

621.37

K 187

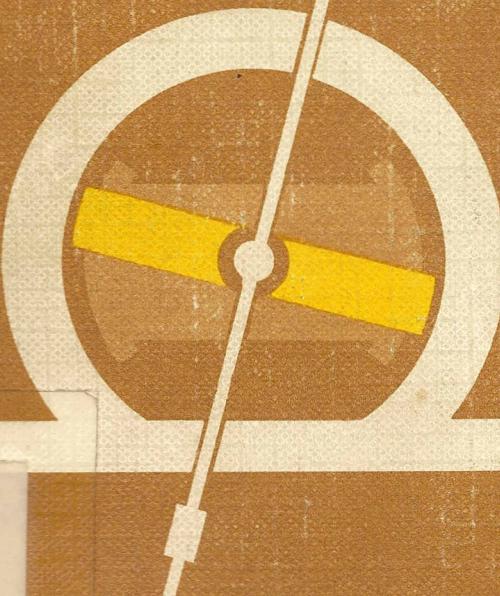
3

ANDRES M. KARCZ

fundamentos de metrólogía eléctrica

TOMO III

POTENCIA
Y ENERGIA



marcombo
boixareu editores



ÍNDICE

	<u>PAG.</u>
Introducción	11

CAPÍTULO I

TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN DE INTENSIDAD

Definición y finalidades	13
Funcionamiento	14
Diagrama vectorial	17
Error de relación	18
Error angular	18
Consumo de instrumentos y de conductores	23
Intensidad límite térmica	25
Intensidad límite dinámica	26
Clasificación y tipos de transformadores de intensidad	26
Conexión a tierra de transformadores de intensidad	33

CAPÍTULO II

TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN DE TENSIÓN

Definición y finalidad	36
Diagrama vectorial	38
Error de relación	39
Error angular	40
Consumo de instrumentos	45
Clasificación y tipos de transformadores de tensión	46
Conexión a tierra de transformadores de tensión	48

CAPÍTULO III
MEDICIONES DE POTENCIA

Relación de unidades	52
Medición de potencia de corriente continua	53
Mediciones de potencia de corriente alterna ...	57
Potencia de corriente alterna monofásica ...	59
Mediciones directas, semidirectas e indirectas ...	66
Potencia de corriente alterna trifásica. Método de tres vatímetros	73
Método de 3 vatímetros. Neutro artificial ...	76
Método Aron de 2 vatímetros ...	78
Medición de potencia con método Aron utilizando un solo vatímetro	89
Ejemplos de medición de potencia con el método de 3 vatímetros ...	90
Ejemplos de medición de potencia con el método Aron de 2 vatímetros ...	95
Medición de la potencia reactiva del sistema trifásico ...	102

CAPÍTULO IV

TEORÍA Y CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DE ENERGÍA

Deducción de la relación entre energía y las revoluciones en el tiempo ...	110
Constante ...	111
La condición de 90° ...	113
Diagrama vectorial ...	114
Momento o par motor ...	117
Momentos o pares de frenado ...	119
Influencia de las variaciones de los parámetros ...	123
Partes componentes ...	125
Imán de freno ...	136
Mecanismo registrador ...	137
Errores del medidor de energía ...	143

CAPÍTULO V

TIPOS DE MEDIDORES DE ENERGÍA

Agrupación de los medidores ...	149
Medidor monofásico de energía activa (A1, B1) ...	149

ÍNDICE

Esquemas de conexiones de medidores monofásicos ...	151
Medidores trifásicos de energía activa (A2, B1) ...	153
Esquemas de conexiones de medidores trifásicos de tres sistemas motor ...	157
Esquemas de conexiones de medidores trifásicos de dos sistemas motor ...	159
Medidores de energía reactiva ...	160
Medidor monofásico de energía reactiva (A1, B2) ...	164
Medidores trifásicos de energía reactiva (A2, B2) ...	165
Medidores de energía aparente ...	171
Medidores trifásicos de energía aparente (A2, B3) ...	172
Medidores para fines específicos ...	176
Medidores monofásicos y trifásicos de doble tarifa ...	177
Medidores de demanda máxima (A1, B1, C2; A2, B1, C2; A2, B3, C2)	184

CAPÍTULO VI

VERIFICACIÓN Y CONTRASTE DE MEDIDORES DE ENERGÍA

Contraste por medio de POTENCIA × TIEMPO ...	195
Procedimientos a seguir en el contraste de medidores trifásicos ...	202
Contraste por medio de medidor patrón ...	210
Tabla comparativa de los métodos de contraste y verificación ...	217

APÉNDICE

NORMAS PARA MEDIDORES DE ENERGÍA

UNE 21 310 h1. Contadores de energía eléctrica de corriente alterna. Activa clases 1 y 2 y reactiva clase 3 ...	221
UNE 21 310 h2. Contadores de energía eléctrica de corriente alterna. Activa clase 0,5 ...	240
UNE 21 311. Indicadores de máxima de clase 1 para contadores de energía eléctrica de corriente alterna ...	248
Tabla de comparación de normas de distintos países ...	258

Bibliografía ...	261
------------------	-----

INTRODUCCIÓN

El presente volumen es el tercer tomo de la obra FUNDAMENTOS DE METROLOGÍA ELÉCTRICA, que consta de tres tomos. El libro es de carácter práctico y su objetivo principal es que sea de utilidad para los estudiantes que se inician en esta materia, que ocupa un importante lugar dentro de la especialidad de la ingeniería eléctrica, y para el personal técnico que efectúa las mediciones.

El problema que surge con frecuencia son las dificultades que aparecen al aplicar un método de medición explicado sólo teóricamente. El mayor problema radica en la selección de los instrumentos más adecuados para un método determinado aplicado en cada caso. En este libro, para exemplificar las soluciones de este problema, después de las deducciones teóricas, sigue un ejemplo práctico del método desde el principio, o sea, desde la selección de los instrumentos hasta la medición misma y la interpretación de los valores obtenidos. Además, en cada ejemplo, la utilización de los cuadros de valores medidos y calculados tiende a fomentar la metodología que requieren las mediciones.

Como se ha expuesto anteriormente, el primer tomo trata de "herramientas de medición", o sea, de instrumentos, patrones y regulación de la alimentación, siendo su conocimiento un factor primordial para la ejecución correcta de mediciones. En el segundo tomo se explican varios métodos de medición de parámetros básicos tales como resistencias, inductancias, etc., las cuales se miden con frecuencia tanto en laboratorios como en talleres y fábricas, claro está que con diferentes exactitudes.

El presente tercer tomo contiene la descripción de las mediciones primordiales en la industria: de potencia y de energía eléctricas. Los capítulos referentes a los medidores de energía, frecuentemente denominados "contadores", servirán como una amplia base para el estudio de esta importante rama de las mediciones eléctricas. Dada la

amplitud de esta rama y la variedad de los medidores según el destino y las marcas, y debido a que este libro son sólo "Fundamentos", se ha reducido el texto a lo esencial; sin embargo, espero que, después de estudiarlo, no será difícil para la persona que se dedicará a esta especialidad, profundizar sus conocimientos con la ayuda de catálogos e instrucciones de los fabricantes que proveen a las compañías que tienen a su cargo la instalación y el ajuste y verificación de los medidores de energía. Las informaciones, las fotografías y las instrucciones en este libro provienen de las fábricas de varios países como U.S.A., Canadá, Alemania, Inglaterra, Japón y otros. En el apéndice están resumidas las normas que se aplican a los medidores de energía en varios países y finalmente el conjunto de normas españolas.

Tengo que expresar mi más profundo agradecimiento a las firmas que fabrican los medidores de energía que me han suministrado amplio material informativo e ilustrativo sobre dichos instrumentos.

Ing. ANDRÉS M. KARCZ

Capítulo I

TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN DE INTENSIDAD

Definición y finalidades

Se denominan transformadores de medición a los que se utilizan para la alimentación de circuitos de instrumentos de medición. Su aplicación se basa en la relación entre la intensidad en el arrollamiento secundario y la intensidad en el arrollamiento primario, o entre la tensión secundaria y la tensión primaria (transformadores de intensidad y transformadores de tensión). Al medir la intensidad en el arrollamiento secundario se determina la del arrollamiento primario por la relación de transformación del transformador de intensidad e igualmente al medir la tensión secundaria se determina la tensión primaria por la relación de transformación en los transformadores de tensión. Los transformadores de medición sirven para las siguientes finalidades:

1. Permiten medir altas tensiones y altas intensidades con instrumentos de bajo alcance.
2. Separan eléctricamente del circuito controlado los instrumentos de medición, lo que permite efectuar mediciones en los circuitos de alta tensión con los instrumentos de baja tensión.
3. Hacen posible la ubicación de los instrumentos a distancia del circuito controlado. Esto evita la influencia de campos magnéticos externos en el funcionamiento de instrumentos, aumenta la seguridad del personal y permite la colocación de instrumentos en lugares convenientes (tableros).

Desde el punto de vista del uso y de la construcción, los trans-

formadores de medición se dividen en *transformadores de intensidad* y *transformadores de tensión*.

El transformador de intensidad está destinado a su conexión en serie con el receptor de la misma manera que se conecta un amperímetro. La intensidad de corriente primaria tiene una relación con la corriente secundaria:

$$K_i = \frac{I_1}{I_2}$$

y se denomina *relación del transformador de intensidad*, siendo inversamente proporcional a la relación de las espiras.

Funcionamiento

Cualquier variación de la corriente primaria se refleja en las indicaciones del instrumento conectado en serie con el secundario del transformador. Los instrumentos, que son amperímetros o bobinas de intensidad de vatímetros, medidores de energía o cofímetros (medidores de coseno ϕ), se caracterizan por su muy baja impedancia, por lo que se produce el efecto del cortocircuito del arrollamiento secundario del transformador de intensidad. El número de espiras se calcula basándose en el hecho de que los amperiovoltas primarios y secundarios son iguales; por ejemplo, el primario es para 500 A y tiene 2 espiras y el secundario es para 5 A y tiene 200 espiras-1000 Av. Los flujos magnéticos de ambos arrollamientos, (primario y secundario) son casi iguales y tienen sentidos opuestos, de modo que durante el

funcionamiento existe solamente un flujo magnético resultante $\hat{\phi}_r = \hat{\phi}_1 - \hat{\phi}_2$ muy pequeño (fig. I-1). Este flujo resultante $\hat{\phi}_r$ origina en el núcleo del transformador una inducción magnética B de bajo valor, del orden de cientos de líneas, suficiente para generar en el secundario una fuerza electromotriz E_2 que mantiene la intensidad que se mide. En el caso de abrir el circuito secundario (al desconectar el amperímetro), la intensidad de corriente primaria I_1 actuaría en su totalidad como corriente magnetizante, lo que originaría una inducción magnética B en el núcleo de alto valor, del orden de miles de líneas. En consecuencia subirán las pérdidas en el hierro y el transformador se calentará con exceso. Además en el instante de la apertura, $(\frac{d\phi}{dt})$, del secundario se induce una tensión alta que puede ser peligrosa para el aislamiento. En vista de ello se debe siempre

tener la precaución de *no desconectar el instrumento antes de cortocircuitar el secundario* y también *tener conectado a tierra el secundario y el núcleo del transformador*.

El transformador de intensidad tiene las características de un transformador monofásico en condiciones del ensayo en cortocircuito. Como ya se ha explicado anteriormente, su arrollamiento secundario

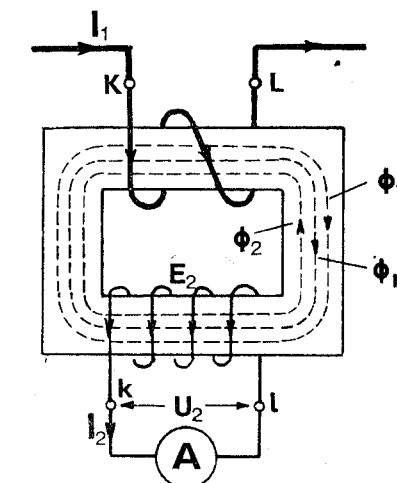


Figura I-1.

está continuamente en cortocircuito a causa de las muy bajas impedancias del amperímetro o de otro instrumento alimentado por el transformador. Este continuo cortocircuito es la característica fundamental del transformador de intensidad y en esto se diferencia principalmente de los transformadores de tensión y de los transformadores de potencia.

El arrollamiento primario del transformador de intensidad está conectado en serie con el circuito en el cual se mide la intensidad. Entre los dos terminales de este arrollamiento K y L no aparece ninguna tensión de valor apreciable y también, lo que es muy importante, la corriente secundaria no influye en el valor de la corriente primaria, contrariamente a lo que sucede en los transformadores de potencia y en los transformadores de tensión. La figura I-2 muestra los símbolos más frecuentemente utilizados en los esquemas para la representación del transformador de intensidad.

Ambos arrollamientos, primario y secundario, del transformador están confeccionados con hilo de cobre de sección correspondiente a las intensidades eficaces nominales del transformador de intensidad. La intensidad nominal secundaria está normalizada en 5 A para todos los transformadores. En algunos casos, cuando la distancia

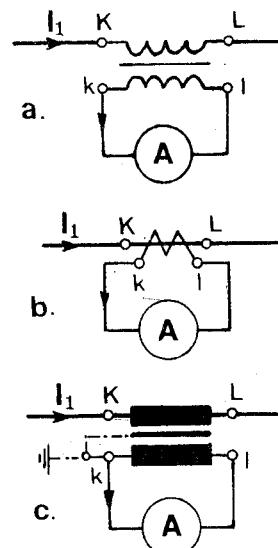


Figura I-2.

entre el transformador y el instrumento es grande, se utilizan transformadores de intensidad nominal secundaria de 1 A. Los valores de las intensidades nominales deben figurar sobre la placa de identificación del transformador y se las expresa en forma de fracción, por ejemplo: 200 A/5 A; 50 A/5 A, etc. El valor de la tensión indicado sobre la placa significa el límite superior de la tensión admisible en el circuito de medición. Cuanto más alta es la tensión, tanto mejor es la clase de aislamiento entre el primario y el secundario.

La relación de transformación $K_i = \frac{I_1}{I_2}$ no es estrictamente constante; depende de la intensidad de corriente primaria I_1 , de la carga del secundario, o sea, de la impedancia resultante de los instrumentos conectados en serie incluyendo las conexiones y de la frecuencia. Sin embargo, al efectuar las mediciones se toma el valor de K_i como cons-

tante, denominándolo "valor nominal de la relación de transformación $K_{i, \text{nom}}$ " y se determina el error de la medición originado por la diferencia entre la $K_{i, \text{nom}}$ y la $K_{i, \text{real}}$.

Del análisis de un diagrama simplificado del transformador de intensidad surgen los conceptos y las definiciones de los errores originados por el mismo transformador.

Diagrama vectorial

Para hacer el análisis más sencillo se ha trazado el diagrama de la figura I-3, para una relación $K_i = 1$ ($I_1 = I_2$). Con la misma finalidad se han exagerado las magnitudes de los vectores de la corriente de excitación I_0 y sus componentes: I_μ de pérdidas en hierro e I_m de magnetización.

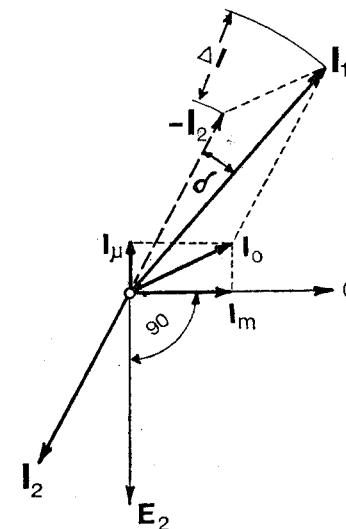


Figura I-3.

A base del diagrama vectorial se pueden apreciar dos tipos de errores. Un error denominado "error de intensidad" o "error de relación" que se debe a la diferencia entre los valores I_1 e I_2 y el otro error denominado "error angular". Para simplificar, el diagrama de la figura I-3 está trazado para la relación $K_i = 1$.

Error de relación

Se denomina error de intensidad o de relación a la diferencia entre el valor eficaz de la corriente secundaria, multiplicado por la relación nominal de transformación y el valor eficaz de la corriente primaria. Por lo general, se le expresa como error relativo en tanto por ciento de la intensidad primaria.

Como ya se ha mencionado, en la práctica se asume el valor constante de la relación K_i entre la corriente nominal primaria y la corriente nominal secundaria:

$$K_{i,\text{nom}} = \frac{I_{1,\text{nom}}}{I_{2,\text{nom}}}$$

Cuando la intensidad primaria está calculada por medio de la relación, el error absoluto de intensidad es:

$$\Delta I = I_2 \cdot K_{i,\text{nom}} - I_1 \quad (\text{A})$$

El error relativo de la intensidad es:

$$\delta_I = \frac{\Delta I}{I_1} = \frac{I_2 \cdot K_{i,\text{nom}} - I_1}{I_1} \cdot 100 \quad (\%)$$

El otro error, denominado "error angular", se debe al desfase entre el vector de la corriente primaria I_1 y el vector invertido $-I_2$ de la corriente secundaria. En un transformador ideal este ángulo δ es igual a cero, pero en un transformador real este desfase se debe a la existencia de la corriente de excitación I_0 . Como se puede apreciar en el diagrama, la corriente primaria I_1 es la suma vectorial de la corriente de excitación I_0 y de la corriente secundaria invertida, $-I_2$. Para disminuir la corriente de excitación y en consecuencia disminuir el error angular, en la confección de los núcleos de transformadores de medida se utilizan materiales de baja reluctancia y se calcula muy baja inducción magnética B .

