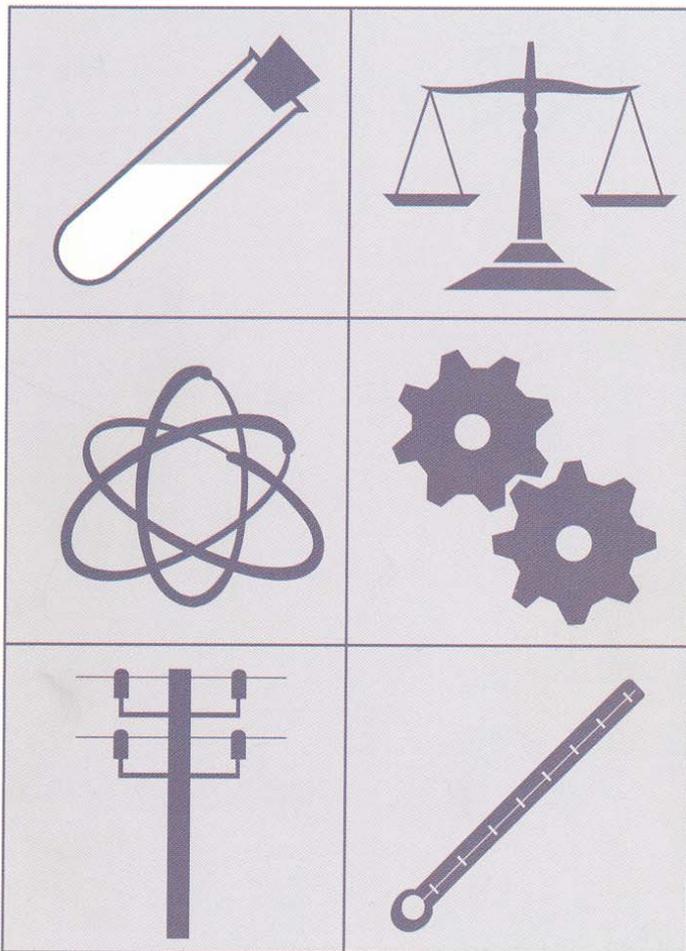


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO EL- 011 PARA LA CALIBRACIÓN DE VATÍMETROS Y VARÍMETROS ANALÓGICOS

m 08



GOBIERNO DE ESPAÑA

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



ÍNDICE

	Página
1. OBJETO	4
2. ALCANCE	4
3. DEFINICIONES	5
4. GENERALIDADES	10
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	20
6. RESULTADOS	22
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	22
6.2. Interpretación de resultados.....	28
7. REFERENCIAS	29
8. ANEXOS.....	30



1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de vatímetros y varímetros con indicación analógica por acción directa, incluyendo aquellos que incorporan dispositivos electrónicos tanto en sus circuitos de medida como en sus circuitos auxiliares, y que están identificados con los índices 09.01/10/11/12/13/14/15/16/20/21 en la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica (referencia [1]).

Están incluidos los accesorios no intercambiables (es decir, los que están expresamente adaptados a las características eléctricas de un determinado instrumento de medida), que suelen ser shunts y resistencias adicionales. Si existen otros accesorios asociados al instrumento, la calibración se realizará para el conjunto.

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se extiende a la calibración de vatímetros, tanto en corriente continua como en corriente alterna, donde miden potencia activa, y a varímetros que miden la potencia reactiva en corriente alterna. Estos instrumentos pueden ser monofásicos o trifásicos.

La clasificación de los vatímetros y varímetros por su índice de clase (que indica el error intrínseco máximo que puede tener el instrumento), según la referencia [2] es:

0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5
------	-----	-----	-----	-----	---	-----	---	-----	---	---

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 [4] que se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

Patrón de referencia [4] (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 [4] (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**.

Ajuste [4] (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 [4] (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 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:

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

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 μ , y s^2 es un estimador insesgado de la varianza σ^2 de dicha distribución.
2. La expresión s/\sqrt{n} es una estimación de la desviación estándar de la distribución de la media de \bar{x} , y se denomina **desviación estándar experimental de la media**.
3. La desviación estándar experimental de la media en ocasiones se denomina, incorrectamente **error de la media**.



