_k$  obtendremos:



$$s(q) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (8)$$

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la guía EAL-R2 [13].

Como resultado de la calibración se toma el error cuya expresión, considerando todas aquellas correcciones (teniendo en cuenta que también hay que expresarlas en tanto por ciento de error) que afectaría al resultado (aunque como corrección sea nula) sería:

$$E = \frac{L_M - L_P}{L_P} \times 100 - \delta_{Pcal} - \delta_{Pder} - \delta_{Pcam} + \delta_{Mres} + \delta_{Mcam} - \delta_{Pint} \quad (9)$$

Aplicando la ley de propagación de las varianzas, considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes y que  $L_P \cong L_M$ , se obtiene:

$$u^2(E) = u^2\left(\frac{L_M - L_P}{L_P} \times 100\right) + u^2(\delta_{Pcal}) + u^2(\delta_{Pder}) + u^2(\delta_{Pcam}) + u^2(\delta_{Mres}) + u^2(\delta_{Mcam}) + u^2(\delta_{Pint}) \quad (10)$$

Por otra parte hay que tener en cuenta que todas las contribuciones  $u(\delta_i)$  han de estar expresadas como tanto por ciento respecto a la lectura del patrón o del medidor a calibrar, que es prácticamente la misma.

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

NOTA: En el desarrollo de la expresión anterior se ha tomado la ecuación 6  $\frac{L_M - L_P}{L_P} \times 100$  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 energía generados.

- Primero se calculará la desviación típica experimental, para la que se utilizarán los datos obtenidos durante la calibración con la ecuación 6. (contribución a la incertidumbre de tipo A)

$$u\left(\frac{L_M - L_P}{L_P} \times 100\right) = s(\bar{q}) \quad (11)$$

donde :  $s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}}$  y  $s(q)$  se obtienen de las ecuaciones 7 y 8.

- Contribución a la incertidumbre debida a la calibración del patrón  $u(\delta_{\text{Pcal}})$ . Como el patrón de referencia tiene un certificado de calibración externo en el que viene reflejada su incertidumbre de calibración expandida UP indicando su nivel de confianza y el factor de cobertura,  $k$ , este dato se utilizará para hallar la:

$$u(\delta_{\text{Pcal}}) = U_P/k \quad (12)$$

La  $U_P$  viene expresada en tanto por ciento, porque es costumbre expresar los errores en error relativo en las magnitudes eléctricas, a veces, los certificados de calibración incluyen, además, el valor en absoluto, poniéndolo de la siguiente manera:  $U_P' = U_P \cdot 10^{-2} \cdot L_P$ , en este caso se elegirá el valor  $U_P$ .

NOTA: Aquí se considera incluida la resolución del patrón.

- Contribución a la incertidumbre debida a la deriva de las medidas del patrón  $u(\delta_{\text{Pder}})$ . Ésta se puede conocer con los resultados de calibraciones anteriores, se tendrá un historial del cual se calculará un valor máximo de la deriva del error del patrón entre calibraciones  $D_{\text{max}}$ , donde  $D_{\text{max}}$ , por lo tanto, también estará en tanto por ciento. Haciendo hipótesis de distribución rectangular:



$$u(\delta_{Pder}) = D_{\text{máx}}/\sqrt{3} \quad (13)$$

NOTA: La deriva también puede obtenerse considerando la regresión lineal de los datos del historial (véase ANEXO IV).

- Contribución a la incertidumbre debida a la realización de la calibración a una temperatura diferente de la temperatura de referencia del 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  $u(\delta_{Pcam})$ :

$$u(\delta_{Pcam}) = \frac{C_0 \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

- Contribución a la incertidumbre debida a la resolución del equipo a calibrar  $u(\delta_{Mres})$ . La resolución se encuentra en el manual de especificaciones del fabricante del equipo y hay que expresarla como un tanto por ciento de la lectura. Esto podría venir en forma de tabla, si el equipo tiene varios rangos de medida. Si designamos por  $a$  el valor de resolución requerido, considerando la hipótesis de distribución rectangular:

$$u(\delta_{Mres}) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

- Contribución a la incertidumbre debida a la realización de la calibración a una temperatura diferente de la temperatura de referencia del medidor  $u(\delta_{Mcam})$ . Su influencia en la incertidumbre será del tipo distribución rectangular. Teniendo como coeficiente de temperatura  $CM$  (expresado en tanto por ciento de error por grado de temperatura) y una variación de temperatura  $\Delta t'$  obtenida como el semi-intervalo de temperaturas durante la calibración. Se obtendrá la contribución a la incertidumbre  $u(\delta_{Mcam})$  :



$$u(\delta_{Mcam}) = \frac{C_M \cdot \Delta t'}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

- 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, (véase ANEXO IV).