Error angular

Se denomina error angular δ_a al ángulo en el cual está desfasado el vector de la corriente secundaria $-I_2$, invertido, con respecto al vector de la corriente primaria I_1 . Este error se expresa en minutos.

En las mediciones de intensidad (fig. I-4,a) el error angular no tiene mucha importancia, de modo que se lo puede omitir. En cambio, cuando se trata de mediciones de potencia y energía (vatímetros y medidores de kWh, fig. I-4,b), el desfase interno, o sea el error angular, puede tener gran influencia en la exactitud de los resultados de la medición. Del diagrama de la figura I-4,c se puede deducir que la potencia que se desea medir es:

$$P = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

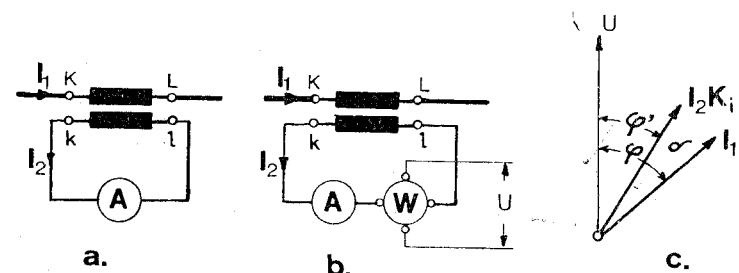


Figura I-4.

Las indicaciones del vatímetro son: $P_0 = U \cdot I_2 \cdot \cos \varphi'$. A base de la relación: $I_1 = I_2 \cdot K_{i,\text{nom}}$ se multiplican las indicaciones del vatímetro por K_i obteniendo como resultado:

$$P' = U \cdot I_2 \cdot K_{i,\text{nom}} \cdot \cos \varphi'$$

De esto resulta que el ángulo δ del transformador se suma al ángulo φ de la red originando en el vatímetro el efecto de un ángulo φ' diferente del ángulo de desfase de la red.

Del análisis del diagrama vectorial (fig. I-3), resulta que el uso del transformador de intensidad influye sobre la exactitud de mediciones, debido a dos tipos de errores: el error de relación o de intensidad y el error angular. El error de relación (ΔI o δ_I), que es la diferencia entre los valores de la intensidad primaria I_1 y de la intensidad secundaria I_2 (reducida al primario), y el error angular (δ_a), que es el desfase entre el vector I_1 y el vector I_2 invertido. Este segundo error, cuyo origen es la corriente de excitación (I_0), se eliminaría en el caso de igualdad del factor de potencia ($\cos \varphi'$) con el desfase originado por la corriente de excitación. El $\cos \varphi'$ se debe a la suma del desfase interno del transformador con el desfase originado por la suma de impe-

dencias de los instrumentos conectados al secundario. Ambos errores, de relación y angular, dependen de la intensidad de corriente primaria I_1 y de la intensidad de la corriente secundaria I_2 . La figura I-5 muestra las típicas características; el gráfico a representa el error de intensidad $\delta_I = f(I_1)$ y el gráfico b el error angular $\delta_a = f(I_1)$, con $I_2 = \text{constante}$.

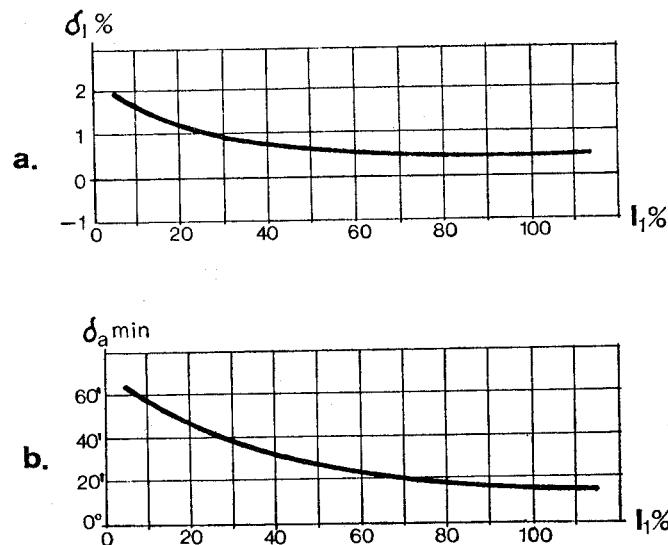


Figura I-5.

Los países que adoptan las normas internacionales, dividen los transformadores de medición en 4 clases de exactitud: 0,2; 0,5; 1; 3. Las cifras indican, como en la clasificación de los instrumentos de medición, el tanto por ciento del máximo error que se origina en la medición. También definen las normas las tres características interrelacionadas: la potencia secundaria, el error total y el factor de sobrecarga.

LA POTENCIA DE CARGA SECUNDARIA ("Burden" en inglés; "Bürde" en alemán)

La potencia nominal del transformador se da en VA y está relacionada con la corriente nominal secundaria (5 A o 1 A). Por lo general

se la determina como carga nominal en ohmios. El factor de potencia de carga secundaria se denomina "cos δ " ($\cos \beta$) y su valor es de 0,8 aproximadamente.

EL ERROR

El error del transformador de intensidad depende de la corriente magnetizante I_m requerida por el material magnético del núcleo. La característica de errores del transformador está representada por una curva que prácticamente coincide con la curva de μ del material del núcleo. Según la magnitud de la carga conectada al secundario del transformador, éste funciona en otra porción de la curva de magnetización. Esto origina la influencia de la carga secundaria sobre el error.

EL FACTOR DE SOBRECARGA

El factor de sobrecarga n es el número que indica el múltiplo de la corriente nominal primaria que, debido a la saturación del núcleo, origina un error de intensidad de —10 %, a base que la carga secundaria sea de valor nominal. En el ejemplo del gráfico de la figura I-6 se puede apreciar que con una corriente primaria I_1 20 veces mayor que la nominal, la corriente secundaria I_2 es 10 % menor de su valor nominal. En este caso el factor de sobrecarga n es 20.

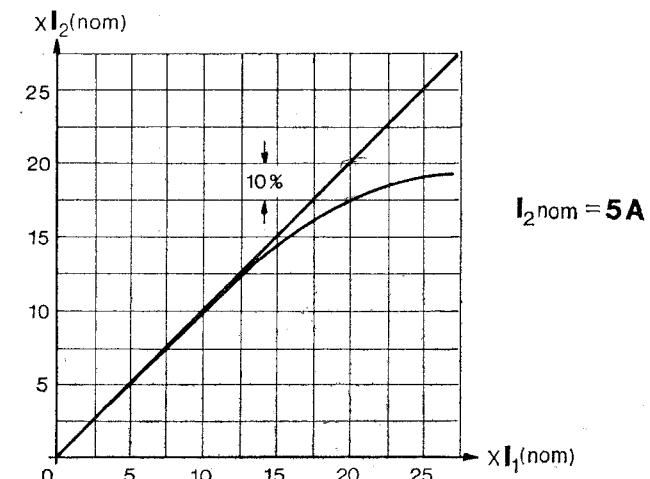


Figura I-6.

En resumen, la potencia, el error y el factor de sobrecarga dependen de la curva de magnetización del material del núcleo y, en consecuencia están interrelacionados. Los errores aumentan con la potencia de modo que, por ejemplo, con una potencia tres veces mayor que la nominal, el error es también tres veces mayor. El factor de sobrecarga n aumenta con el incremento de la potencia.

La potencia nominal y la carga admisible del circuito secundario se determinan para la intensidad secundaria nominal (5 o 1 A). A un determinado valor de la intensidad secundaria (I_2) corresponde una determinada potencia y esa es siempre constante para un circuito dado de medición. Para utilizar en forma adecuada un transformador de intensidad hay que guiarse por las características indicadas por el fabricante sobre la placa de identificación (ejemplo en figura I-7). Sobre la placa deben figurar: marca; tensión máxima de instalación y tensión de prueba de aislamiento en kV; frecuencia en Hz; relación de transformación $\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$; potencia admisible del secundario en VA; clase de exactitud (porcentaje de error); factor de sobrecarga.

AEG

0,5/3 kV
50Hz
150
5
10 VA
KL 0,5
$n < 5$

Figura I-7.

Ejemplo: Calcular la impedancia admisible que se puede conectar al secundario del transformador de intensidad cuya potencia secundaria es 20 VA y la intensidad nominal secundaria es $I_2 = 5$ A.

$$\text{La impedancia } Z_2 = \frac{P}{I^2} = \frac{20}{5^2} = 0,8 \Omega$$

Cuando por el secundario circule $I_2 = 4$ A, su potencia será menor de acuerdo con la relación:

$$P' = 20 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^2 = 12,8 \text{ VA}$$

$$\text{La impedancia } Z'_2 = \frac{12,8}{4^2} = 0,8 \Omega$$

La potencia del transformador de intensidad es proporcional al cuadrado de la relación de intensidades de corriente secundarias (la nominal y la real). Cuando por el secundario circula una corriente menor que la nominal, la potencia es también menor que la nominal. Para calcular exactamente la carga que originan varios instrumentos conectados en serie con el secundario (amperímetro, bobina de intensidad del vatímetro, bobina de intensidad del medidor de energía, etc.), los cuales tienen diferentes factores de potencia, se deberían sumar las impedancias geométricamente. Sin embargo, para simplificar el problema, se las suma algebraicamente, de lo cual resulta un valor algo mayor que el valor real de la impedancia total conectada al circuito secundario. En ciertos casos, cuando la distancia entre el transformador y los instrumentos es considerable, a la potencia consumida por los instrumentos se debe sumar la potencia disipada en los conductores que los unen con el transformador. La potencia consumida en los dos conductores se calcula por:

$$\Delta P = 2 \cdot R \cdot I_{2,\text{nom}}^2 = 2 \cdot \frac{1}{\gamma \cdot s} \cdot I_{2,\text{nom}}^2$$

donde l es la longitud de un conductor y γ es la conductividad del material (para el cobre $\gamma = 57$).

Ejemplo: La conexión del transformador con los instrumentos se ha hecho con conductores de cobre, de sección $s = 10 \text{ mm}^2$, a la distancia de 10 m. Calcular la potencia disipada en los conductores al circular la corriente secundaria nominal $I_2 = 5 \text{ A}$.

$$\Delta P = \frac{2 \cdot 10}{57 \cdot 2,5} \cdot 5^2 = 3,5 \text{ W}$$

Este valor se debe sumar a la potencia total requerida por los circuitos de intensidad de los instrumentos a conectar.

Consumo de instrumentos y de conductores

Para orientación del lector, en la Tabla I-1 se han resumido los valores típicos de la potencia consumida por los circuitos de intensidad de los diferentes instrumentos de medición que suelen conectarse a los transformadores de intensidad. Los valores de la tabla son aproximados ya que dependen del modelo, clase, fabricante, etc.; los valores exactos, en el caso de necesidad, se obtienen de los catálogos de los

TABLA I-1

INSTRUMENTO	CONSUMO DE POTENCIA
<i>Amperímetro</i> electromagnético electrodinámico magn. electr. con rectificador bimetálico	1 a 2,5 VA 2 a 3 VA 0,3 a 0,5 VA 3 a 4 VA
<i>Vatímetro</i> electrodinámico ferrodinámico de inducción	1,5 a 3 VA 2 a 5 VA 2 a 3 VA
<i>Cos φ metro</i>	5 a 6 VA
<i>Medidores de energía</i> (de ind.) por cada sistema motor	1 a 1,5 VA

respectivos instrumentos. La Tabla I-2 contiene los valores calculados de la potencia disipada en dos conductores que unen los instrumentos con el transformador. La longitud de la conexión es $l = 10 \text{ m}$ y el material es cobre ($\gamma = 57$). Los valores de la potencia correspondientes a los conductores tipo americano (AWG) no son exactos ya que su normalización no coincide exactamente con los conductores normalizados (mm^2).

TABLA I-2

CONDUCTORES NORMALIZADOS	CONDUCTORES AWG	POTENCIA DISIPADA
$2 \times 2,5 \text{ mm}^2$	$2 \times \# 11$	3,6 W
$2 \times 4 \text{ mm}^2$	$2 \times \# 14$	2,2 W
$2 \times 6 \text{ mm}^2$	$2 \times \# 9$	1,5 W
$2 \times 10 \text{ mm}^2$	$2 \times \# 7$	0,9 W

La calidad del transformador de intensidad se determina por sus características térmica y dinámica. Estos efectos se originan cuando en el circuito principal se produce un cortocircuito. Con esta finalidad

se definen la *resistencia térmica* o *intensidad límite térmica* y la *resistencia dinámica*.

Intensidad límite térmica

La intensidad límite térmica I_{ter} es el valor eficaz de la corriente alterna que calienta hasta 300°C , en un segundo, el arrollamiento del transformador. Este valor se expresa en amperios o en el múltiplo de la intensidad de corriente primaria nominal. El calor producido por la corriente de cortocircuito está absorbido por el material del conductor bobinado (cobre o aluminio). Se puede calcular el valor de la intensidad límite siguiendo las correspondientes normas:

$$I_{ter} = C_t \cdot s_1 \quad (\text{A})$$

donde C_t es la constante del material del conductor: para cobre $C_t = 180$ y para aluminio $C_t = 118$.

s_1 es la sección del conductor del arrollamiento primario, en mm^2 .

Ejemplo: El bobinado primario de un transformador de intensidad de relación 200/5 A está confeccionado con un conductor de sección $s_1 = 100 \text{ mm}^2$. Calcular la intensidad límite térmica:

$$I_{ter} = 180 \cdot 100 = 18000 \text{ A}$$

Cuando el tiempo de duración del cortocircuito es de T segundos (mayor que 1 s), el arrollamiento soportará una menor intensidad, cuyo valor se puede calcular:

$$I_{ter,T} = \frac{I_{ter}}{\sqrt{T}}$$

donde $I_{ter,T}$ es la resistencia térmica en T segundos, en amperios; T es el tiempo de duración de la corriente de cortocircuito, en segundos.

Ejemplo: Para el transformador del ejemplo anterior, calcular la intensidad límite térmica cuando el cortocircuito tenga la duración límite $T = 4$ segundos.

$$I_{ter,T} = \frac{18000}{\sqrt{4}} = 9000 \text{ A}$$

Intensidad límite dinámica

La segunda característica cualitativa se define así:

La intensidad límite dinámica I_{din} es el máximo valor de la intensidad de corriente de cortocircuito de corta duración, con la cual la construcción del transformador no sufre deformaciones mecánicas ni otros deterioros. Esta intensidad se puede calcular, según las normas, con la fórmula siguiente:

$$I_{din} = 1,8 \sqrt{2} I_{cc}$$

donde I_{cc} es la corriente de cortocircuito.

TABLA I-3

Errores de transformadores de intensidad según la clase de exactitud

Clase de exactitud	Porcentaje de corriente primaria I_1	Porcentaje de carga nominal secund.	Errores admisibles con $\cos \varphi' = 0,8$ ind. (en sec.)	
			Error de intensidad $\pm \delta_i$	Error angular $\pm \delta_a$
	%	%	%	min.
0,2	100 a 200	25 a 100	0,2	10
	20		0,3	15
	10		0,4	20
0,5	100 a 200	25 a 100	0,5	30
	20		0,75	40
	10		1,0	60
1	100 a 200	25 a 100	1,0	60
	20		1,5	80
	10		2,0	120
3	100 a 200	50 a 100	3,0	—

Clasificación y tipos de transformadores de intensidad

La construcción del transformador de intensidad depende de varios factores y generalmente se los clasifica según el uso al cual están destinados y según las condiciones de su trabajo.

Según el uso se dividen en:

- a. Transformadores de línea.
- b. Transformadores de laboratorio.

También se dividen en:

- a. Transformadores de alta tensión.
- b. Transformadores de baja tensión.

Y finalmente, se diferencian por su construcción básica:

- a. Transformadores de barra pasante.
- b. Transformadores con el bobinado primario y secundario colocados.

Los transformadores de línea se instalan directamente en la red de energía eléctrica. En este caso son parte integral de la instalación de distribución y, por tanto, tienen que soportar todos los efectos que en la red se pueden producir, como cortocircuitos, sobrecargas, etc. En consecuencia deben caracterizarse por alta resistencia térmica (I_{tar}) y alta resistencia dinámica (I_{din}). Además, deben mantener su clase de exactitud con las variaciones del valor eficaz de la corriente primaria nominal, con las sobrecargas; el aislamiento de su arrollamiento primario debe responder a las sobretensiones.

En transformadores de intensidad de laboratorio, la característica más importante es su exactitud en un campo de medida que puede oscilar entre 10 y 120 % de la corriente primaria nominal ($I_{1,nom}$). Debido a que los transformadores de laboratorio no necesitan soportar sobrecargas mayores de $I_{1,nom}$, no se exigen altas resistencia térmica ni dinámica. En cambio, es importante que tengan dimensiones y pesos relativamente reducidos para facilitar su transporte y manejo.

De estas diferencias entre las exigencias de transformadores de línea y de laboratorio resultan diferentes soluciones constructivas, lo que se demuestra en los ejemplos que siguen a continuación. La gran variedad en las construcciones aparece en los transformadores de línea. Esta variedad se debe a una gran gama de las tensiones nominales de aislamiento (0,5 hasta 220 kV) y a diferentes condiciones de instalación y montaje.