Error (de indicación) de un instrumento de medida [4] (5.20)

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

NOTAS:

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

Error intrínseco (de un instrumento de medida) [4] (5.24)

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

Incertidumbre de medida [4] (3.9)

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

NOTAS:

1. El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado.
2. La incertidumbre de medida comprende, en general, varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones estándar experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por sus desviaciones estándar, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.



3. Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor 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” donde sus bases están expuestas con detalle (en particular ver ref. [7], apartado 2.2.4 y el anexo D).

Resolución (de un dispositivo visualizador) [4] (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 [4] (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.

Accesorio [2] (apartado 2)

Elemento (o grupo de elementos) o dispositivo asociado a un aparato medidor para constituir un nuevo aparato de características específicas.

Accesorio intercambiable [2] (apartado 2)

Accesorio que está adaptado a las características de un determinado aparato de medida.



Aparato indicador de acción directa [2] (apartado 2)

Es el que el dispositivo indicador es accionado directamente por el equipo móvil del aparato.

Campo de medida [2] (apartado 2)

Intervalo definido con dos valores de la magnitud a medir, en el cual los límites de error del aparato medidor (y/o sus accesorios) están especificados. Un aparato, o accesorio, puede tener varios campos de medida.

Constante de campo o factor de calibre [2] (apartado 2)

Constante por la que ha de multiplicarse la lectura en la graduación de un aparato para conocer el valor de la magnitud medida por el instrumento.

Alcance de medida [2] (apartado 2)

Límite superior del campo de medida.

Cero eléctrico [2] (apartado 2)

Posición de equilibrio hacia la que tiende el índice cuando la magnitud eléctrica medida sea cero o un valor dado (si en el trazo de la escala, donde hay que hacer el ajuste según el fabricante, es un valor distinto de cero), al ser alimentado el circuito (eventual) previsto para producir un par antagonista.

Cero mecánico [2] (apartado 2):

Posición de equilibrio hacia la que tiende el índice (si existe un par antagonista) cuando el elemento de medida no está bajo tensión ni recorrido por una intensidad. Puede coincidir o no con el cero de la graduación. En los aparatos con tope mecánico de cero, el cero mecánico no coincide con ningún punto de la graduación.

4. GENERALIDADES

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

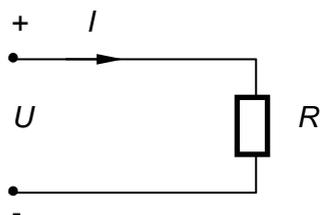


Fig. 1

$$P = U \cdot I$$

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 que 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

$$(1 W = \frac{1 J}{1 s}).$$

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 energía debido al desfase existente entre la intensidad de corriente y la tensión, que se podría interpretar gráficamente como indica la Fig. 2:



Fig. 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 φ 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 y los varímetros 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 y reactiva, respectivamente, 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 φ .

Puesto que es posible encontrar redes trifásicas, hay vatímetros y varímetros trifásicos. Un sistema trifásico estará formado por tres sistemas monofásicos cuyas tensiones están desfasadas 120° en el tiempo. Existen diferentes diseños de instrumento de medida para este tipo de redes.

La calibración de los vatímetros y varímetros se va a realizar por comparación con otro vatímetro o varímetro de mejores características metrológicas, 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 se calibrarán los vatímetros y varímetros.

Por otro lado si la calibración se reduce al caso de medida en corriente continua o a la medida de potencia aparente en corriente alterna, se puede recurrir al método voltamperimétrico, en el cual, sencillamente, se utilizarán un voltímetro y un amperímetro. Se trata también de un método de comparación, pero en este caso el valor de referencia se obtiene mediante un cálculo.

El proceso de calibración, en ambos casos, sigue el siguiente esquema: se conecta una carga 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 relativo que ha cometido el instrumento a calibrar con respecto al patrón y finalmente se le asigna una incertidumbre de calibración.