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, en valor relativo, de cualquiera de los puntos del certificado de calibración con respecto a la recta  $D_{int}$  dividido por raíz de 3, sí se considera la hipótesis de distribución rectangular, por tanto:

$$u(\delta_{Pint}) = \frac{D_{int}}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

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 [10] 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:

$$U^* = U + C_{m\acute{a}x} \quad (18)$$

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.

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



$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad (19)$$

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 [13] hay que calcular primero los grados de libertad efectivos de  $u_i(y)$  según:

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (20)$$

teniendo en cuenta que para la incertidumbre de tipo A se tiene,  $v_i = n - 1$ , y para la de tipo B se podría hacer infinito si se han tomado precauciones 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 un nivel de confianza del 95,45%:

**Tabla 3: Factor de cobertura  $k$  según los grados efectivos de libertad**

$v_{eff}$	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

Finalmente se calcula la incertidumbre expandida  $U$  como:

$$U = k \cdot u(y) \quad (21)$$

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

El resumen del análisis de incertidumbres sería:



**Tabla 4: Análisis de las incertidumbres**

Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre típica $u(\delta_i)$	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
$E_r \%$	$\bar{q}$	$s(\bar{q})$	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	$\frac{C_0 \cdot \Delta t}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{C_0 \cdot \Delta t}{\sqrt{3}}$
$\delta_{Mres}$	0	$\frac{a}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a}{\sqrt{3}}$
$\delta_{Mcam}$	0	$\frac{C_M \cdot \Delta t'}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{C_M \cdot \Delta t'}{\sqrt{3}}$
$\delta_{Pint}$	$D_q^-$	$\frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$
$E$				$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u^2(\delta_i)}$

## 6.2. Interpretación de resultados

En muchos casos el usuario del equipo define unos límites de tolerancia para los errores obtenidos en la calibración, en función del uso que va a dar al equipo (especificaciones del fabricante, norma, especificación interna, etc...).

En estos casos se debe comprobar que los errores obtenidos son inferiores a los límites de error disminuidos en la incertidumbre de calibración. Si no fuera así habría que estudiar las razones de esa desviación, y en su caso, ajustar el equipo, o tal vez proceder a su reparación.



Si un medidor es ajustado, la calibración hay que realizarla de nuevo, quedando en el certificado reflejado este hecho, dejando datos antes y después del ajuste; si estos ajustes son muy frecuentes, es posible, que el aparato necesite una reparación por parte de la casa fabricante.

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 2 años menos que lo indicado por el fabricante o por la especificación aplicable, no será necesario que el periodo de recalibración sea menor; en el caso de que supere dicha especificación habría que rebajar este periodo. Además si el medidor ha sido ajustado sería recomendable reducir el periodo de calibración a la mitad del periodo definido anteriormente.

## 7. REFERENCIAS

### 7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración.

- Manual de funcionamiento del medidor de energía a calibrar.
- Manual de funcionamiento del medidor de energía 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. 1994.

[2] Norma UNE EN UNE-EN 50470-1 “Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a.). Requisitos generales, ensayos y condiciones de ensayo. Parte 11: Equipos de medida (índices de clase A, B y C)”

[3] Norma UNE-EN 50470-2 “Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a.). Parte 2: Requisitos particulares. Contadores electromecánicos de energía activa (índices de clase A y B)”.

[4] Norma UNE-EN 50470-3 “Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a.). Parte 3: Requisitos particulares. Contadores estáticos de energía activa (índices de clasificación A, B y C)”.