Una parte esencial del transformador de corriente es su núcleo, ya que forma el circuito magnético. Para reducir al mínimo el número necesario de amperiovueltas, el material del núcleo es de baja reluctancia y de muy bajas pérdidas en el hierro. La inducción magnética, con el secundario en cortocircuito por los instrumentos conectados, no excede 0,1 Wb/m². El número de amperiovueltas nominales del primario está comprendido entre 500 y 1000.

Existen diferentes tipos de núcleos y su forma depende del tipo de los arrollamientos primario y secundario y del uso al cual está des-

tinado el transformador. En general, los núcleos tienen forma de toroide o rectangular. El núcleo toroidal ofrece grandes ventajas; su campo magnético es máximo en el interior con una mínima pérdida externa del flujo magnético. Consiste en un paquete de láminas estampadas en forma de anillos, aislados entre sí y, por tanto, no existe entrehierro alguno. También se puede confeccionar bobinándolo con largas tiras de chapa magnética. Su aplicación más común es la de transformadores cuyo devanado primario está constituido por el mismo cable o barra de la instalación, de sección circular. También tiene mucha aplicación esta forma de núcleo en los transformadores de intensidad destinados al uso de laboratorio, por la facilidad que ofrecen para el cambio de la relación de transformación y por su mínimo error. Las figuras I-8 y I-9 muestran el principio y la aplicación de

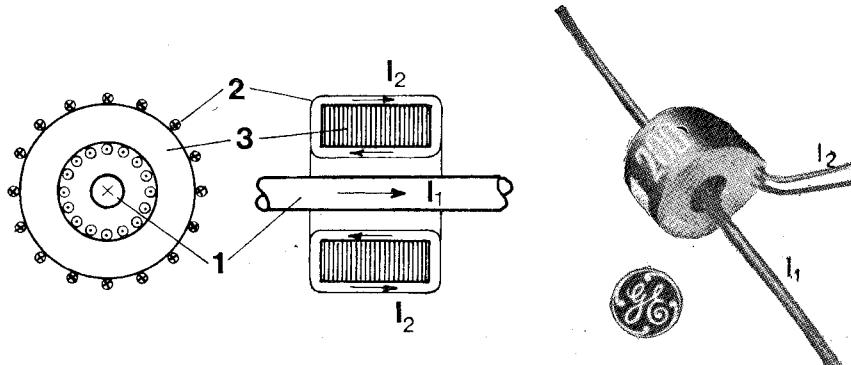


Figura I-8.

Figura I-9. (Cortesía GENERAL ELECTRIC.)

este tipo de transformador de corriente. Las figuras I-10 y I-11 muestran el transformador de barra pasante cuyo núcleo tiene forma rectangular.

Los transformadores de intensidad con el primario compuesto de varias espiras, ya colocadas, se utilizan en los casos de la intensidad primaria I_1 de valor relativamente bajo. La figura I-12 muestra el principio de su construcción. Este tipo de transformador tiene una resistencia dinámica (I_{din}), menor que la de los transformadores de barra pasante. La figura I-13 muestra la construcción básica del transformador de intensidad destinado a instalaciones de alta tensión. El mayor problema en estos transformadores se presenta en las salidas del arrollamiento primario. En el ejemplo de la figura I-13, las salidas, que son de una longitud h , pasan a través del aislador (4), cuya longitud

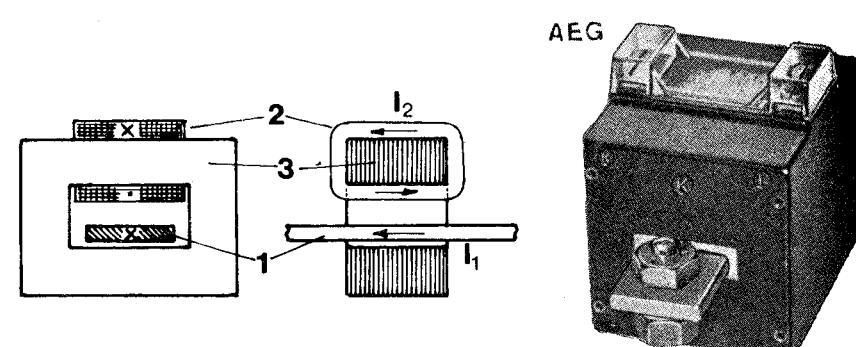


Figura I-10.

Figura I-11. (Cortesía AEG.)

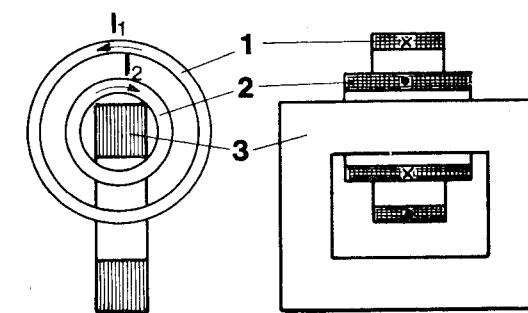


Figura I-12.

1, arrollamiento primario; 2, arrollamiento secundario; 3, núcleo

y forma corresponden a la tensión nominal de la instalación. Como se puede apreciar en la figura, el conductor de entrada K y de salida L tienen una longitud considerable (depende de la tensión) y en el caso de un cortocircuito en la línea se puede originar entre ambos una fuerza considerable que originaría un destrozo interior. Lo mismo puede suceder entre dos arrollamientos, el primario y el secundario del transformador de la figura I-12. En los transformadores para alta tensión, el núcleo (3) y los devanados (1 y 2) están sumergidos en baño de aceite (debajo la línea A-A), en un tanque, igual que en los transformadores de potencia y de tensión. La entrada K y la salida L están introducidas por el interior del aislador (4), ya que, debido a la muy

baja impedancia del primario (con el secundario en cortocircuito a través de los instrumentos), la diferencia de potenciales ΔU entre el borne K y el borne L es de muy pequeño valor. La figura I-14 muestra un transformador de intensidad marca WESTINGHOUSE de las siguientes características: clase 0,3, tensión de la red 92 kV, relación de transformación $K_i = 1$ (5 A/5 A), resistencia térmica $I_{ter} = 65 \times I_{nom}$ en 1 segundo y $29 \times I_{1,nom}$ en 5 segundos, resistencia dinámica $I_{din} = 85 \times I_{1,nom}$.

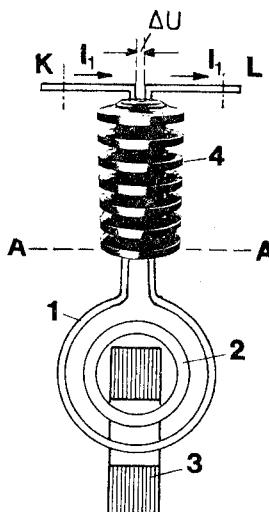


Figura I-13.

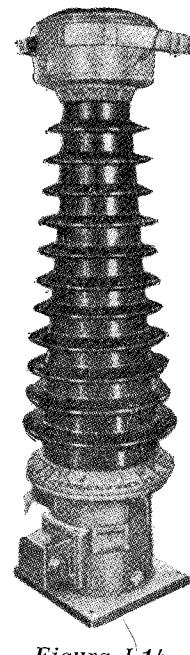


Figura I-14.

Los transformadores portátiles están destinados al uso de laboratorio y mediciones de potencia en los procesos tecnológicos de fabricación, reparaciones, etc. Sus dimensiones y peso son por lo general reducidos, y la tensión nominal de este tipo de transformador no sobrepasa los 600 V. Su construcción está basada, casi exclusivamente, en el núcleo de forma toroidal por las ventajas mencionadas anteriormente. La clase de exactitud es alta, 0,5; 0,2 y hasta 0,1 y 0,05. El transformador portátil debe ofrecer la posibilidad de utilizarlo con varias relaciones de transformación (K_i). El cambio de la relación se efectúa mediante variantes del arrollamiento primario. Para intensi-

dades bajas se utilizan derivaciones en el primario (fig. I-15). Suponiendo que el transformador de la figura está construido a base de 500 Av (amperiovueltas), la primera derivación (K — L₁) corresponde a la relación:

$$K_{i,1} = \frac{50}{5} = 10; \quad \frac{500 \text{ Av}}{50 \text{ A}} = 10 \text{ espiras}$$

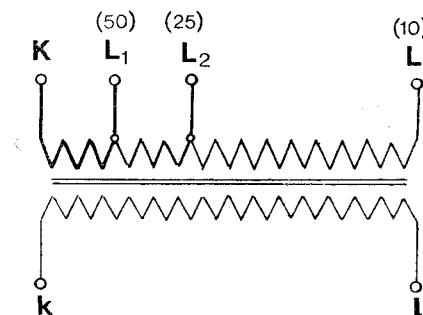


Figura I-15.

La segunda derivación (K — L₂) corresponde a la relación:

$$K_{i,2} = \frac{25}{5} = 5; \quad \frac{500 \text{ Av}}{25 \text{ A}} = 20 \text{ espiras}$$

La tercera derivación (K — L₃) corresponde a la relación:

$$K_{i,3} = \frac{10}{5} = 2; \quad \frac{500 \text{ Av}}{10 \text{ A}} = 50 \text{ espiras}$$

La figura I-16 muestra el modo de utilizar el mismo cable de la instalación como primario. Con este fin se introduce el cable, de sección apropiada para la intensidad primaria I_1 que va a circular, en el orificio central del transformador, y se le conecta en el circuito de medición como el primario. (Ver lo expuesto sobre transformadores de barra pasante.) En la figura I-16 a, se muestra la relación de transformación que se obtiene al hacer pasar el cable de la instalación una sola vez por la ventana del núcleo.

$$\text{fig. I-16, a: } \frac{500 \text{ Av}}{1 \text{ espira}} = 500 \text{ A}; \quad K_i = \frac{500 \text{ A}}{5 \text{ A}} = 100$$

$$\text{fig. I-16, } b: \frac{500 \text{ Av}}{2 \text{ espiras}} = 250 \text{ A}; \quad K_i = \frac{250 \text{ A}}{5 \text{ A}} = 50$$

$$\text{fig. I-16, } c: \frac{500 \text{ Av}}{4 \text{ espiras}} = 125 \text{ A}; \quad K = \frac{125 \text{ A}}{5 \text{ A}} = 25$$

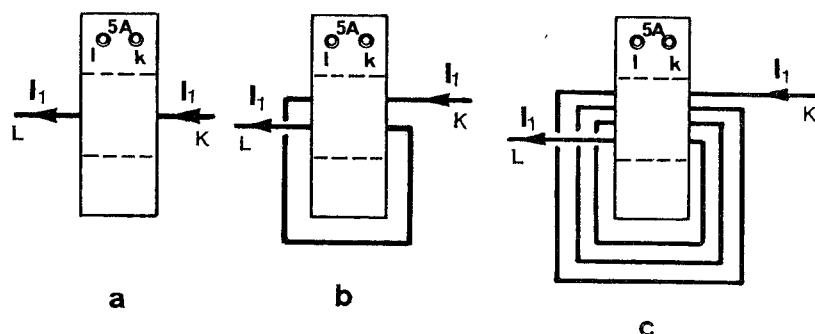


Figura I-16.



Figura I-17.



Figura I-18.

Conexión a tierra de transformadores de intensidad

Los arrollamientos secundarios de los transformadores de medida se conectan a tierra. Una de las finalidades de esta conexión es la seguridad de los instrumentos y del personal, debido a que en el caso de ocurrir una comunicación de alta tensión del arrollamiento pri-

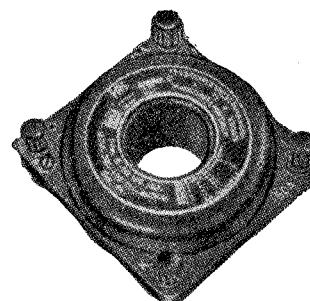


Figura I-19.

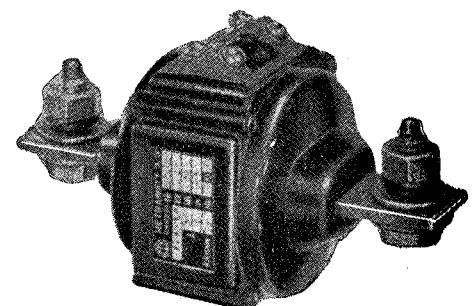


Figura I-20.

Transformador marca METRAWATT A.G. (Al)
Tensión de trabajo 600 V
Tensión de prueba 3 kV
Relación 60/5 A
 $I_{1, \text{ter}} = 60 \times I_{1, \text{nom}}$
 $I_{1, \text{din}} = 150 \times I_{1, \text{nom}}$
 $f = 50 \text{ Hz}$
 $n < 5$; Clase 1

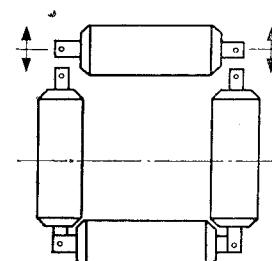
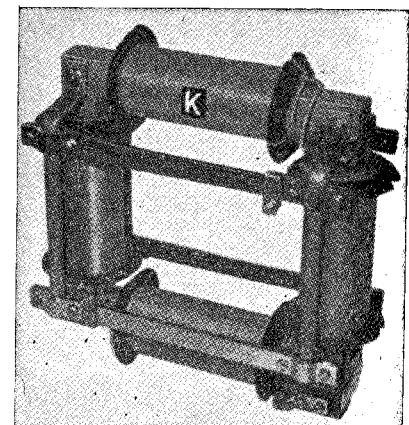


Figura I-21.



Transformador marca AEG (Al)
Tensión de trabajo 600 V
Tensión de prueba 3 kV
Relación 60.000/5 A
 $n = 20$; Clase 1

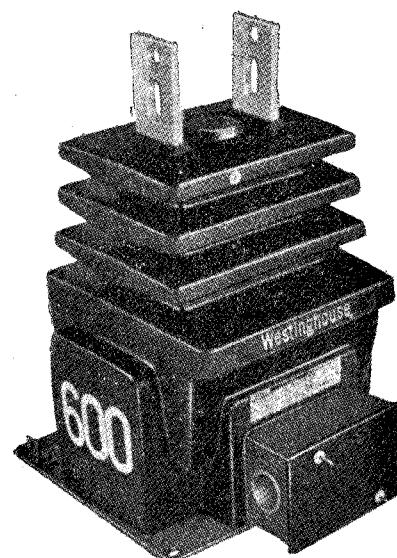


Figura I-22.

Transformador marca WESTINGHOUSE
Tensión de trabajo 5000 V
Relación 600/5 A
 $I_{1, \text{ter}} = 100 \times I_{1, \text{nom}}$
 $I_{1, \text{din}} = 125 \times I_{1, \text{nom}}$
 $f = 60 \text{ Hz}$; Clase 0,3 (ASA)

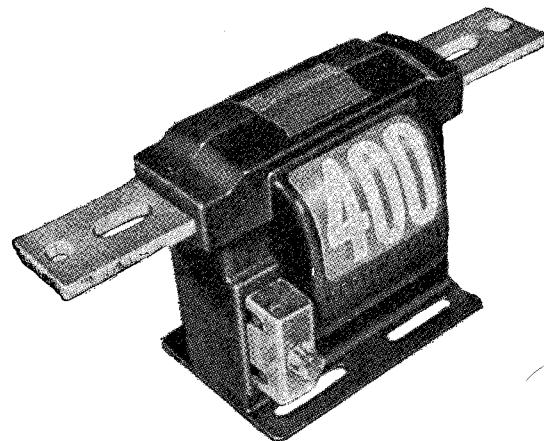


Figura I-23.

Transformador WESTINGHOUSE
Tensión de trabajo 5000 V
Relación 400/5 A
 $I_{1, \text{ter}} = 100 \times I_{1, \text{nom}}$
 $I_{1, \text{din}} = 90 \times I_{1, \text{nom}}$
Clase 0,3 (ASA)
 $f = 60 \text{ Hz}$

mario con el arrollamiento secundario, se puede producir una peligrosa acción en el circuito de medición conectado al secundario. La otra finalidad de esta conexión es evitar que se originen diferentes potenciales en varios elementos de medición conectados (vatímetros, medidores de energía, etc.), con respecto a tierra. Además, pueden aparecer acoplamientos capacitivos indeterminados que pueden ocasionar errores adicionales.

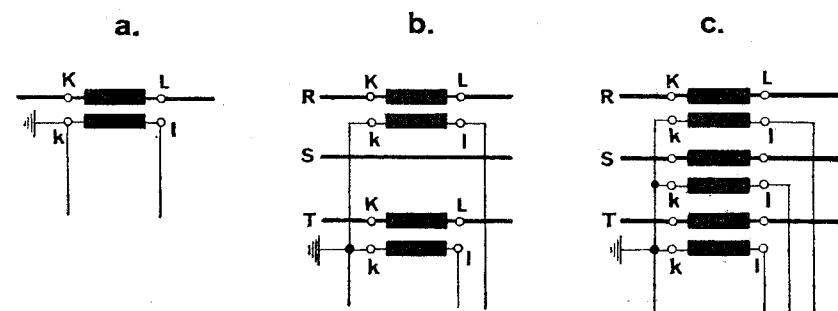


Figura I-24.

La figura I-24 muestra las conexiones a tierra de los transformadores de intensidad. La conexión se efectúa conectando un solo terminal (k o l, fig. I-24 a). Cuando se trata de sistema trifásico, o sea, cuando se utiliza más de un transformador, en todos los transformadores se conecta a tierra el mismo borne k o l.