Símbolos y Abreviaturas

E	Error absoluto.
$E_r\%$	Error relativo en tanto por ciento.
$L_{Patrón}$	Lectura de la medida indicada por el patrón.
$L_{Medidor}$	Lectura de la medida indicada por el medidor a calibrar.
A_C	Alcance de medida.
c	Índice de clase.
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 estándar de cada estimación de las magnitudes de entrada.
$s(\bar{q})$	Desviación estándar experimental de la media.
U	Incertidumbre expandida.
δ_i	Corrección debida a la contribución de "i".



$u(y)$ Incertidumbre estándar combinada.



- a, b Coeficientes de la recta de regresión: $y = ax + b$.
 x, y Coordenadas de la recta.
 r Coeficiente de correlación.

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 o varímetro, 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 menor), así como disponer de una resolución adecuada (es habitual aconsejar que sea de, al menos, 1/5 de la clase de precisión del instrumento a calibrar).

El patrón de referencia de un 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.

- 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 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.

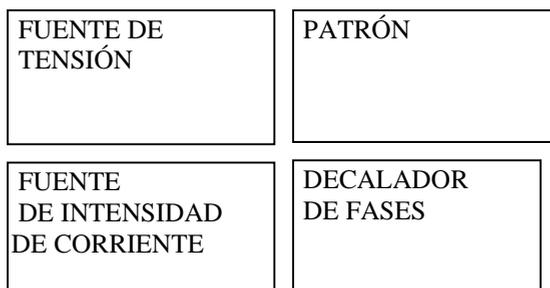


Fig. 2

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.

Voltímetro y amperímetro. Cuando se utilice el método voltamperimétrico serán necesarios estos instrumentos, teniendo en cuenta que sus errores se van a sumar, habrán de tener una, cada uno de ellos, una exactitud del doble de la que se exigiría a un vatímetro patrón (pero este no es un requisito restrictivo ya que estos instrumentos de medida se pueden conseguir fácilmente con una exactitud adecuada).

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 apreciable. Y en su caso adaptadores según la compatibilidad de los medidores.
- Nivel, para asegurar la posición en que se coloca el medidor, en caso de que sea necesario.
- Termómetro. Con el 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 está identificado de forma permanente y unívoca con su marca, modelo y número de serie; si no lo está se le asignará una identificación unívoca que se fijará sobre el instrumento para poder asociarle los resultados 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 instrumento a calibrar, para que se conecte correctamente 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 vatímetro o varímetro.
- Asimismo, se dispondrá del manual del patrón.
- Antes de iniciar las medidas, los instrumentos deberán 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 el medidor a calibrar. Estas condiciones de referencia serán las que indique el fabricante en el manual del aparato.
- Si se trata de un instrumento que tenga una posición de funcionamiento determinada se colocará en dicha posición comprobándolo con un nivel.
- 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.



- Para evitar el rozamiento del equipo móvil se golpeará con los dedos el instrumento, justo antes de efectuar una medición (por supuesto, el instrumento no se tocará durante la misma).
- Ajustar el cero mecánico, si procede. Si el instrumento está dotado de dispositivo de regulación se actuará sobre él hasta que se alcance la posición de cero (sin cambiar el sentido de desplazamiento de la aguja), entonces se puede actuar sobre el dispositivo de ajuste en sentido contrario para obtener libertad mecánica, pero sin desplazamiento de la aguja.

Se realizarán correcciones debido a las magnitudes de influencia cuando así lo aconseje el manual del fabricante.

5.3. Proceso de calibración

Primero se realizará el conexionado correspondiente a la calibración a realizar (los esquemas de conexión vienen en las figuras de la página 19). Se conectará tal y como indique el fabricante en su manual, mucha atención a las conexiones de las tierras.

Entonces los instrumentos son puestos en tensión, y si procede, se ajusta el cero eléctrico.

La potencia es una magnitud derivada definida a partir de otras magnitudes: tensión, intensidad de corriente y en el caso de corriente alterna el ángulo de fase. Por tanto, cuando se realiza una calibración en potencia se eligen los puntos de medida en función de estas magnitudes, por ejemplo, $U = 120 \text{ V}$, $I = 5 \text{ A}$, $\cos\varphi = 0,5$ inductivo, y la fuente se regula a estos valores.