- [5] Norma UNE EN 62052-11 “Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a.). Requisitos generales, ensayos y condiciones de ensayo. Parte 11: Equipos de medida”.
- [6] Norma UNE-EN 62053-21 “Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a.). Requisitos particulares. Parte 21: Contadores estáticos de energía activa (clases 1 y 2)”.
- [7] Norma UNE-EN 62053-22 “Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a.). Requisitos particulares. Parte 22: Contadores estáticos de energía activa (clases 0,2 y 0,5)”.
- [8] Norma UNE-EN 62053-23 “Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a.). Requisitos generales, ensayos y condiciones de ensayo. Parte 23: Contadores estáticos de energía reactiva (clases 2 y 3)”.
- [9] 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
- [10] Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO 1993. (ISBN92-67-10188-9).
- [11] Norma UNE-EN 30012-1. Requisitos de aseguramiento de la calidad de los equipos de medida. Parte 1: Sistemas de Confirmación Metrológica de los Equipos de Medida. Octubre 1994.
- [12] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 4. 2003.
- [13] Guía EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Edition1. EA 1999.
- [14] Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Versión Española. Centro Español de Metrología. 3ª Edición. Septiembre 2008. NIPO: 706-09-002-6.
- [15] 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).
- [16] Norma UNE 21-378-86 “Equipo de ensayo de contadores de energía eléctrica”.



## 8. ANEXOS

ANEXO I: Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de calibración de un medidor.

ANEXO II: Otros métodos de medida de energía.

ANEXO III: Ejemplos de definición de puntos de calibración.

ANEXO IV: Ajuste por mínimos cuadrados para el cálculo de la recta de regresión.

### **ANEXO I: Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de calibración de un medidor.**

Se realiza la calibración de un medidor de energía eléctrica activa auto rango por un sistema de medida de energía de la siguiente manera: El medidor posee una salida de pulsos proporcional a la cantidad de energía registrada, esto viene expresado mediante la constante del medidor que es  $C = 0,000\ 01\ \text{Wh/pulso}$ , el sistema de medida cuenta con un contador de pulsos e integra la medida en un tiempo predeterminado, ofreciendo, directamente, como resultado de la medición el error relativo en tanto por ciento, tal y como se indica en el apartado 5.4.

Por su manual se sabe que tiene 0,025 0 % de variación máxima del error, siempre que las mediciones se tomen dentro de los valores siguientes:

- Tensión: de 60 V a 600 V, con cambio automático de rango, con los rangos siguientes: 120 V — 240 V — 480 V — 600 V.
- Intensidad de corriente: de 0,2 A a 50,0 A con cambio automático de rango, con los rangos siguientes: 0,2 A — 0,5 A — 5<sup>a</sup> — 50 A.
- Con factor de potencia entre 0 y 1.
- La temperatura ambiente entre 20 °C y 30 °C, fuera de esa temperatura y entre 0 °C y 50 °C tiene un coeficiente de temperatura  $CM = 0,001\ \% / \text{°C}$  como máximo.



Por el certificado de calibración del patrón se tiene:

$U_p = 0,005\ 0\ \%$  con un nivel de confianza 95,45 % con  $k = 2$  y una desviación máxima de  $C_{m\acute{a}x} = + 0,005\ 0\ \%$ .

Se eligen los valores que se consideran más idóneos y se obtiene con el modelo de la tabla 2 particularizado para este caso los siguientes resultados en tabla 5:

**Tabla 5: Resultados**

Nº	Tensión (V)	Corriente (A)	Cos $\phi$	$E_r\ \%$	$\bar{q}$	$s(q)$
1	240	5	1	-0,008 1 -0,008 -0,007 9 -0,008 -0,006 8	-0,007 8	0,000 5
2	220	5	1	-0,008 -0,006 3 -0,006 5 -0,006 4 -0,007 9	-0,007 0	0,000 9
3	220	5	0,5 ind	-0,004 1 -0,007 4 -0,003 9 -0,003 5 -0,006 7	-0,005 1	0,001 8
4	120	5	1	-0,005 4 -0,005 3 -0,005 2 -0,004 9 -0,005 1	-0,005 2	0,000 2
5	120	5	0,8 ind	-0,006 1 -0,007 9 -0,006 3 -0,008 -0,008	-0,007 3	0,001 0



Nº	Tensión (V)	Corriente (A)	Cosφ	$E_r$ %	$\bar{q}$	$s(q)$
6	120	5	0,8 cap	-0,004 7 -0,005 1 -0,003 5 -0,004 7 -0,003	-0,004 2	0,000 9
7	120	5	0,5 ind	-0,006 -0,005 5 -0,008 7 -0,008 8 -0,008 7	-0,007 5	0,001 6
8	220	5	0,5 ind	-0,004 1 -0,007 4 -0,003 9 -0,003 5 -0,006 7	-0,005 1	0,001 8
9	120	5	0,5 cap	-0,001 1 -0,001 -0,000 8 0,001 6 0,001 6	0,000 1	0,001 4
10	120	2	1	-0,006 9 -0,006 9 -0,007 8 -0,007 2 -0,006 6	-0,007 1	0,000 5
11	120	2	0,5 ind	-0,009 3 -0,009 5 -0,009 3 -0,009 5 -0,006 8	-0,008 9	0,001 2