Capítulo II

TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN DE TENSIÓN

Definición y finalidad

El transformador de tensión está destinado a ser conectado en paralelo con el receptor, de la misma manera como se conecta un voltímetro. La relación entre la tensión primaria y la tensión secundaria es:

$$K_u = \frac{U_1}{U_2}$$

expresión que se denomina *relación de transformación de tensión* y es proporcional a la relación entre espiras del primario y secundario, de igual manera que en un transformador de potencia. Cualquier variación de la tensión primaria origina la variación de la tensión secundaria indicada por los instrumentos conectados en paralelo con el secundario del transformador. Los instrumentos conectados al secundario son voltímetros, frecuencímetros, bobinas de tensión de vatímetros o de medidores de energía, etc., y se caracterizan por muy altas impedancias. Las intensidades de corriente primaria originadas por la alimentación de los instrumentos de alta impedancia en el secundario son muy pequeñas, de modo que en el primario producen un efecto no mayor que el de una corriente de excitación del transformador (I_0). En consecuencia, el transformador de tensión trabaja en las condiciones de un transformador de potencia en vacío. Cada transformador de tensión está construido para una determinada tensión primaria U_1 mientras la tensión secundaria U_2 es normalizada en 100 V (para tensiones compuestas) y en $\frac{100}{\sqrt{3}}$ V para tensiones sencillas. La relación

de transformación K_u tiene un valor constante para un determinado transformador. Conociendo el valor nominal de la relación $K_{u, \text{nom}}$ y midiendo el valor eficaz de la tensión secundaria se puede calcular el valor eficaz de la tensión primaria. La relación de transformación se expresa en forma de fracción, por ejemplo: 6000 V/100 V o $\frac{20000}{\sqrt{3}} \text{ V}/\frac{100}{\sqrt{3}} \text{ V}$.

Ejemplo: Un transformador de tensión está construido para $U_1 = 30000 \text{ V}$, ($U_2 = 100 \text{ V}$). La relación de transformación es:

$$K_{u, \text{nom}} = \frac{30000}{100} = 300$$

El voltímetro conectado al secundario indica $U_2 = 90 \text{ V}$. La tensión primaria

$$U_1 = 90 \cdot 300 = 27000 \text{ V}$$

La figura II-1 a muestra el esquema del transformador de tensión y su conexión a la red y las figuras II-1 b y c representan los símbolos gráficos más frecuentemente usados en los esquemas de conexiones. El comportamiento del transformador de tensión es muy similar al de un transformador de potencia sin carga secundaria (en vacío). Los transformadores de tensión deben estar protegidos con fusibles, tanto en el lado primario como en el secundario. Los fusibles (1) del primario protegen la red contra el cortocircuito del transformador y los fusibles (2) en el secundario protegen el transformador contra los cortocircuitos de los receptores (instrumentos). El arrollamiento secundario debe estar conectado a tierra como también su caja y su núcleo.

A los bornes primarios U y V (o M y N) está conectada la tensión primaria U_1 de valor correspondiente al valor nominal de la tensión primaria del transformador. A los bornes secundarios u y v (o m y n) se conecta en *paralelo* los receptores tales como voltímetros, bobinas de tensión de vatímetros, cofímetros, medidores de energía, etc., que se caracterizan por muy altas impedancias. En consecuencia las intensidades de corriente en los arrollamientos del transformador, originadas por la conexión de este tipo de receptores, son muy pequeñas. La intensidad de corriente (I_1) en el arrollamiento primario del transformador tiene el mismo orden de magnitud que la corriente de excitación (I_0). En estas condiciones, la suma de las caídas de tensión es de valor tan bajo que se puede admitir que es válida la relación:

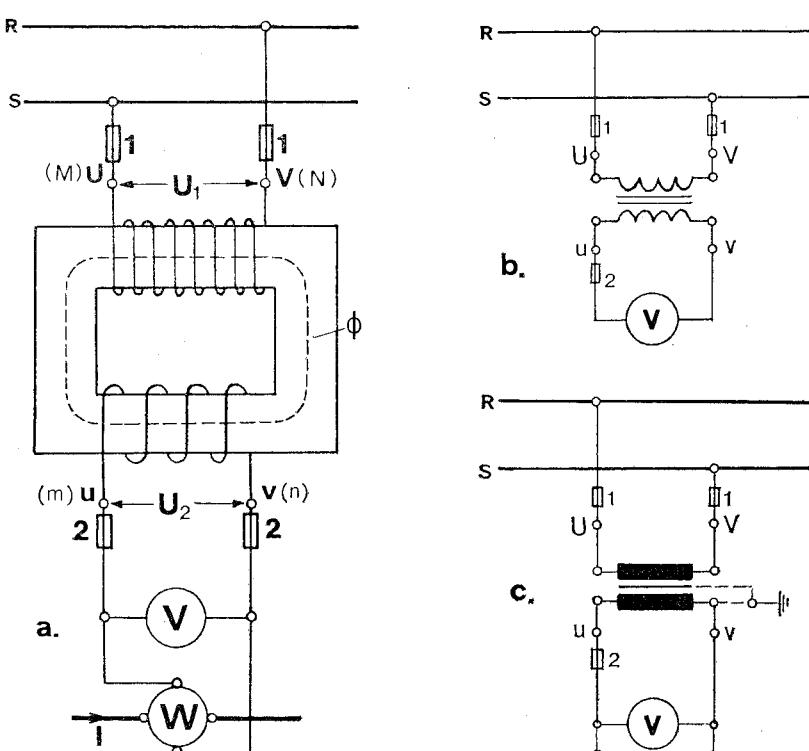


Figura II-1.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Sin embargo, las pérdidas en el núcleo y en los arrollamientos originan un desfase de la tensión secundaria U_2 con respecto a la tensión primaria U_1 , de lo cual resulta un error angular similar al de los transformadores de corriente.

Diagrama vectorial

La determinación de los tipos de errores y sus conceptos se puede deducir a base del análisis del diagrama vectorial (fig. II-2). En este

diagrama se han exagerado deliberadamente las magnitudes de los vectores de corrientes y de las caídas de tensión para asemejar el diagrama de la figura al diagrama vectorial de un transformador de potencia. A base del diagrama se aprecian dos tipos de errores. Uno denominado *error de tensión o error de relación* que se debe a la diferencia entre los valores de U_1 y U_2 y el otro denominado "error angular". Para simplificar, el diagrama está construido para la relación $K_u = 1$.

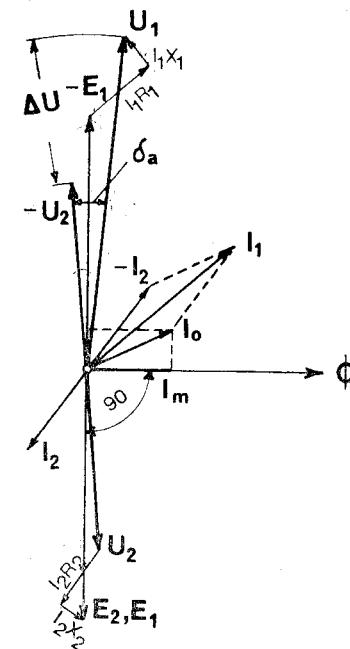


Figura II-2.

Error de relación

El error de tensión o de relación δ_u del transformador de tensión es la diferencia entre el valor eficaz de la tensión secundaria, multiplicado por la relación nominal de transformación, y el valor eficaz de la tensión primaria. Por lo general, este error se expresa como el error relativo en un tanto por ciento de la tensión primaria.

La relación de transformación nominal es

$$K_u = \frac{U_{1, \text{nom}}}{U_{2, \text{nom}}}$$

El error absoluto:

$$\Delta U = U_2 \cdot K_{u, \text{nom}} - U_1 \quad (\text{V})$$

El error relativo:

$$\delta_u = \frac{\Delta U}{U_1} \cdot 100 = \frac{U_2 \cdot K_{u, \text{nom}} - U_1}{U_1} \cdot 100 \quad (\%)$$

Cuando no existe la corrección de los devanados del transformador, la relación de transformación es igual a la relación de espiras:

$$K_u = \frac{n_1}{n_2}$$

donde: n_1 es el número de espiras del arrollamiento primario y n_2 es el número de espiras del arrollamiento secundario.

Error angular

El otro error, denominado *error angular*, se debe al desfase entre la tensión primaria U_1 y la tensión secundaria U_2 .

El error angular δ_a del transformador de tensión es el ángulo en que está desfasado el vector de la tensión secundaria U_2 , invertido, con respecto al vector de la tensión primaria U_1 .

El comportamiento del transformador de tensión es similar al de un transformador ideal en vacío, debido a las impedancias muy altas de la carga secundaria. Sin embargo, las pérdidas en el núcleo y en el cobre de los arrollamientos originan el desfase entre las tensiones U_1 y U_2 . El vector de la corriente secundaria I_2 se retraza con respecto al vector de la fuerza electromotriz secundaria E_2 debido a la inductancia del circuito secundario (arrollamiento más carga) X_2 . En consecuencia el vector de la tensión secundaria U_2 se adelanta con respecto al vector I_2 , pero se atrasa con respecto al vector E_2 . La diferencia ΔU entre las tensiones aparece también con $I_2 = 0$, o sea en vacío. Esta diferencia aumenta con el incremento de la corriente I_2 (aumento de la carga secundaria), lo que origina la disminución de la relación K_u . En consecuencia, con la carga pequeña la relación es

mayor que con las cargas mayores. Debido a las variaciones de la relación K_u , al aumentar el número de instrumentos conectados en paralelo se produce el "error de relación" o "error de tensión". La figura II-3 a, muestra una típica curva de errores de relación en función de tanto por ciento de la carga secundaria nominal del transformador de tensión.

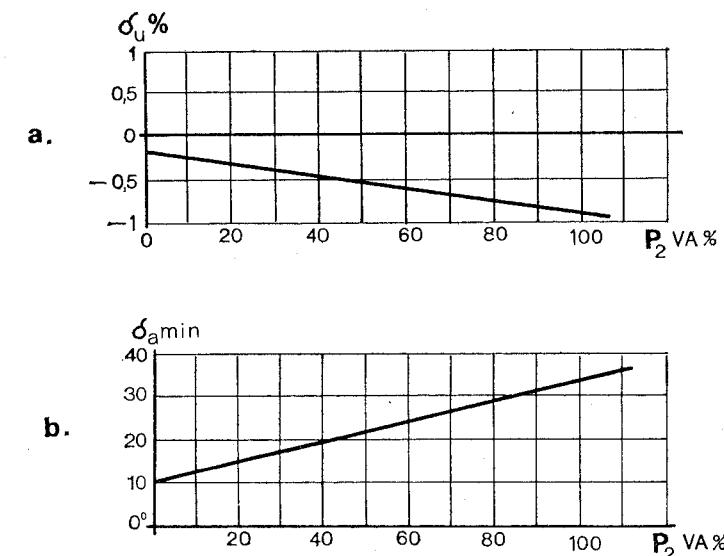


Figura II-3.

La diferencia entre las tensiones U_1 y U_2 ($K_u = 1$) aparece también cuando $I_2 = 0$. Esta diferencia aumenta con el incremento de I_2 y, por lo tanto, cualquier cambio en la cantidad y el tipo de los elementos conectados al secundario origina un cambio de R_2 y jX_2 lo que afecta el valor obtenido de medición.

Lo mismo que los transformadores de intensidad, los transformadores de tensión se dividen en 4 clases principales de exactitud: 0,2; 0,5; 1; 3. En la placa indicadora deben figurar, además de la relación de transformación (siempre $U_2 = 100$ V), la potencia de carga secundaria admisible y el error.

LA POTENCIA DE CARGA SECUNDARIA

La potencia nominal está dada en VA y su valor se utiliza para determinar los límites de la impedancia (Z_2), conectada al secundario cuya tensión nominal está normalizada en 100 V. En algunos casos se necesita conectar al secundario varios instrumentos en paralelo (voltímetro, bobinas de tensión del vatímetro y del medidor de energía, frecuencímetro, etc.) y entonces es imprescindible computar la carga total resultante. Por lo general es suficiente sumar aritméticamente los VA de los instrumentos conectados en paralelo. Cuando es conocida la impedancia Z_2 de la carga se calcula la potencia secundaria por:

$$P_2 = \frac{U_2^2}{Z_2} \text{ (VA)}$$

donde U_2 es la diferencia de potencial entre los bornes de salida del secundario ($u - v$). Este método se utiliza para determinar si la carga no es excesiva. Cuando el valor obtenido por la suma aritmética excede el valor nominal, se debe calcular nuevamente tomando en cuenta los factores de potencia de los receptores.

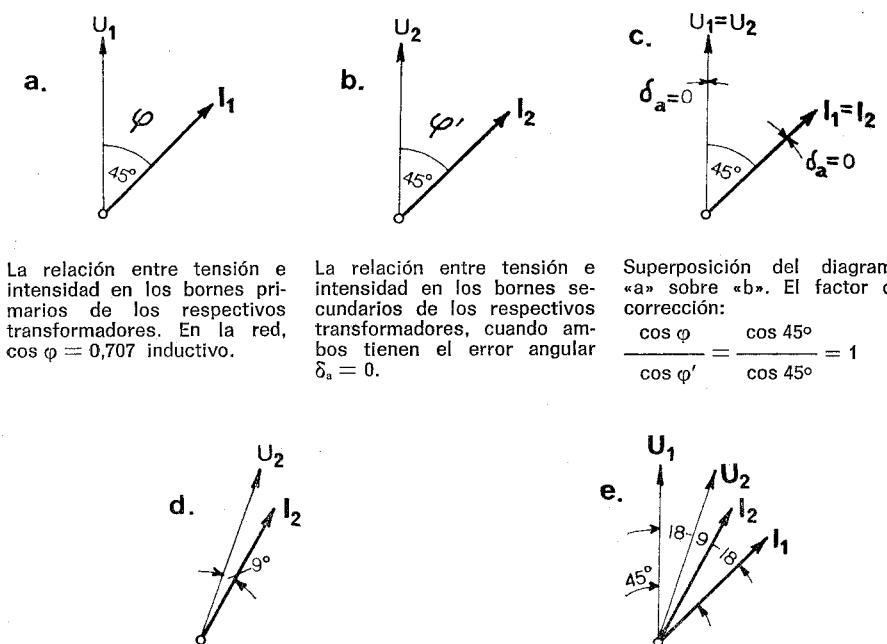
EL ERROR

El error que origina el transformador de tensión depende de la carga secundaria y del ángulo de desfase entre U_2 e I_2 , o sea del tipo de la impedancia resultante conectada al secundario (Z_2). Para corregir este error se utiliza frecuentemente un "factor de corrección" el cual se expresa por la relación:

$$\frac{K_{u, \text{nom}}}{K_{u, \text{real}}}$$

El error angular δ_u del transformador de tensión es el ángulo entre el vector invertido ($-U_2$) de la tensión secundaria y el vector U_1 de la tensión primaria reducida al secundario y se expresa en minutos. Se acostumbra a considerar el ángulo como positivo cuando el vector invertido $-U_2$ se adelanta con respecto al vector U_1 . Generalmente, cuando se mide solamente la tensión, el error angular no afecta mucho al valor medido y se le puede omitir. Sin embargo, cuando se trata de mediciones de potencia, que son afectadas por la relación entre los vectores de tensión y de corriente (lectura del vatímetro), el error angular tiene mucha importancia. En estos casos, el desfase entre la

tensión primaria (U_1) y la tensión secundaria (U_2) del transformador de tensión relacionado con el desfase de la intensidad primaria (I_1) y la intensidad secundaria (I_2) tomada del transformador de intensidad, puede originar una diferencia entre el valor del $\cos \varphi$ que existe en la red (o en el receptor) y el valor del $\cos \varphi'$ que se manifiesta en la lectura del vatímetro conectado a los arrollamientos secundarios de los transformadores de tensión y de intensidad. La figura II-4, representa en forma gráfica este error. Para facilitar el análisis, los diagramas están construidos para las relaciones de transformación de los transformadores de medición: $K_u = 1$ y $K_i = 1$.



La relación entre tensión e intensidad en los bornes primarios de los respectivos transformadores. En la red, $\cos \varphi = 0,707$ inductivo.

La relación entre tensión e intensidad en los bornes secundarios de los respectivos transformadores, cuando ambos tienen el error angular $\delta_u = 0$.

Superposición del diagrama «a» sobre «b». El factor de corrección:

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'} = \frac{\cos 45^\circ}{\cos 45^\circ} = 1$$

La misma relación que en «b» con la diferencia que el transformador de intensidad tiene el error $\delta_i = 18^\circ$ capativo y el transformador de tensión $\delta_u = 18^\circ$ inductivo. Los errores angulares están exagerados para hacer el efecto más visible. Los dos ángulos de error acercan los vectores de tensión y de intensidad más que en los primarios, originando mayor desviación de la aguja del vatímetro.

Superposición del diagrama «a» sobre el diagrama «d». El resultante factor de corrección es:

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'} = \frac{\cos 45^\circ}{\cos 9^\circ} = \frac{0,707}{0,987} = 0,716$$

Figura II-4. (Cortesía de GEC, USA).