Una vez alimentados con el valor de potencia en el que se ha de hacer la medición, y transcurrido el tiempo de respuesta especificado por el fabricante (o unos 15 minutos), se tomarán las lecturas del instrumento a calibrar y del patrón.



Existen infinidad de combinaciones posibles de tensión e intensidad de corriente, se deben elegir aquellos puntos de medida que tengan una importancia particular en la práctica (teniendo en cuenta el uso que vaya a hacer de él el propietario del instrumento 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 que cubran todos sus valores de tensión e intensidad nominal y con distintos factores de potencia.

En instrumentos con varios rangos de medida de tensión y de intensidad de corriente se deben tomar medidas en el valor nominal de cada uno de los rangos.

Teniendo en cuenta las indicaciones de la referencia [2] para los instrumentos de clase 0,5 y superiores, el factor de potencia debe ser inductivo. Para los instrumentos de índice de clase 0,3 e inferiores, el ensayo debe realizarse utilizando factores de potencia inductivos y capacitivos.

En los instrumentos de aguja se tomarán los valores que hagan corresponder la medida con las marcas principales de la graduación de la escala.

Se comenzará la calibración en la marca correspondiente al alcance del instrumento y luego se irá bajando a marcas inferiores. Se ajustarán las fuentes de manera que la aguja marque exactamente la marca elegida para ese punto de medida y se irán tomando los valores marcados por el patrón.

Es aconsejable realizar las medidas de cada punto varias veces (por ejemplo 5).

Cuando un vatímetro se calibre en corriente continua, los errores se calculan tomando la media de los resultados obtenidos al invertir la polaridad de la alimentación de los circuitos de medida.

A continuación se dan algunos detalles de los dos métodos de medida, teniendo en cuenta que los pasos a seguir serán los mismos que se acaban de exponer.

Método por comparación

Se conectarán el medidor y el patrón a la fuente con la tensión en paralelo y la intensidad de corriente en serie, de la siguiente manera:

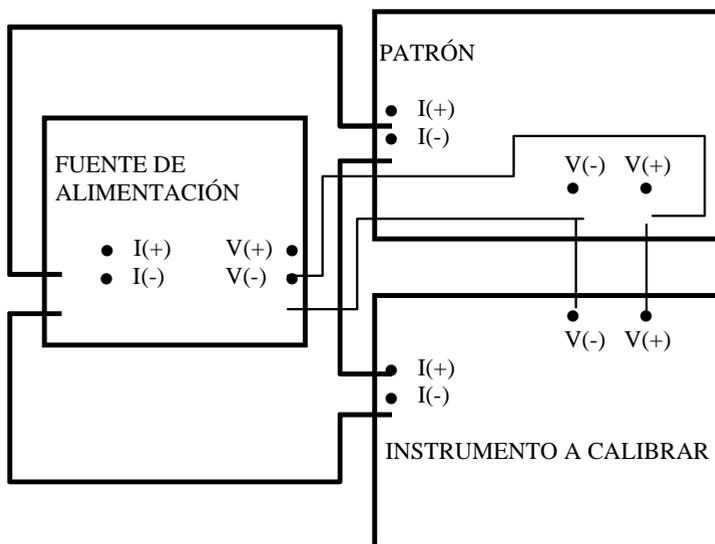


Fig. 3

Cuando se trate de un instrumento trifásico se actuará de igual manera, siempre que se disponga de un vatímetro patrón trifásico. Si no es así, se podrá calibrar con cada una de las fases de forma sucesiva, siempre que el aparato así lo permita, o si se dispone de ellos, utilizar tres patrones monofásicos, cada uno de ellos conectado a cada una de las fases.