Nº	Tensión (V)	Corriente (A)	Cosφ	$E_r$ %	$\bar{q}$	$s(q)$
12	120	2	0,5 cap	-0,002 5 0,000 1 -0,002 5 -0,002 5 -0,002 8	-0,002 0	0,001 2
13	120	1	1	-0,009 1 -0,008 -0,009 2 -0,009 1 -0,009 1	-0,008 9	0,000 5
14	120	0,5	1	-0,010 6 -0,011 -0,009 7 -0,009 4 -0,008 5	-0,009 8	0,001 0

La calibración se ha realizado entre 22,9 °C y 23,3 °C.

Ahora se calcula la incertidumbre de calibración, teniendo en cuenta que todas las contribuciones han de estar en porcentaje con respecto a la lectura en cada punto de calibración:

1º) Desviación típica experimental:

$$u(E_r \%) = s(\bar{q}) = 0,001 8 / \sqrt{5} = 0,00 08 \%$$

Nota: Se ha tomado la  $s(q)$  de mayor valor, aunque se podría haber hecho para cada punto de medida.

2º) Según el certificado de calibración del sistema de medida de energía patrón utilizado se tiene:  $U_p = 0,005 0 \%$  para un nivel de confianza del 95,45 % con  $k = 2$

$$u(\delta_{p\text{cal}}) = U_p/k = 0,002 5 \%$$

3º) Deriva del patrón. Se ha observado que  $D_{\text{max}} = 0,0002 \%$



$$u(\delta_{pder}) = D_{max} / \sqrt{3} = 0,0001 \%$$

4º) Como la calibración se ha hecho a la misma temperatura que la de referencia del patrón no habrá que considerarla.

5º) Resolución del equipo a calibrar. Puesto que la medición se ha realizado por conteo de pulsos, la resolución tal y como viene definida en la sección 3 no es aplicable, ya que la indicación del visualizador no es tenida en cuenta. Aquí la resolución estará relacionada con el valor de un pulso, ya que es la mínima cantidad de la magnitud medida que se puede percibir de forma significativa durante la medición, y se sabe que cada pulso equivale a 0,00001 Wh. Lo que se ha hecho es tomar un tiempo de integración adecuado para que en todos los puntos de la calibración la contribución a la incertidumbre sea despreciable.

Si la resolución R se expresa en porcentaje:  $R\% = \frac{R}{L_M} \times 100$  y la

lectura del medidor teórica es:  $L_M = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi}{3600} \times t$ , se tomaría

$t = 100$  s para todos los puntos, menos para los puntos del Nº 10 al 14 de la tabla 5.

6º) Como la calibración se ha hecho dentro del margen de temperaturas de referencia del medidor de energía no habrá que considerarla.

7º) No se realiza corrección a las indicaciones del patrón.

Y los resultados sustituyendo los valores serán:

- La incertidumbre típica:  $u^2(y) = 0,0008^2 + 0,0025^2 + 0,0001^2$   
resultando  $u(y) = 0,0026$ .



- Los grados efectivos de libertad serán:

$$v_{eff} = \frac{0,0026^4}{\frac{0,0008^4}{4}} = 464,941$$

entonces con estos grados, según la tabla 3 se obtiene un factor de cobertura  $k=2$ .

- La incertidumbre expandida, es  $U = 0,005\ 2\%$  con  $k=2$ .
- Como no se ha realizado la corrección a las indicaciones del patrón se toma la  $C_{m\acute{a}x} = + 0,005\ 0\%$  quedando:

$U^* = 0,010\ 2\%$  con  $k = 2$  para un nivel de confianza del 95,45% y utilizando el modelo de tabla 4 obtendremos la tabla 6 particularizada para este caso:

**Tabla 6: Resultados de la incertidumbre y sus contribuciones**

Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución a la incertidumbre
$E_r\ \%$	-0,005 1	0,000 8	1	0,000 8
$\delta_{Pcal}$	0	0,002 5	1	0,002 5
$\delta_{Pder}$	0	0,000 1	1	0,000 1
$E$	-0,005 1			0,002 6