LA POTENCIA LÍMITE

La carga secundaria de un transformador de tensión está dada en VA, para que el transformador no origine error mayor que el determinado por su clase de exactitud. Sin embargo, considerando que el transformador de medición de tensión es en realidad un transformador de potencia que funciona casi en vacío, se debe tener en cuenta la máxima intensidad de corriente secundaria admisible no a base del error sino de la máxima temperatura que pueden soportar sus devanados. El producto de esta intensidad límite térmica por la tensión nominal se denomina *potencia límite*. Esta potencia límite es un múltiplo de la potencia nominal secundaria (2 a 6 veces según sus características). Cuando el transformador de tensión está conectado a una tensión inferior a la nominal la carga también se reduce. La potencia reducida se puede calcular así:

$$\left(\frac{U_1}{U_{1,\text{nom}}} \right)^2 \cdot P_{\text{nom}} = P_{\text{red}}$$

donde U_1 es la tensión de la red a la cual está conectado el transformador.

$U_{1,\text{nom}}$ es la tensión nominal del transformador

P_{nom} es la potencia nominal del transformador en VA

P_{red} es la potencia reducida que se puede tomar del transformador.

Ejemplo: Un transformador de tensión tiene la relación $K_u = \frac{3000}{100}$ V y su potencia nominal secundaria es de 30 VA. Se conecta a la red de 2400 V. Su potencia reducida es:

$$P_{\text{red}} = \left(\frac{2400}{3000} \right)^2 \cdot 30 = 19,2 \text{ VA}$$

Ejemplo: Calcular la mínima impedancia secundaria *admisible* para el transformador del ejemplo anterior.

$$P = 30 \text{ VA}; \quad U_2 = 100 \text{ V}$$

$$I_{2,\text{nom}} = \frac{P_{\text{nom}}}{U_2} = \frac{30}{100} = 0,3 \text{ A}; \quad Z_{2,\text{min}} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{100}{0,3} = 333 \Omega$$

De esto resulta que todos los instrumentos conectados en paralelo al secundario del transformador no deben tener en conjunto la impedancia inferior al valor calculado de 333 Ω.

Consumo de instrumentos

Para orientación del lector se han resumido en la Tabla II-1 los valores típicos del consumo de la potencia por los circuitos de tensión de los diferentes instrumentos de medición que suelen conectarse a los transformadores de tensión. Los valores indicados son aproximados ya que dependen del modelo, clase, fabricante, etc. del instrumento. Los valores exactos, en el caso de necesidad, se obtienen de los catálogos de los respectivos instrumentos.

TABLA II-1

Instrumentos	Consumo de potencia (aprox.)
<i>Voltímetro</i> electromagnético electrodinámico magn. electr. con rectificador	3,5 VA 1,5 a 2 VA 0,1 a 0,3 VA
<i>Vatímetro</i> circ. tensión por fase	1 a 1,5 VA
<i>Medidor de energía</i> bobina de tensión por cada sistema	2 a 5 VA
<i>Frecuencímetro</i> de lengüetas	1 a 3 VA
<i>Cos φ metro</i> por fase	≤ 3,5 VA

En transformadores de tensión, la intensidad de corriente secundaria es pequeña y por lo general no se tienen en cuenta las resistencias de los conductores que los unen con los instrumentos, contrariamente al caso de los transformadores de intensidad. Las conexiones en el circuito secundario se efectúan con conductores de 2,5 mm² de sección en países normalizados o con conductores n.º 14 (USA). En los casos en los cuales la distancia entre los transformadores y los instrumentos es grande o, cuando la potencia

nominal del transformador de tensión es relativamente grande (transformadores de línea), se utiliza mayor sección de conductor que la deducida del cálculo.

Como ya se ha mencionado se fabrican transformadores de tensión de varias clases de exactitud. Los de clase 0,2 y 0,5 se utilizan en conjunto con los medidores de energía o con los instrumentos de medición de clases altas. Los de clase 1 y 3 para los voltímetros de tablero y los relés. La Tabla II-2 resume los errores correspondientes para cada clase del transformador de tensión en función del tanto por ciento de la tensión primaria (U_1), del tanto por ciento de la carga nominal secundaria cuando la tensión secundaria es $U_2 = 100$ V (en modelos normalizados), y con $\cos \phi = 0,8$ constante.

TABLA II-2

Errores de transformadores de tensión según la clase de exactitud

Clase de exactitud	Porcentaje de tensión primaria U_1	Porcentaje de carga nominal secund. con U_2 nom.	Errores admisibles con $\cos \phi' = 0,8$ (en secund.)	
			Error de relación	Error angular
%	%	%	%	min.
0,2	80 a 100	25 a 100	0,2	10
0,5	80 a 100	25 a 100	0,5	20
1	80 a 120	25 a 100	1	40
3	100	50 a 100	3	—

Clasificación y tipos de transformadores de tensión

La construcción del transformador de tensión depende de varios factores y estos transformadores se clasifican según el uso al que están destinados y según las condiciones de su trabajo. Según el uso se dividen en:

- a) Transformadores de línea.
- b) Transformadores de laboratorio.

Según el orden de la magnitud de las tensiones primarias:

- a) Transformadores de alta tensión.
- b) Transformadores de baja tensión.

Según el sistema de la red:

- a) Transformadores monofásicos.
- b) Transformadores polifásicos (2 o 3).

Los transformadores de línea se instalan en forma permanente en las redes y por consiguiente forman parte de las instalaciones de distribución de energía (medidores en alta y baja tensión). Deben ser construidos de modo que puedan soportar todos los inconvenientes que pueden aparecer en una red (sobretensiones, descargas atmosféricas, etc.). La condición más importante es la rigidez dielectrica de los materiales aislantes, capaz de asegurar la longevidad del transformador. Su exactitud requerida depende de los elementos conectados al secundario. Los transformadores de línea más frecuentemente utilizados son de clase 0,5, 1 y 3.

Los transformadores de tensión para uso en laboratorios se caracterizan por su exactitud (0,1 o 0,2) y un gran alcance de tensión. En cambio no exigen gran rigidez dielectrica, ya que se los utiliza en laboratorios y no en la intemperie. Deben ser fáciles de transportar y por lo tanto deben tener poco peso y dimensiones reducidas.

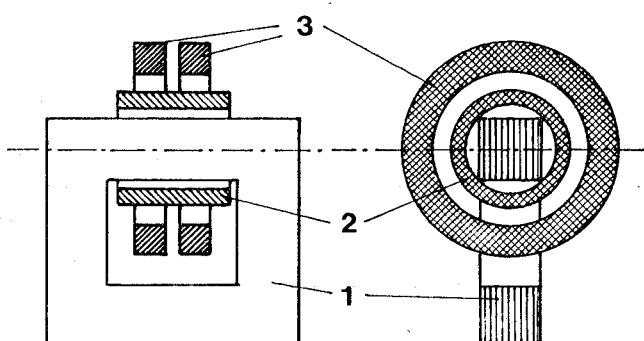


Figura II-5.

Los transformadores de tensión primaria baja se utilizan poco, ya que la mayoría de los instrumentos pueden funcionar en conexión directa. En su construcción no difieren mucho de los transformadores de potencias pequeñas. La figura II-5 muestra el principio de construcción de un transformador de tensión. Sobre el núcleo 1 está colocado el arrollamiento de baja tensión (2) (100 V), al cual se conectan los instrumentos de medición. El arrollamiento secundario (3) se

compone de una o varias bobinas según la tensión primaria (U_1). El aislamiento depende del valor de la tensión primaria (resina, aceite, etc.). Las figuras II-6 a II-11 muestran varios tipos y marcas de transformadores de tensión.

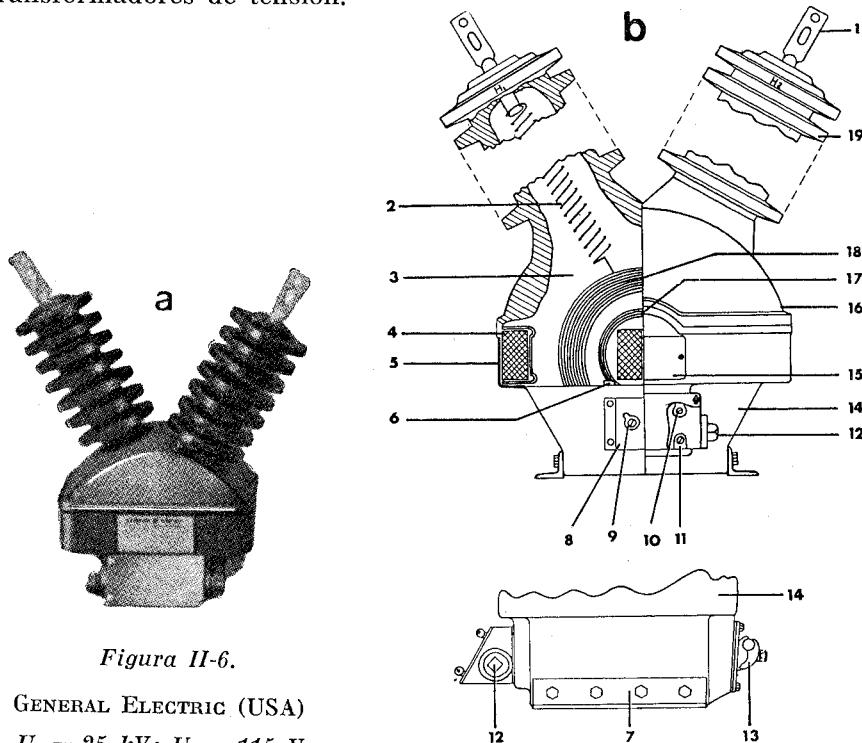


Figura II-6.

GENERAL ELECTRIC (USA)

 $U_1 = 25 \text{ kV}$; $U_2 = 115 \text{ V}$

1, terminal primario (alta tensión); 2, conexión interna primaria; 3, material aislante («Epoxy»); 4, núcleo; 5, abrazadera del núcleo; 6, fijación placa identificación; 7, soporte; 8, placa aislante de bornera secundaria; 9, borne secundario (115 V); 10, conexión a tierra del secundario; 11, tornillo fijación tapa secundario; 12, cierre de la boca del conducto secundario; 13, terminal de tierra; 14, base; 15, placa de identificación; 16, cubierta; 17, arrollamiento de baja tensión; 18, arrollamiento de alta tensión (en dos secciones); 19, aislador de alta tensión.

Conexión a tierra de transformadores de tensión

Por razones de seguridad se debe conectar a tierra el borne v del arrollamiento secundario (fig. II-12a). En las mediciones en siste-

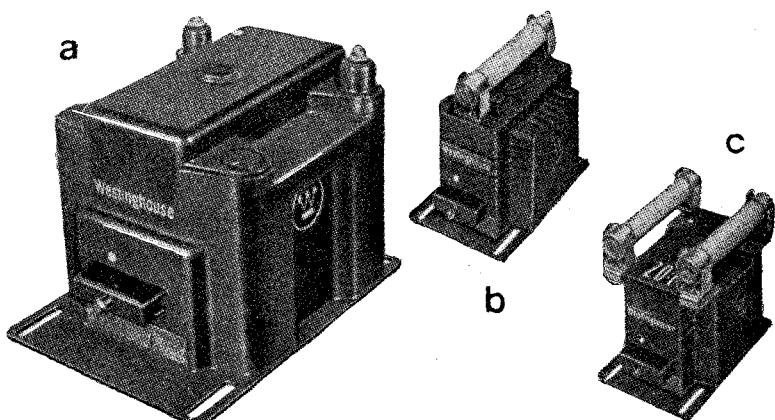


Figura II-7.

Transformadores WESTINGHOUSE de tensión

 $U_2 = 240 \text{ V } 60 \text{ VA}$; Clase 0,3

a, sin fusibles; b, con fusible; c, con dos fusibles.

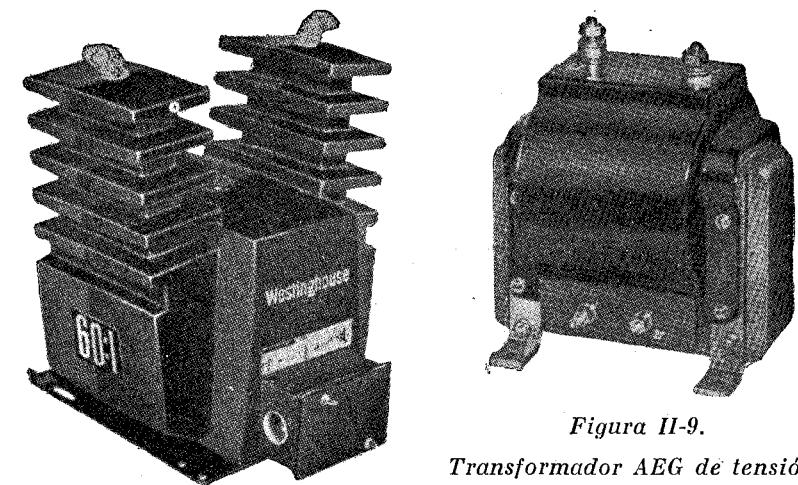


Figura II-8.

Transformador AEG de tensión

Clase 0,2. $U_1 = 500 \text{ V}$; $U_2 = 100 \text{ V}$

Transformador WESTINGHOUSE de tensión

 $U_1 = 2400 \text{ V}$; $U_2 = 120 \text{ V}$; Clase 0,3

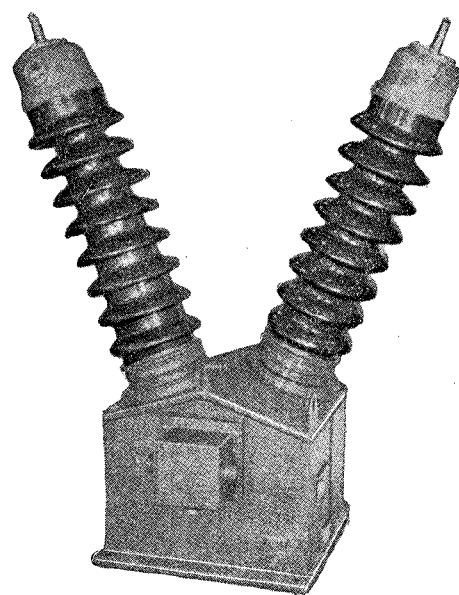


Figura II-10.

Transformador WESTINGHOUSE
de tensión.

$U_1 = 14400 \text{ V}$; $U_2 = 120 \text{ V}$,
Clase 0,3.

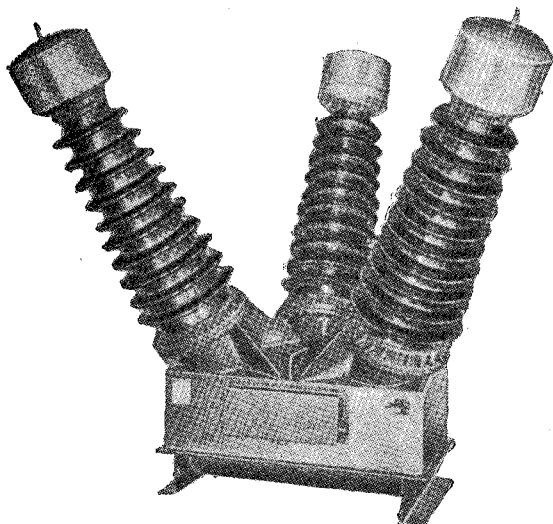


Figura II-11.

Transformador WESTINGHOUSE de tensión trifásico.
 $U_1 = 69000 \text{ V}$; $U_2 = 115 \text{ V}$,
Clase 0,3.

TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN DE TENSIÓN

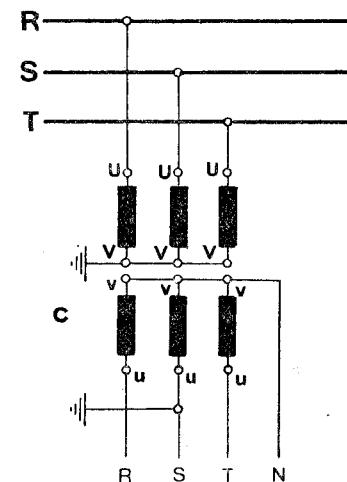
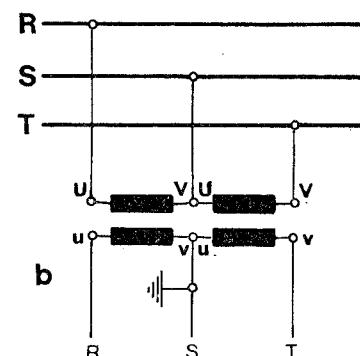
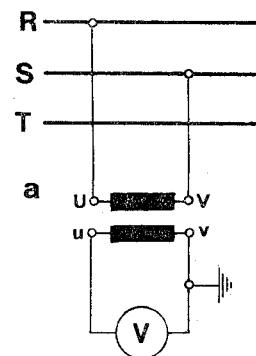


Figura II-12.

ma trifásico es conveniente conectar a tierra el borne u de la fase media S (fig. II-12b) y no el neutro de la conexión en estrella N . De esta manera se obtiene un potencial con respecto a tierra uniforme y también se evitan ciertas dificultades en las conexiones para sincronización. En un banco de transformadores conectados en V (fig. II-12c) se conecta a tierra la fase media S utilizando el borne v o el borne u del punto de unión de los secundarios de ambos transformadores.