Método voltamperimétrico

La conexión se hará de acuerdo con uno de los esquemas siguientes:

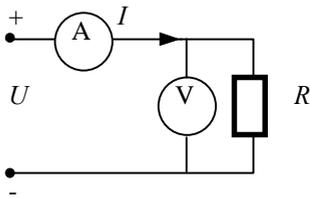


Fig. 4-a

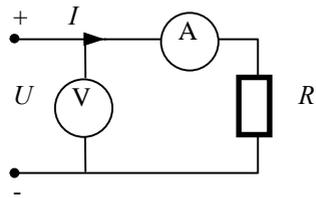


Fig. 4-b

La diferencia entre ambos esquemas consiste en que mientras en el caso de la Fig.4-a se mide tensión correctamente y la intensidad con un cierto error, en el de la Fig.4-b es al revés. Aunque en la práctica estos errores son despreciables excepto si la potencia es muy pequeña. De todas formas, en general, se dispondrá de un voltímetro de alta resistencia interna, y de un amperímetro de muy baja resistencia interna, esto se demuestra en el ANEXO IV. Y por otro lado, se utilizará el esquema de la Fig.4-a cuando se trate de una intensidad de corriente alta y una tensión pequeña y el esquema de la Fig.4-b cuando ocurra lo contrario.

5.4. Toma y tratamiento de datos

Siempre que sea posible, se realizará la calibración 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, entonces habrá que tener en cuenta su influencia. En cualquier caso, nunca se sobrepasarán los márgenes de funcionamiento del patrón ni del medidor durante la calibración.



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

Nº	U (V)	I (A)	cos φ	Temp. (°C)	L _{instrum.}	L _{patrón}	E = q _k	\bar{q}	s(q)

donde, $E = L_{\text{Instrumento a calibrar}} - L_{\text{Patrón}}$, es el error absoluto, aunque el error intrínseco se suele expresar como error relativo de la forma

$$E_r \% = \frac{L_{\text{Instrumento a calibrar}} - L_{\text{Patrón}}}{L_{\text{Patrón}}} \times 100$$

y, \bar{q} , es la media de las E que se hayan tomado, a partir de ahora a cada E se llamará q_k :

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

y, $s(q)$, es la desviación estándar:

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



6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

Ahora se pasa a analizar las posibles causas de error a la hora de realizar una medición, aunque como se verá, en la mayoría de los casos van a ser despreciables o evitables:

- Error de paralelaje, cuando se utiliza un instrumento de aguja el operador debe decidir a que marca de división de la escala graduada del instrumento se encuentra más próxima, ha de estar completamente paralelo a la indicación. Para minimizar este error se deben elegir puntos de medida, siempre que se pueda, que coincidan con una de las marcas principales del instrumento. Su influencia queda reflejada en las contribuciones aleatorias del cálculo de incertidumbres.
- Error en la regulación del cero mecánico o eléctrico. Sobre esto se puede decir lo mismo que en el párrafo anterior.

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 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:

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

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

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



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 $L_M - L_P$ 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 energía generadas.

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

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

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 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 $u(\delta_{Pder})$. 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_{max} , donde D_{max} , por lo tanto, también estará en tanto por ciento. Haciendo hipótesis de distribución rectangular:

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

NOTA:

La deriva también puede obtenerse considerando la regresión lineal (Anexo II) de los datos del historial.

- 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 Δt 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 del equipo a calibrar $u(\delta_{Mres})$. La resolución se corresponde con la el valor de la división de la escala. Si designamos por a el valor de resolución requerido, considerando la hipótesis de distribución rectangular:

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

- 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 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, ver anexo II).

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 si se considera la hipótesis de distribución rectangular, por tanto:

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

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 [7] 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 $U^* = U + C_{\text{max}}$

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 estándar, $u(y)$, 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:

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

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 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%:

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
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 .