## ANEXO II: Otros métodos de medida de energía.

- **Medición de la energía midiendo las magnitudes de las que depende.**

Para la calibración se podría hacer suministrando al medidor una cantidad de energía conocida y comprobar el error que comete al medirla, teniendo en cuenta que:

$$W = V \cdot I \cdot \Delta t \quad (22)$$



pero esto exigiría estar en posesión de un voltímetro y de un amperímetro de cualidades metrológicas bien conocidas y de una exactitud muy elevada. También sería necesario un cronómetro patrón para medir el periodo de tiempo y si se trata de un medidor para corriente alterna un fasímetro patrón, ya que sería:

$$W_P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \Delta t \quad (23) \text{ y } (24)$$
$$W_Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \Delta t$$

Las fuentes de tensión y de intensidad de corriente han de ser de una gran estabilidad, para poder asegurar que el valor de energía calculado es semejante a la energía consumida.

Este método es recomendable sólo para medidores de muy alto nivel de exactitud en laboratorios que cuentan con grandes medios de medida.

- **Medición de la energía midiendo la potencia**

Otra forma de calibrar un medidor de energía sería utilizando un vatímetro patrón y un cronómetro patrón, este método sería muy similar al que se ha desarrollado en este procedimiento, con:

$$W = P \cdot \Delta t \quad (25)$$

pero la desventaja es que el vatímetro nos da lecturas de potencia instantánea o de potencia media en un periodo de tiempo, pero no integra la potencia de cada instante, por lo tanto, habría que tener en cuenta que, si la potencia no resulta muy estable a lo largo del tiempo de la medida, el error calculado con la potencia media sería demasiado elevado para el medidor de energía.

### **ANEXO III. Ejemplos de definición de puntos de calibración.**

#### EJEMPLO 1

Se tiene un medidor de energía eléctrica activa, monofásico, en corriente alterna clase 2 y se desea hacer una verificación de su exactitud. Se sabe que:  $I_b = 10 \text{ A}$ ,  $I_{\max} = 40 \text{ A}$ ,  $I_{\min} = 0,5 \text{ A}$ , así que los puntos de medida



serán a su tensión y frecuencia de referencia y para las siguientes intensidades:

**Tabla 7: Puntos de medida, intensidades**

Nº	$I$ (A)	$\cos \varphi$
1	0,5	1
2	1	1
3	1	0,5 inductivo
4	2	1
5	2	0,5 inductivo
6	5	1
7	5	0,5 inductivo
8	10	1
9	10	0,5 inductivo
10	20	1
11	20	0,5 inductivo
12	30	1
13	30	0,5 inductivo
14	40	1
15	40	0,5 inductivo

Como se puede observar en la tabla, se han tomado valores proporcionales a la  $I_b$  desde su  $I_{\min}$  hasta su  $I_{\max}$ .

## EJEMPLO 2

Se desea calibrar un medidor de energía eléctrica activa en corriente alterna que posee los siguientes rangos de medida:

Tensión: 60 V, 120 V, 240 V

Intensidad: 1 A, 5 A



**Tabla 8: Puntos de medida, tensiones e intensidades**

Nº	$U$ (V)	$I$ (A)	$\cos\phi$
1	240	5	1
2	240	5	0,5 inductivo
3	240	1	1
4	120	5	1
5	120	5	0,5 inductivo
6	120	5	0,5 capacitivo
7	120	1	1
8	120	1	0,5 inductivo
9	120	1	0,5 capacitivo
10	60	5	1
11	60	1	1
12	60	1	0,5 inductivo

Esta tabla 8 es sólo un ejemplo, habría que tener en cuenta las verdaderas necesidades de cada laboratorio para ampliarla o reducirla.

#### **ANEXO IV. Ajuste por mínimos cuadrados para el cálculo de la recta de regresión.**

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: 
$$D_i = x_i - \bar{x} \quad (26)$$

Se define la *desviación media*  $\bar{D}$  como: 
$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_i| \quad (27)$$

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

$$y = ax + b \quad (28)$$



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

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (29) \text{ y } (30)$$

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

O también:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n D_i y_i}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (31)$$

puesto que:

$$\sum_{i=1}^n D_i^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \quad (32)$$

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

$$\bar{y} = a\bar{x} + b \quad (33)$$