1 CV equivale a	735,498 W	1 HP equivale a	745,55 W
1 kcal/s " "	4186,05 W	1 BTU " "	1054,8 W

BTU = British Thermal Unit

Capítulo III

MEDICIONES DE POTENCIA

Relación de unidades

La potencia eléctrica es la relación entre la energía eléctrica y el tiempo durante el cual se suministra o consume esa energía. Por eso se la define también como la energía eléctrica consumida en la unidad de tiempo.

$$P = \frac{A}{t}$$

Siendo $A = U \cdot I \cdot t$, resulta $P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$

La unidad de medida de potencia eléctrica en el sistema MKSA es 1 watt — 1 vatio — 1 W. Un vatio es la potencia de un sistema que realiza en un segundo un trabajo igual a 1 julio. También se utilizan las fracciones y los múltiplos del vatio:

$$1 \text{ mW} = 1 \text{ W} \cdot 10^{-3} = 0,001 \text{ W} \text{ (un milivatio)}$$

$$1 \text{ kW} = 1 \text{ W} \cdot 10^3 = 1000 \text{ W} \text{ (un kilovatio)}$$

$$1 \text{ MW} = 1 \text{ W} \cdot 10^6 = 1000000 \text{ W} \text{ (un megavatio)}$$

Las equivalencias con las unidades de otros tipos de energía son las siguientes:

1 W equivale a	0,101971 kgm/s	$0,13596 \times 10^{-2}$ CV	0,73756/pie · lb/s
1 kW equivale a	101,971 kgm/s	1,359623 CV	1,3412916 HP

CV o CM = Caballo vapor o caballo métrico; HP = British Horse Power

Medición de potencia de corriente continua

La potencia de corriente continua se expresa: $P = U \cdot I$ vatios (W), por lo cual se la mide por el método voltiamperimétrico empleando como únicos instrumentos el voltímetro y el amperímetro. Considerando las dos variantes de conexión de estos dos instrumentos en el circuito de medición de potencia (fig. III-1), se puede deducir que la diferencia entre la variante A y la variante B tendrá importancia únicamente en los casos de mediciones de potencias muy pequeñas, o sea cuando la potencia disipada en los instrumentos tenga influencia importante en los valores obtenidos de la medición.

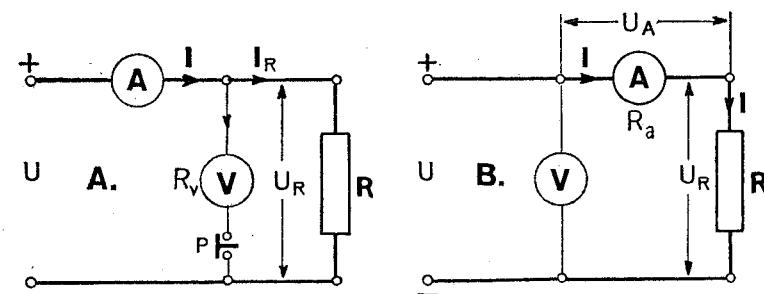


Figura III-1.

En las mediciones de potencias muy pequeñas se tiene en cuenta la carga adicional originada por los instrumentos. Se consideran dos casos: uno cuando se mide la potencia gastada por el receptor (R) y el otro cuando se mide la potencia suministrada por la fuente de energía. En ambos casos el amperímetro y el voltímetro pueden ser conectados de modo que el amperímetro mide la intensidad con un cierto error y la tensión se mide correctamente (fig. III-1 A), o el voltímetro mide la tensión con error (fig. III-1 B) y la intensidad se mide correctamente.

Al determinar la potencia del receptor con los instrumentos conectados, según el esquema de la figura III-1 A, la potencia es

$$P = U \cdot I$$

donde U es la indicación del voltímetro e I la del amperímetro.

La potencia consumida por el receptor R , por el cual circula la intensidad I_R , se determina así: $P_R = U \cdot I_R$. El error absoluto de la medición es:

$$\Delta P = P - P_R = U \cdot I - U \cdot I_R$$

siendo $I = I_R + I_v$ donde I_v es la intensidad que circula por el voltímetro.

$$\Delta P = U \cdot I - U \cdot I_R = U(I_R + I_v) - U \cdot I_R = U \cdot I_v$$

De esta ecuación se deduce que el error está originado por la potencia que consume el voltímetro. El correspondiente error relativo es:

$$\delta_p \% = \frac{I_v}{I_R} = \frac{R}{R_v}$$

El error es proporcional a la resistencia del receptor y disminuye si se utilizan voltímetros de alta resistencia interna.

Utilizando la conexión indicada en el esquema de la figura III-1 B, la potencia que se mide es, lo mismo que en el caso anterior:

$$P = U \cdot I$$

La potencia del receptor se calcula por $P_R = U \cdot I - I^2 \cdot R_A$ donde R_A es la resistencia del amperímetro. Se la puede expresar por $P_R = (U - I \cdot R_A) \cdot I$; en este caso el error absoluto, o sea, la diferencia entre la potencia medida y la verdadera es:

$$\Delta P = P - P_R = U \cdot I - (U - I \cdot R_A)I = I^2 \cdot R_A$$

De esta ecuación se deduce que el error está originado por la potencia que disipa el amperímetro. El correspondiente error relativo es:

$$\delta_p \% = \frac{\Delta P}{P_R} = \frac{I^2 R_A}{(U - I R_A)I} = \frac{R_A}{(R - R_A) - R_A} = \frac{R_A}{R}$$

El error es inversamente proporcional a la resistencia del receptor y disminuye si se utilizan amperímetros de muy baja resistencia interna.

Comparando los errores de ambos modos de conexión se obtiene:

$$\frac{R}{R_v} = \frac{R_A}{R}; \quad R^2 = R_v \cdot R_A; \quad R = \sqrt{R_v \cdot R_A}$$

De este análisis se deduce que la conexión, según la figura III-1 A, es conveniente cuando $R < \sqrt{R_v \cdot R_A}$ y la conexión, según la figura III-1 B lo es cuando $R > \sqrt{R_v \cdot R_A}$.

En ambas conexiones, el valor de la potencia absorbida por el receptor R , medida y calculada a base de las indicaciones del voltímetro y del amperímetro, está afectado por un *error sistemático por exceso*. Con el esquema (A) la potencia calculada a base de las indicaciones de los instrumentos es $P = U \cdot I$. Sin embargo, de este valor hay que restar la potencia absorbida por el voltímetro $P_v = U \cdot I_v$ donde $I_v = \frac{U}{R_v}$ siendo R_v la resistencia del voltímetro. En consecuencia:

$$P_v = \frac{U^2}{R_v}$$

y la potencia realmente absorbida por el receptor R es:

$$P - P_v = P - \frac{U^2}{R_v} = U \cdot I - \frac{U^2}{R_v} \quad (\text{Esquema A})$$

Con el esquema (B) la potencia calculada a base de las indicaciones de los instrumentos es igualmente $P = U \cdot I$. Sin embargo, de este valor hay que restar la potencia absorbida por el amperímetro, $P_a = I^2 \cdot R_a$. La potencia realmente absorbida por el receptor R es:

$$P - P_a = P - I^2 \cdot R_a = U \cdot I - I^2 \cdot R_a \quad (\text{Esquema B})$$

donde R_a es la resistencia del amperímetro.

Cuando se trata de medir la potencia suministrada por la fuente, el *error sistemático es por defecto* en ambos esquemas. En consecuencia hay que sumar las respectivas potencias de los instrumentos:

$$P + P_v = P + \frac{U^2}{R_v} = U \cdot I + \frac{U^2}{R_v} \quad (\text{Esquema A})$$

$$P + P_a = P + I^2 \cdot R_a = U \cdot I + I^2 \cdot R_a \quad (\text{Esquema B})$$

En la práctica, con las potencias industriales y con el consumo mínimo de los instrumentos, los mencionados errores se suelen despreciar. Sin embargo, los errores se pueden hacer más despreciables en ambos casos utilizando en las mediciones de la potencia consumi-

da el esquema (A) cuando se trata de intensidad de corriente de valor notable y tensión pequeña y el esquema (B) en el caso inverso. En mediciones de la potencia suministrada se utiliza el esquema (A) para la tensión alta e intensidad pequeña y el esquema (B) en casos inversos.

Ejemplo (esquema A): Determinar la potencia absorbida por un receptor R alimentado en la instalación del automóvil por un generador marca FORD de 12 V.

Ejecución: Conectando el circuito según el esquema (A) se utilizarán los siguientes instrumentos:

- 1 Voltímetro magnetoeléctrico marca WESTON de alcances 7,5; 15 y 30 V. La resistencia del instrumento en el alcance a utilizar (15 V) es $R_v = 15000 \Omega$ (según las especificaciones del fabricante).
- 1 Amperímetro magnetoeléctrico marca PARKINGTON & CROMPTON con el shunt exterior para 15 A. La resistencia del instrumento sin el shunt es de 5Ω ; la resistencia del shunt es de $0,0051 \Omega$. En consecuencia la resistencia resultante del instrumento con el shunt se calcula:

$$\frac{1}{R_a} = \frac{1}{5} + \frac{1}{0,0051}; \quad R_a = 0,0050948 \Omega$$

Utilizando el esquema (A) para intensidad de corriente de valor apreciable y tensión baja se obtuvieron los resultados anotados en el cuadro de valores.

CUADRO DE VALORES

N.º	Medido	U	I	P_o	$\frac{U^2}{R_v}$	P correg.	Observaciones
		V	A	W	W	W	
1	Potencia absorbida por el receptor	12,1	3,2	38,72	0,0097	38,7103	$P = P_o - P_v$
2	Potencia suministrada por el generador	12,1	3,2	38,72	0,0097	38,7297	$P = P_o + P_v$

Como se puede apreciar en dicho cuadro, se utilizó el mismo esquema para determinar la potencia absorbida por el receptor y la potencia suministrada por el generador, restando o sumando la potencia consumida por el voltímetro, respectivamente.

Ejemplo (esquema B): Determinar la potencia de una lámpara incandescente de valores nominales: 15 W, 110 V. Alimentación con la red de corriente continua de 110 V.

Ejecución: Conectando el circuito según el esquema (B) se utilizaron los siguientes instrumentos:

- 1 Voltímetro electromagnético (ambas corrientes) y de alcances 150 y 300 V. Su resistencia en corriente continua (directa) en el alcance utilizado es $R_v = 1875 \Omega$. En el esquema B la muy baja resistencia del voltímetro no influye en la medición.
- 1 Miliamperímetro electromagnético marca AEG con dos alcances de medición 150 y 300 mA. Su resistencia en el alcance de 150 mA es $R_a = 2 \Omega$.

Con el cálculo previo $\left(\frac{P_{\text{nom}}}{I_{\text{nom}}} \right)$ se determina el alcance del amperímetro a utilizar que resulta (0 — 150 mA). Al conectar la lámpara a la red se obtuvieron los resultados anotados en el cuadro de valores.

CUADRO DE VALORES

N.º	Medido	U	I	P_o	$I^2 \cdot R_a$	P correg.	Observaciones
		V	A	W	W	W	
1	Potencia absorbida por el receptor	111	0,136	15,096	0,272	14,824	$P = P_o - P_v$
2	Potencia suministrada por la red	111	0,136	15,096	0,272	15,368	$P = P_o + P_v$

Mediciones de potencia de corriente alterna

El concepto de potencia en corriente alterna es más complicado que en corriente continua a causa de que la intensidad no está ordinariamente en fase con la tensión. El método voltiamperimétrico descrito para las mediciones de potencia de corriente continua se puede utilizar únicamente en los casos de una total seguridad de que no existe el desfase entre ambas magnitudes. De la representación vectorial de los componentes de la potencia en la corriente alterna sinusoidal se deducen hasta tres posibles expresiones de potencia (fig. III-2):

La potencia activa $P = U \cdot I \cdot \cos \phi$ que se mide en vatios (W).

La potencia aparente $S = U \cdot I$ que se mide en voltamperios (VA). La potencia reactiva $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ que se mide en voltamperios reactivos (VAr).

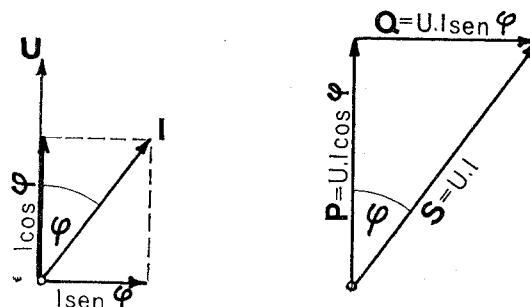


Figura III-2.

La primera expresión representa la verdadera potencia útil, o sea, la que efectúa el trabajo. La segunda, representada por el producto de la tensión por la intensidad, da un valor orientativo que indica cuál sería la potencia si no hubiera desfase. Por eso se la denomina *potencia aparente* y se la mide con métodos voltiamperimétricos. La potencia reactiva que está relacionada con las potencias activa y aparente se mide utilizando métodos o instrumentos especiales. Su determinación tiene gran importancia en el campo de venta de energía eléctrica y en la evaluación de la calidad de redes y receptores eléctricos. El método más sencillo para la determinación simultánea de los tres tipos de potencia es la medición de la tensión U , intensidad I y la potencia activa P . Conociendo los valores de estas tres magnitudes es fácil determinar los tres tipos de potencia y el ángulo de desfase φ . El $\cos \varphi$, denominado "factor de potencia", se puede medir con un instrumento especial (cofímetro) y calcular la potencia a base de la tensión tomada con un voltímetro y de la intensidad con un amperímetro. No obstante, se pueden utilizar voltímetros y amperímetros para determinar la potencia empleando los métodos que se explicarán más adelante. Sin embargo, el más común es el uso del vatímetro, el cual mide directamente la potencia activa $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$. El vatímetro y su método de utilización se han descrito ampliamente en el primer tomo de esta obra; en este capítulo se analizarán solamente los métodos de medición y de determinación de los parámetros de esta magnitud.

Potencia de corriente alterna monofásica

MÉTODO DE TRES AMPERÍMETROS

En ciertos casos se puede determinar la potencia de un receptor inductivo en la corriente alterna monofásica, utilizando solamente 3 amperímetros. La figura III-3 a muestra el esquema de conexión a utilizar. El método consiste en conectar en paralelo con el receptor P una resistencia no inductiva R de valor conocido, medir las tres intensidades I total, I_1 que circula por el receptor P e I_2 que circula por la resistencia R y calcular la potencia. Las tres intensidades (I , I_1 e I_2) se suman geométricamente (fig. III-3 b). Del análisis del diagrama vectorial se deduce:

$$\varphi = \alpha + \beta \quad ; \quad \gamma = 180^\circ - \varphi$$

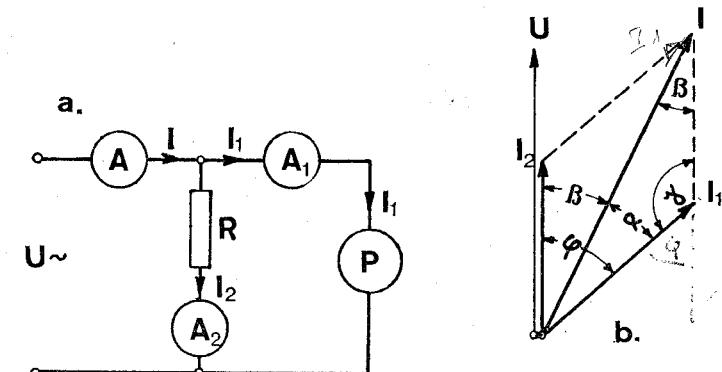


Figura III-3.

Resolviendo el triángulo:

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \gamma = I_1^2 + I_2^2 + 2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$$

de esto:

$$I_1 \cdot \cos \varphi = (I^2 - I_1^2 - I_2^2) \frac{1}{2 \cdot I_2}$$

siendo:

$$I_2 = \frac{U}{R}$$

y sustituyendo en la ecuación se obtiene:

$$I_1 \cdot \cos \varphi = (I^2 - I_1^2 - I_2^2) \cdot \frac{R}{2U}$$

de esto:

$$U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = (I^2 - I_1^2 - I_2^2) \cdot \frac{R}{2} = P$$

Para obtener valores lo más exactos posible es conveniente que la resistencia no inductiva R sea de valor comparable con el de la impedancia del receptor. También es conveniente utilizar un voltímetro (no aparece en el esquema), para verificar la tensión nominal del receptor. A base de las mediciones de las tres intensidades y de la tensión se pueden obtener con los cálculos subsiguientes las tres expresiones de potencia del receptor examinado en corriente alterna monofásica:

$$P = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi ; \quad Q = U \cdot I_1 \cdot \operatorname{sen} \varphi ; \quad S = U \cdot I_1$$

Ejemplo: Medir la potencia absorbida por el motor monofásico de las características siguientes: Marca LDC, Manchester; 60 Hz; 240 V; 4,0 A; 1720 r.p.m.

Ejecución: Empleando el método de tres amperímetros se monta el circuito según el esquema de la figura III-3, conectando además de los tres amperímetros, un voltímetro en los bornes del motor. Se utilizaron instrumentos portátiles marca SANGAMO-WESTON, clase 0,5; 3 amperímetros con escala 0—10 A y 1 voltímetro, 0—150—300 V (1875 Ω y 3750 Ω , respectivamente). Como resistencia conocida R se utilizó un reóstato de 95 Ω , 5 A.