El resumen del análisis de incertidumbres sería:

Magnitud	Esperanza matemática	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	$s(\bar{q})$
δ_{Pcal}	0	U_P/k	1	U_P/k
δ_{Pder}	0	$D_{max} / \sqrt{3}$	1	$D_{max} / \sqrt{3}$
δ_{Pcam}	0	$\frac{C_0 \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \frac{L_P}{100}$	1	$\frac{C_0 \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \frac{L_P}{100}$
δ_{Mres}	0	$\frac{a}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a}{\sqrt{3}}$
δ_{Mcam}	0	$\frac{C_M \cdot \Delta t'}{\sqrt{3}} \frac{L_M}{100}$	1	$\frac{C_M \cdot \Delta t'}{\sqrt{3}} \frac{L_M}{100}$



Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre típica $u(\delta_i)$	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
δ_{Pint}	$D_{\bar{q}}$	$\frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$
E				$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u^2(\delta_i)}$

6.2. Interpretación de resultados

Se comprobará que los errores obtenidos son inferiores a los límites de error, indicados 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 en su caso ajustar el equipo, o tal vez proceder a su reparación. Los errores máximos permitidos respecto a su índice de clase,

$$E_{\max} \leq \frac{c \times A_c}{100} \quad (\text{puede expresarse en divisiones de la escala o en vatios}).$$

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 son muy frecuentes, es posible, que el aparato necesite una reparación por parte de la casa fabricante, 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. Teniendo en cuenta si el error intrínseco está próximo al límite



definido en el manual del instrumento o no, y sobre todo su deriva. (En general, se recomienda su calibración cada dos años, cuando no hay ningún motivo para intuir que va a derivar antes de ese periodo de tiempo).

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.
- [2] Norma CEI 60051-3. Instrumentos de medida eléctricos con indicación analógica por acción directa y sus accesorios. Requisitos particulares para vatímetros y varímetros. Cuarta edición 1984-12 (AENOR 1999).
- [3] 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.
- [4] Vocabulario Internacional de Metrología, conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM 3ª edición en español-CEM.2008).
- [5] EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. European cooperation for Accreditation (EA), December 1999.
- [6] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 1. 1998.
- [7] Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Versión Española. Centro Español de Metrología. 2ª Edición, 2000.

8. ANEXOS

- | | |
|-----------|--|
| ANEXO I | Ejemplo del cálculo de la incertidumbre de calibración. |
| ANEXO II | Ajuste por mínimos cuadrados para el cálculo de la recta de regresión. |
| ANEXO III | Otro método de medida de potencia. |
| ANEXO IV | Estimación del error en el método voltamperimétrico. |



ANEXO I. EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN DE UN MEDIDOR

Calibración de un vatímetro por el método de comparación.

El patrón utilizado durante la calibración es de un índice de clase 0,2, con un alcance de 1500 W y 300 divisiones, su constante de campo, por tanto, es de 5 W/° y una resolución de 1/5 de la división principal. Sus rangos son: para tensión 300 V y para intensidad de corriente 5 A. Por el certificado de calibración del patrón se tiene: $U_p = 3$ W con un nivel de confianza 95,45 % con $k = 2$. Con los resultados de este certificado se ha obtenido una recta con la que se corrigen las lecturas del patrón. Su temperatura de funcionamiento está entre 20 °C y 33 °C.

El instrumento a calibrar es un vatímetro de índice de clase 1, que tiene el mismo alcance que el patrón, pero con 150 divisiones, por tanto, su constante de campo es 10 W/°. Su temperatura de funcionamiento está entre 15 °C y 38 °C.

Se realizan las mediciones siguiendo las instrucciones de este procedimiento.

Los resultados obtenidos en el punto de calibración, manteniendo el vatímetro a calibrar señalando la división 30 de su escala, son:

Nº	U (V)	I (A)	cos φ	Temp. (°C)	L _p (corregido) (W)	q _k	\bar{q}	s(q)
1	120	5	0,5 induc- tivo	23,2	303	- 3	- 4.2	1,3
					304	- 4		
					305	- 5		
					303	- 3		
					306	- 6		

Se comprueba que los errores del vatímetro corresponden con su índice de clase:

$$E_{\max} \leq \frac{c \times A_c}{100} = \frac{1 \times 150}{100} = 1,5 \text{ div}$$



que equivale a 15 W y el error máximo observado en la tabla es de 6 W, es decir, el error intrínseco es menor que el máximo permitido.

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.

1) Desviación estándar experimental:

$$u(L_M - L_P) = s(\bar{q}) = 1,3/\sqrt{5} = 0,58 \text{ W}$$

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

2) Según el certificado de calibración del patrón $U_p = 3 \text{ W}$ con un nivel de confianza 95,45 % con $k = 2$.

$$u(\delta_{Pcal}) = U_p/k = 1,5 \text{ W}$$

3) Deriva del patrón. Se ha observado que $D_{max} = 2 \text{ W}$

$$u(\delta_{Pder}) = D_{max}/\sqrt{3} = 1,15 \text{ W}$$

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

5) Resolución del equipo a calibrar. La menor indicación que se aprecia es de $a = 5 \text{ W}$

$$u(\delta_{Mres}) = a/\sqrt{3} = 2,89 \text{ W}$$



- 6) Como la calibración se ha hecho dentro del margen de temperaturas de referencia del medidor de energía no habrá que considerarla.
- 7) Debido a la corrección aplicada al patrón se tiene: $D_{int} = 2,6 \text{ W}$

$$u(\delta P_{int}) = D_{int} / \sqrt{3} = 1,15 \text{ W}$$

La incertidumbre estándar:

$$u^2(y) = 0,58^2 + 1,5^2 + 1,15^2 + 2,89^2 + 1,15^2$$

$$u(y) = 3,69$$

Se calcula ahora la ν_{eff} :
$$\nu_{eff} = \frac{3,69^4}{\frac{0,58^4}{4}} = 6553,2$$

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

La incertidumbre expandida, es $U = 7,38 \text{ W}$ 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
$L_M - L_P$	- 4,2	0,58	1	0,58
δ_{Pcal}	0	1,5	1	1,5
δ_{Pder}	0	1,15	1	1,15
δ_{Mres}	0	2,89	1	2,89
δ_{Pint}	0	1,15	1	1,15
E	- 4,2			3,69



ANEXO II. AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS PARA EL CÁLCULO DE LA RECTA DE REGRESIÓN

AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS

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}) :

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



ANEXO III. OTRO MÉTODO DE MEDIDA DE POTENCIA

Medición de la potencia por medición de la energía

Dado que algunos laboratorios dedicados a la medición de energía pueden estar interesados en la medida de la potencia como una consecuencia de su actividad, en muchos casos es posible utilizar el mismo equipamiento que para la medida de la energía teniendo en cuenta que, mientras la energía es una magnitud que depende del tiempo la potencia es una magnitud instantánea, por lo tanto, la lectura obtenida en el medidor de energía equivale a:

$$W = P \cdot \Delta t$$

utilizando un cronómetro se puede calcular la potencia media durante ese intervalo de tiempo. Esta forma de calibrar la potencia tiene una desventaja, mientras el vatímetro o varímetro da lecturas de potencia instantánea el cálculo proporciona la potencia media en ese periodo de tiempo, la bondad de este método dependerá de la estabilidad de las fuentes en cortos espacios de tiempo (tiempo de medición).



ANEXO IV. ESTIMACIÓN DEL ERROR EN EL MÉTODO VOLTAMPERIMÉTRICO

Según el esquema de la Fig.4-a de la sección 5.3 se puede observar que la potencia disipada en R es:

$$P_R = U \cdot I_R$$

mientras que la potencia medida es: $P = U \cdot I$

siendo $I = I_R + I_U$ el error en la medida de la potencia será:

$$\Delta P = P - P_R = U \cdot I_U$$

el error relativo será: $\delta_P = \frac{\Delta P}{P_R} = \frac{I_U}{I_R} = \frac{R}{R_U}$

de donde se puede deducir que cuanto mayor sea la resistencia interna del voltímetro menor será el error cometido en la medida.

Por otro lado de la Fig.4-b de la sección 5.3, se puede hacer un desarrollo parecido:

$$P_R = U \cdot I - I^2 \cdot R_A$$

por tanto el error : $\Delta P = I^2 \cdot R_A$

y: $\delta_P = \frac{\Delta P}{P_R} = \frac{I^2 \cdot R_A}{(U - I \cdot R_A)I} = \frac{R_A}{R}$

entonces, cuanto menor sea la resistencia interna del amperímetro menor será el error.