La tensión disponible en la red es inferior a la nominal del motor y, por lo tanto, se le carga hasta el límite de deslizamiento (6 %), y las revoluciones se miden con un tacómetro: $n = 1680$ r.p.m. Los valores obtenidos (anotados en el cuadro) llevaron a los siguientes resultados: La potencia absorbida por el motor:

$$P = (5,65^2 - 3,8^2 - 2,4^2) \frac{95}{2} = 556 \text{ W}$$

CUADRO DE VALORES

Medido	U	R	I	I_1	I_2	P	S ($U \cdot I_1$)	$\cos \varphi$	Observaciones
	V	Ω	A	A	A	W	VA		
Motor LDC 0,5 HP	228	95	5,65	3,8	2,4	556	866,4	0,641	

La potencia aparente:

$$S = U \cdot I_1 = 226 \cdot 3,8 = 866,4 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{556}{866,4} = 0,641.$$

En el diagrama vectorial de la figura III-4 se puede comprobar que el ángulo de desfase entre la tensión de red U y la intensidad del motor I_1 , corresponde al calculado.

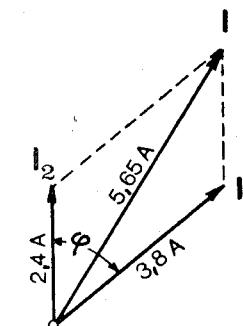


Figura III-4.

MÉTODO DE TRES VOLTÍMETROS

Un método similar al anterior, que permite determinar la potencia de un receptor sin uso del voltímetro, es el de 3 voltímetros. La figura III-5 muestra el principio. El receptor P cuya potencia se mide, se conecta en serie con una resistencia no inductiva R obteniendo de este modo las dos tensiones U_1 y U_2 cuya suma vectorial es el vector U de la tensión aplicada al circuito. El problema que presenta este método es la selección de la resistencia R de tal modo que la tensión U_1 que aparece entre los bornes del receptor tenga un valor igual a la tensión nominal del mismo; sin esta condición el método carece de sentido. Esta condición se obtiene utilizando una fuente de tensión regulable, por ejemplo, un autotransformador de relación variable y regulando la tensión de alimentación U . También la resistencia patrón R no inductiva debe ser selectiva. Al establecer el circuito con las tres tensiones U de la alimentación, U_1 sobre el receptor examinado y U_2 la caída de tensión sobre la resistencia no inductiva R , se puede utili-

zar la ecuación deducida del diagrama vectorial de las tensiones (fig. III-5 b):

$$\gamma = 180^\circ - \phi ; \quad \phi = \alpha + \beta$$

$$\cos(180^\circ - \phi) = -\cos \phi$$

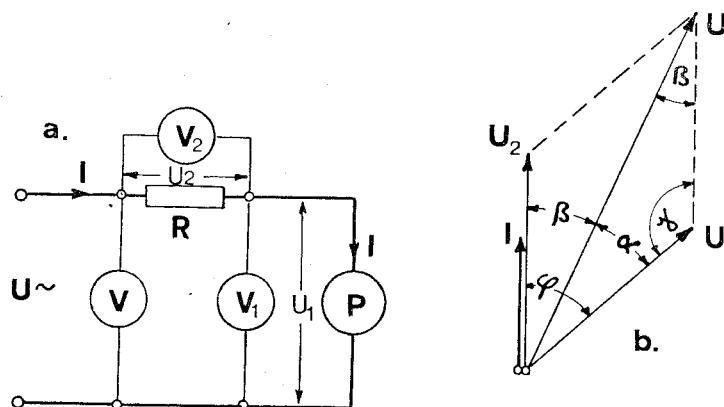


Figura III-5.

$$U^2 = U_1^2 + U_2^2 - 2 \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \gamma = U_1^2 + U_2^2 + 2 \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \phi$$

Siendo $U_2 = I \cdot R$ se sustituye en la ecuación y se obtiene:

$$U^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2 \cdot I \cdot R \cdot U_1 \cdot \cos \phi$$

y de esto

$$I \cdot U_1 \cdot \cos \phi = (U^2 - U_1^2 - U_2^2) \cdot \frac{1}{2R} = P$$

Para obtener valores exactos, la resistencia R debe tener un valor comparable con la impedancia del receptor P . Es conveniente utilizar el amperímetro (no figura en el esquema) para medir la intensidad. Lo mismo que en el método anterior, se pueden calcular las tres expresiones de potencia de corriente alterna, P , Q y S .

Ejemplo: Determinar la potencia disipada por una reactancia conectada en serie como reductora de tensión, con una resistencia de 30Ω . Sobre la resistencia debe actuar la tensión de 160 V aproximadamente, siendo la tensión de la red $U = 230 \text{ V}$.

Ejecución: Se utiliza el método de 3 voltímetros, según el esquema de la figura III-5; se conecta además el amperímetro de control que no figura en el esquema. Las características y marcas de los instrumentos son como en el ejemplo anterior. Los datos obtenidos y resultados calculados figuran en el cuadro de valores.

CUADRO DE VALORES

Medido	<i>I</i>	<i>R</i>	<i>U</i>	<i>U₁</i>	<i>U₂</i>	<i>P</i>	<i>S</i> (<i>U₁</i> · <i>I</i>)	$\cos \phi$	Observaciones
	A	Ω	V	V	V	W	VA		
Reactancia	5,35	30	229,5	148	160	86,116	791	0,108	

La potencia disipada:

$$P = (229,5^2 - 148^2 - 160^2) \cdot \frac{1}{2 \cdot 30} = 86,116 \text{ W}$$

La potencia aparente:

$$S = U_1 \cdot I = 791 \text{ VA}$$

El factor de potencia de la reactancia:

$$\frac{P}{S} = \frac{86,116}{791} = 0,108$$

Para la comprobación de los valores calculados es conveniente, utilizando un compás, construir el diagrama vectorial de las tres tensiones (U , U_1 y U_2) a escala (fig. III-6). El ángulo de desfase que corresponde al $\cos \phi = 0,1080$ es de $83^\circ 48'$, lo que verifica el diagrama.

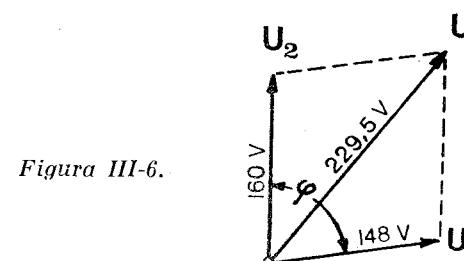


Figura III-6.

El instrumento que indica la potencia activa en unidades de potencia (vatios), sin necesidad de recurrir al cálculo, es el vatímetro

y, por lo tanto, es del uso más frecuente. Sobre los vatímetros y los varímetros (medidores de potencia reactiva), se ha incluido un extenso capítulo en el primer tomo de esta obra (Unidades, patrones e instrumentos). Debido a que el vatímetro indica la potencia activa ($P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$), se debe tener cuidado para no sobrepasar los límites del alcance de intensidad de este instrumento.

Ejemplo: Para medir la potencia activa de un receptor inductivo en una red de 220 V, 50 Hz se ha conectado un vatímetro utilizando su alcance de intensidad 0 — 10 A y su alcance de tensión 0 — 300 V, siendo su escala de 150 divisiones. Para estos alcances la constante de lectura del vatímetro es:

$$C = \frac{10 \text{ A} \cdot 300 \text{ V}}{150} = 20 \text{ W/}^{\circ} \text{ y el alcance máximo } 20 \cdot 150 = 3000 \text{ W}$$

El vatímetro acusó 110 divisiones, lo que corresponde al valor de la potencia activa: $P = 110 \cdot 20 = 2200 \text{ W}$.

Aparentemente todo está en orden con respecto al alcance de potencia del instrumento. Sin embargo, el receptor cuya potencia se está midiendo produce un desfase de 60° , o sea, el $\cos \varphi = 0,5$ y por lo tanto:

$$2200 \text{ W} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 220 \text{ V} \cdot 20 \text{ A} \cdot 0,5$$

De esto resulta que por falta de control se ha sobrepasado el alcance de intensidad del vatímetro en 100 %, lo que puede dañar el instrumento e incrementar sus errores.

De este ejemplo se deduce que *el vatímetro se debe utilizar siempre conjuntamente con el amperímetro y con el voltímetro*. La figura III-7 muestra la conexión del vatímetro en cuatro formas diferentes utilizadas indistintamente.

Para determinar la potencia monofásica *reactiva* se mide la potencia activa, $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ (W) y luego, utilizando los valores obtenidos de la medición de P , U e I , se calcula la potencia reactiva, $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ (VAr); $\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}$. Se puede medir la potencia reactiva directamente con un *varímetro*, instrumento descrito en el primer tomo de esta obra. En el vatímetro monofásico, el vector de la tensión está artificialmente desfasado 90° con respecto a la tensión de la red.

De igual modo que en las mediciones de potencia de c.c., se determina la potencia suministrada por una fuente (G) y la potencia requerida por un receptor. La figura III-8 a muestra la correcta conexión del vatímetro y del voltímetro para la medición de la potencia suministrada por la fuente (G) sin error en la medición de la tensión y la figura III-8 b para medición de la potencia absorbida por el receptor (R_p).

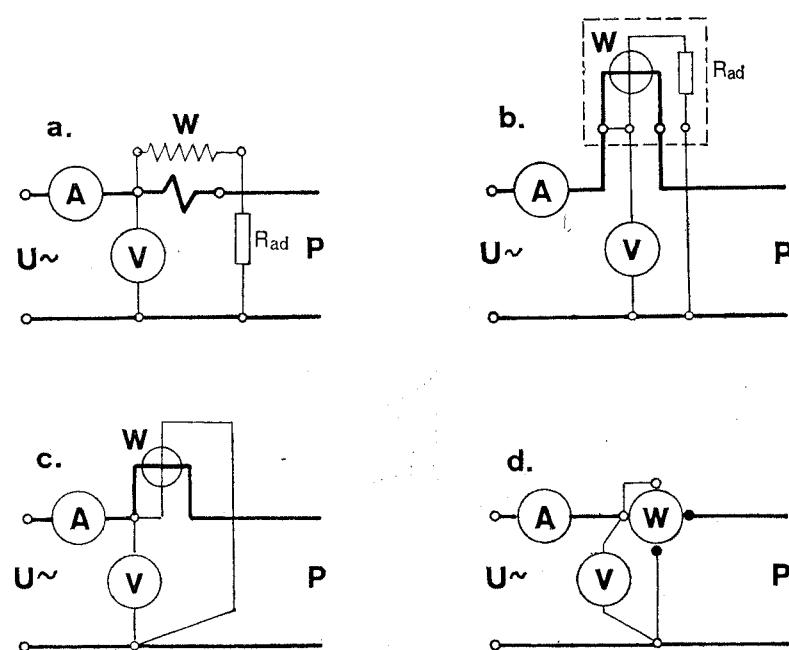


Figura III-7.

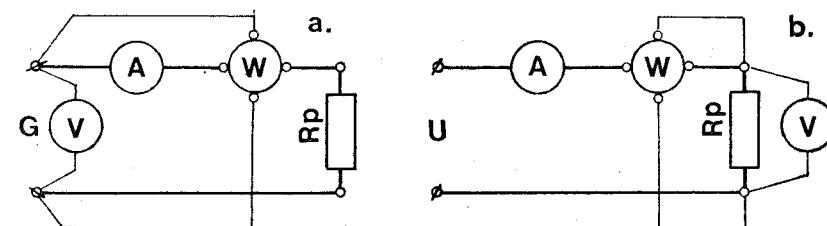


Figura III-8.

De la misma manera se puede analizar el circuito de intensidad. La figura III-9 a muestra la conexión de instrumentos para la medición de potencia del receptor (R_p), sin correcciones de la intensidad y la figura III-9 b muestra la correspondiente a la medición de la potencia del generador.

Es de suma importancia la elección del tipo del vatímetro no solamente por los alcances de tensión y de intensidad, sino también

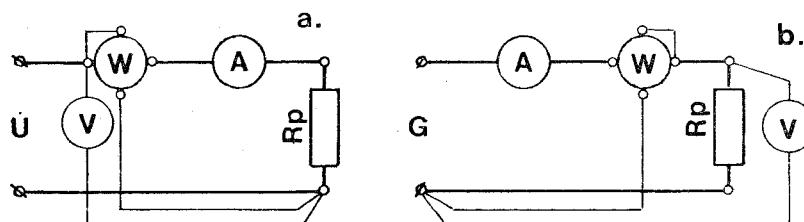


Figura III-9.

por el margen del $\cos \varphi$ previsto. Cuando el $\cos \varphi$ es de un valor muy pequeño ($\cos \varphi < 0,2$), las desviaciones de la aguja indicadora del vatímetro son también muy pequeñas (al principio de la escala), y en consecuencia los errores son considerables. En tales casos se utilizan vatímetros especialmente diseñados para los $\cos \varphi$ pequeños y esta característica figura en el cuadrante del instrumento (por ejemplo, "para $\cos \varphi = 0,1$ ").

Mediciones directas, semidirectas e indirectas

Las mediciones de potencia con el vatímetro se pueden dividir en mediciones directas, semidirectas e indirectas.

La medición *directa* comprende la conexión del vatímetro, del voltímetro y del amperímetro directamente al circuito, o sea, el voltímetro y la bobina de tensión se conectan directamente a la tensión de la red en la cual se mide la potencia y el amperímetro y la bobina de intensidad del vatímetro se intercalan en serie con el circuito (figuras III-7, III-8 y III-9). En este caso la lectura del vatímetro se multiplica por la constante correspondiente a los alcances utilizados del instrumento.

Ejemplo: Se utiliza el vatímetro en los alcances de 10 A y de 400 V. La escala del vatímetro es de 100 divisiones. La correspondiente constante de lectura es:

$$C_w = \frac{10 \text{ A} \cdot 400 \text{ V}}{100} = 40 \text{ W/}^{\circ}$$

La medición *semidirecta* de potencia comprende la conexión directa del voltímetro y de la bobina de tensión del vatímetro (en su alcance correspondiente) a la red, mientras el amperímetro y la bobina de intensidad del vatímetro en serie están conectados por intermedio de un

transformador de intensidad cuya relación corresponde a la intensidad de corriente prevista durante la medición (fig. III-10). Este procedimiento se usa cuando la intensidad de corriente prevista es mayor que el alcance del vatímetro o cuando la distancia entre el circuito controlado y los instrumentos es tan grande que la resistencia de los cables

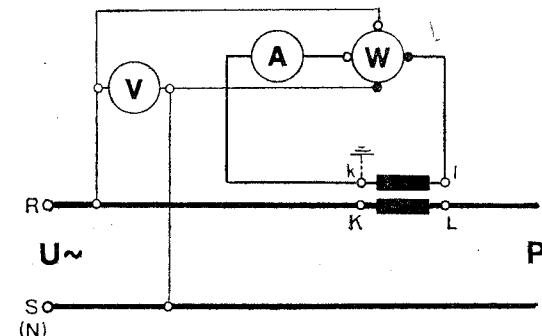


Figura III-10.

puede influir en la medición. Con transformadores de intensidad se utilizan los vatímetros con alcance de intensidad de 5 A y también los amperímetros de 0 — 5 A, debido a que los secundarios de los transformadores de intensidad están normalizados en 5 A (ver capítulo I, Transformadores de medición de intensidad). En este método la constante de escala del vatímetro C_w y las lecturas del amperímetro se multiplican por la relación de transformación del transformador K_1 .

Ejemplo: Se mide la potencia en corriente alterna monofásica utilizando en el circuito el transformador de intensidad 50/5 A. La tensión de la red es de 220 V. El vatímetro a utilizar es de 5 A, 300 V y su escala tiene 150 divisiones.

$$\text{Constante de escala del vatímetro: } C_w = \frac{5 \text{ A} \cdot 300 \text{ V}}{150} = 10 \text{ W/}^{\circ}$$

La relación de transformación del transformador es $50/5=10 = K_1$. En consecuencia, la constante de lectura del vatímetro será:

$$C_i = C_w \cdot K_1 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ W/}^{\circ}$$

El método *indirecto* es obligatorio cuando se mide potencia en los circuitos de alta tensión aunque se trate de intensidades pequeñas, para separar eléctricamente el circuito controlado del circuito de medida.

ción (fig. III-11). En este método, tanto el voltímetro como la bobina de tensión del vatímetro se conectan a la red por intermedio de transformadores de tensión cuyo primario corresponde a la tensión de la red medida. La tensión secundaria es 100 V en transformadores de tensión normalizada (en USA utilizan todavía las tensiones de 110

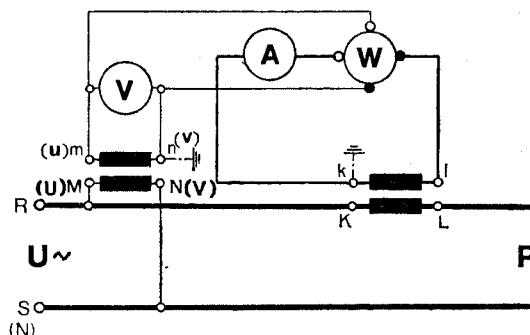


Figura III-11.

y de 120 V). Igualmente, se debe separar eléctricamente el circuito de intensidad que comprende la bobina de intensidad del vatímetro y el amperímetro, ambos conectados en serie al secundario del transformador de intensidad cuyo aislamiento corresponde a la tensión de la red. Siendo las intensidades secundarias normalizadas de los transformadores de intensidad de 5 A, el vatímetro debe tener el alcance de corriente de 5 A y el de tensión de 100 V. El amperímetro y el voltímetro tienen alcances de 5 A y de 100 V respectivamente.

Ejemplo: Se mide la potencia en la red de 4160 V. Se utilizarán los siguientes instrumentos:

El transformador de tensión 5000/100 V.

El transformador de intensidad 10/5 A, tensión de trabajo 5000 V.

El vatímetro de 5 A y de 100 V, con 100 divisiones de escala.

El voltímetro electromagnético 0-100 V.

El amperímetro electromagnético 0-5 A.

La constante del vatímetro es

$$C_w = \frac{5 \text{ A} \cdot 100 \text{ V}}{100^{\circ}} = 5 \text{ W}^{\circ}$$

La relación del transformador de tensión es

$$K_u = \frac{5000}{100} = 50$$

La relación del transformador de intensidad

$$K_i = \frac{10}{5} = 2$$

La constante de lectura del vatímetro es:

$$C = C_w \cdot K_u \cdot K_i = 5 \cdot 50 \cdot 2 = 500 \text{ W}^{\circ}$$

A veces, la intensidad de corriente en la red de alta tensión, en la cual se mide la potencia, es pequeña; pero por ser imprescindible la separación eléctrica entre los instrumentos y la red, se utilizan los transformadores de intensidad cuyo secundario es de 1 A; también, en tales casos, se utilizan transformadores de relación 0,5/5; 5/5, etc.

Los ejemplos de mediciones de potencia monofásica citados a continuación tienen por tema la determinación del rendimiento. Como es sabido, el rendimiento se calcula por la relación entre la potencia útil y la potencia suministrada:

$$\eta \% = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{sumin.}}} \cdot 100$$

En consecuencia, los ejemplos elegidos ejemplifican las mediciones de estas potencias por medio del vatímetro.

Ejemplo: Determinar el rendimiento de un transformador monofásico marca GENERAL ELECTRIC 240/120 V; 1,5 kVA.

Método: se miden las potencias de entrada y de salida P_1 y P_2 respectivamente. El circuito empleado es el de la figura III-12 como

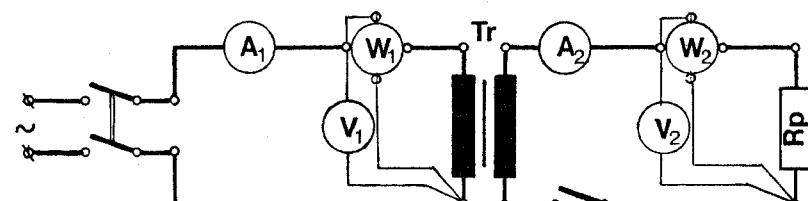


Figura III-12.

base, pero en caso de necesidad se utilizará un transformador de intensidad (fig. III-13).

Instrumentos escogidos:

V_1 = Voltímetro marca H & B, clase 0,5; 150-300-600 V.

A_1 = Amperímetro NORMA, clase 0,5; 0,8; 0,6; 1,2; 6; 12; 30; 60 A.

W_1 = Vatímetro AEG, clase 0,5; 30; 90; 150; 300 V y 5; 10 A. 150 divisiones de escala.

V_2 = Igual que V_1 .

A_2 = Amperímetro CROMPTON & PARKINSON, clase 0,5, 1-5 A.

W_2 = Vatímetro AEG, clase 0,5, 30-75-150 V y 5 A, 150 divisiones de escala. Transformador de intensidad AEG, clase 0,5; 15-50/5.

Se utilizó la carga de característica mixta (R , L). En el circuito secundario se ha empleado el transformador de intensidad, lo que implicó la multiplicación de las lecturas del amperímetro A_2 y del vatímetro W_2 por la relación de transformación K_i . De esto resulta la constante de lectura del vatímetro W_2 : $C_l = \frac{5 \text{ A} \cdot 150 \text{ V}}{150 \text{ div}} \cdot 3 = 15 \text{ W}/\%$.

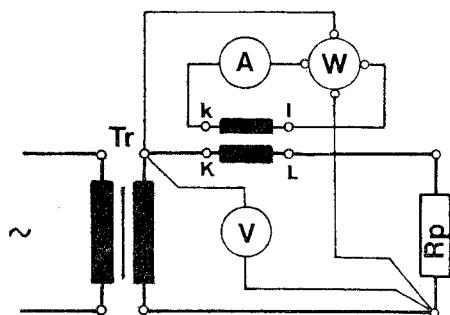


Figura III-13.

Para determinar el rendimiento del transformador se mide la potencia suministrada P_1 y la potencia útil P_2 . En el presente ejemplo se mide la potencia P_1 con el método directo y la potencia P_2 con el método semidirecto, o sea, la intensidad de corriente se mide utilizando un transformador de intensidad.

Para calcular el factor de potencia se utiliza la fórmula $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ donde "S" es la potencia aparente cuyo valor se obtiene del producto de las lecturas del voltímetro y del amperímetro.

En el presente ejemplo la potencia útil se obtiene también por el

vatímetro, pero siendo el método semidirecto, se deben multiplicar las lecturas de este instrumento por la relación de transformación del transformador de intensidad K_i . La misma multiplicación hay que aplicar para calcular la potencia aparente S_e .

El rendimiento es la relación entre la potencia útil (medida con el vatímetro W_2) y la potencia suministrada (medida con el vatímetro W_1).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (\%)$$

CUADRO DE VALORES

N. ^o	U_1	I_1	P_1		$U_1 \cdot I_1$	$\cos \varphi_1$	U_2	K_i
			V	A				
1	230	5,4	43	20	860	0,69	110	3
2	232	3,5	68	10	680	0,83	112	3

I_2	P_2		$U_2 \cdot I_2$	$\cos \varphi_2$	$\frac{P_2}{P_1} \cdot 100$	Observaciones
	A	α	W	VA	%	
10,5	54	$C_l = 15$	810	1155	0,70	94
5,85	34		510	655,2	0,78	75

Ejemplo: Determinar el rendimiento (η %) de un motor monofásico marca LDC de las siguientes características nominales: 240 V; 60 Hz; 0,5 A; 1720 r.p.m.; 0,5 HP.

Procedimiento. El rendimiento se expresa por la relación entre la potencia útil (P_2) y la potencia suministrada (P_1). En el caso de un motor eléctrico la potencia suministrada (P_1) proviene de la fuente de energía eléctrica y la potencia útil (P_2) es mecánica y se denomina "potencia al freno".

En consecuencia la potencia P_1 se mide con instrumentos eléctricos (vatímetro, amperímetro y voltímetro) y la potencia útil P_2 se

calcula a base de varios parámetros que dependen del tipo de freno que se utilice para esta finalidad.

La figura III-14 es el esquema de conexiones de los instrumentos que se utilizarán para la medición de la potencia P_1 de un motor monofásico. Como se puede apreciar en el esquema, se utiliza un interruptor

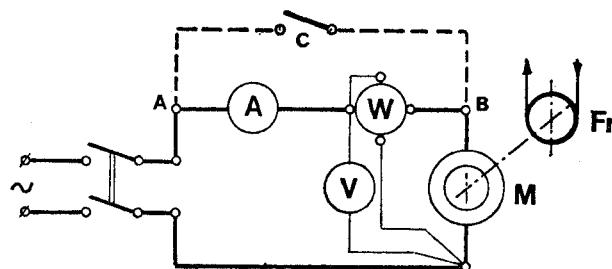


Figura III-14.

"C" el cual cortocircuita, durante el arranque del motor, el amperímetro y la bobina de intensidad del vatímetro para su protección contra esta sobrecarga. Una vez arrancado el motor y estabilizada la intensidad de corriente del motor, se le abre para efectuar las mediciones.

La potencia útil P_2 (mecánica) se calcula a base de varios parámetros: la fuerza F (kg) medida con un dinamómetro, el brazo l (m) y las revoluciones por minuto r.p.m. En el presente ejemplo se utilizó un freno de cinta, de lo cual se deduce:

El par motor o momento de torsión (torque): $M = F \cdot l$ (kgm) F en kg y l en m.

La potencia mecánica $P_2 = M \cdot n$ donde n son las r.p.m.

$$P_2 = M \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n \text{ (kgm/s)} = 0,1047 \cdot M \cdot n \approx 0,105 \cdot M \cdot n \text{ kgm/s}$$

siendo $1 \text{ kgm/s} = 9,81 \cdot 10^7 \frac{\text{erg}}{\text{s}} = 9,81 \text{ W}$.

La potencia P_2 expresada en vatios: $P_2 = 0,105 \cdot M \cdot n \cdot 9,81 = 1,03 \cdot M \cdot n$ y la potencia P_2 expresada en CV es

$$P_2 = \frac{1,03 \cdot M \cdot n}{736}$$

(1 CV = 736 vatios).

Los valores anotados en el cuadro de valores fueron obtenidos de la siguiente manera:

CUADRO DE VALORES

N. ^o	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>U · I</i>	<i>P₁</i>		$\cos \phi$
	V	A	VA	α	W	
1	228	4,5	1026	34	680	0,66

<i>F</i>	<i>l</i>	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>P₂</i>	<i>P₂</i>	Observaciones				
				kg	m	kgm	r.p.m.	W	CV	
1,135	0,23	0,261	1620	435	0,59	0,591	C _w = 20			

La potencia aparente $S_1 = U \cdot I(\text{VA})$ de las lecturas del voltímetro y del amperímetro. La potencia activa de la lectura del vatímetro.

$$\cos \phi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{680}{1026} = 0,66$$

La potencia al freno P_2 se ha calculado:

$$M = F \cdot l = 1,135 \cdot 0,23 = 0,26105 \text{ kgm}$$

$$P_2 = M \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n = 0,105 \cdot 0,26105 \cdot 1620 \cdot 9,81 =$$

$$= 1,03 \cdot 0,261 \cdot 1620 = 435 \text{ W}$$

$$P_2 = \frac{435}{736} = 0,591 \text{ CV} = 0,582 \text{ HP}$$

El rendimiento del motor:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 (\%) = \frac{435}{680} \cdot 100 = 63,97 \%$$

Potencia de corriente alterna trifásica

Método de tres vatímetros

El sistema trifásico es una combinación de tres sistemas monofásicos cuyas tensiones están desfasadas 120° en el tiempo. En consecuencia, la potencia suministrada por una fuente trifásica o absorbida por un receptor trifásico es igual a la suma de las potencias suministradas o absorbidas por cada una de las fases de la fuente o del recep-

tor respectivamente. No influye en la medición de la potencia trifásica si la fuente o el receptor están constituidos por tres elementos monofásicos o si forman una unidad trifásica.

El valor instantáneo de la potencia en una red trifásica, con un conductor neutro se expresa:

$$p = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T$$

donde u_R , u_S , u_T son los valores instantáneos de las tensiones de cada fase e i_R , i_S , i_T son los valores instantáneos de las intensidades en los conductores.

El valor eficaz de la potencia total se obtiene integrando los valores instantáneos en un ciclo.

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T (u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T u_R i_R dt + \frac{1}{T} \int_0^T u_S i_S dt + \frac{1}{T} \int_0^T u_T i_T dt = \\ &= U_R I_R \cos \varphi_R \pm U_S I_S \cos \varphi_S + U_T I_T \cos \varphi_T \end{aligned}$$

Las indicaciones del vatímetro conectado en el circuito de c.a. dependen del valor eficaz de la potencia (ver primer tomo); por lo tanto, para medir la potencia en la red trifásica de 4 conductores (3 fases y

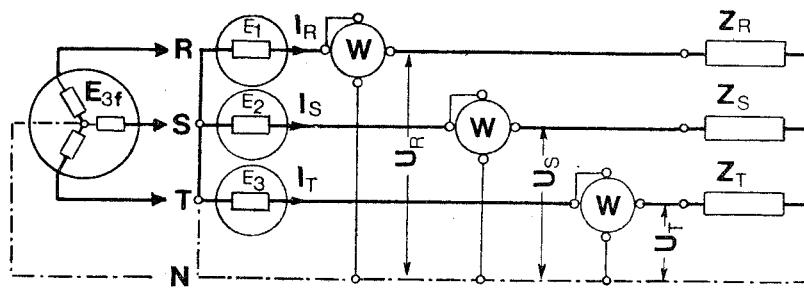


Figura III-15.

el neutro), es imprescindible utilizar 3 vatímetros monofásicos cuyas indicaciones se suman para obtener el valor total de la potencia trifásica (fig. III-15). En lugar de tres vatímetros se puede utilizar uno, pero provisto de tres sistemas motor que actúan sobre el mismo eje al

cual está fijada una sola aguja indicadora que acusa directamente la suma de las tres potencias monofásicas. En resumen, la potencia trifásica puede ser expresada:

$$P_{act} = P_R + P_S + P_T$$

donde P_R , P_S y P_T representan los valores de potencia medidos individualmente en cada una de las fases por sus respectivos vatímetros.

La potencia absorbida por un receptor trifásico es igual a la suma de las potencias absorbidas por cada una de las fases del receptor.

Cuando sucede un caso de simetría en la alimentación:

$$U_R = U_S = U_T = U_f$$

o sea, las tensiones de fase (sencillas) son iguales. Cuando también existe el equilibrio en el receptor, las intensidades de línea son iguales:

$$I_R = I_S = I_T = I_l$$

y si además los ángulos de desfase (entre los vectores de tensión y de intensidad) son iguales:

$$\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T = \varphi$$

(fig. III-16), la fórmula anterior se transforma en la siguiente:

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_l \cdot \cos \varphi$$

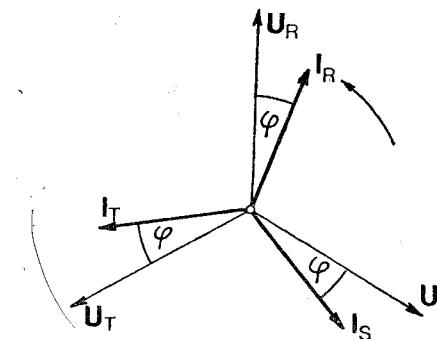


Figura III-16.

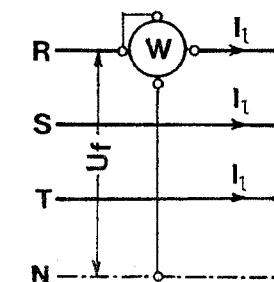


Figura III-17.

En consecuencia, para la medición de la potencia trifásica en un sistema equilibrado y simétrico, se puede utilizar un solo vatímetro (fig. III-17). Lógicamente este método se puede aplicar cuando se dis-

pone de la red trifásica de 4 conductores (tres fases y el neutro). En resumen esta fórmula simplificada es válida para cualquier sistema trifásico de tres o cuatro conductores, siempre y cuando se tenga acceso al punto neutro del sistema por medio del conductor neutro (N) o se pueda alcanzar el punto neutro de la estrella del receptor (figura III-18). Cuando la medición se efectúa utilizando los transformadores de medición (esquemas de las figuras III-10 y III-11), se multiplican los resultados por las respectivas relaciones de transformación K_i y K_u .

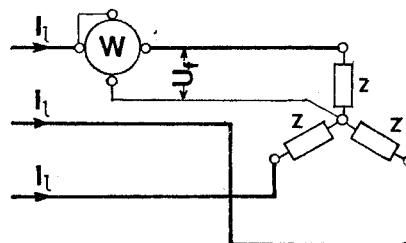


Figura III-18.

Con transformadores de intensidad:

$$P_{3f} = 3 \cdot U_f \cdot I_l \cdot K_i \cdot \cos \varphi$$

Con transformadores de intensidad y de tensión:

$$P_{3f} = 3 \cdot U_f \cdot K_u \cdot I_l \cdot K_i \cdot \cos \varphi$$

En el sistema trifásico de 3 conductores, sin acceso al neutro del receptor, se puede emplear el método descrito ($P_{3f} = P_R + P_S + P_T$ o $P_{3f} = 3 \cdot P_f$, simetría y equilibrio), utilizando las conexiones según los esquemas de las figuras III-17 y III-18 respectivamente.

Método de 3 vatímetros. Neutro artificial

En la figura III-19 se puede apreciar la conexión de los tres vatímetros a una red trifásica de tres conductores que permite medir la potencia trifásica cuando el sistema es desequilibrado y asimétrico. Este sistema de la red permite utilizar únicamente las tensiones compuestas U_{RT} , U_{ST} y U_{RS} , por no existir un conductor neutro. Sin embargo, conectando los extremos de las bobinas de tensión de los vatí-

metros en la forma indicada en la figura III-19, o sea en estrella, se obtiene el punto neutro artificial que permite conectar los vatímetros a las tensiones de fase U_f . Lógicamente, los tres vatímetros deben tener las características exactamente iguales (R y L).

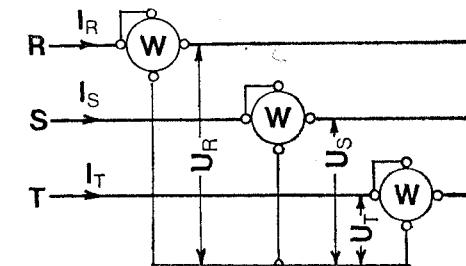


Figura III-19.

En casos especiales, o sea cuando existe simetría en la alimentación y equilibrio en el receptor, se pueden efectuar mediciones utilizando un solo vatímetro calculando luego la potencia por la fórmula $P_{3f} = 3 \cdot P_f$, formando para este fin un neutro artificial (fig. III-20). Este punto neutro artificial se consigue conectando en estrella 3 resistencias iguales, de las cuales una está formada por la resistencia del circuito de tensión del vatímetro (R_w).

$$R_w = R_S = R_T$$

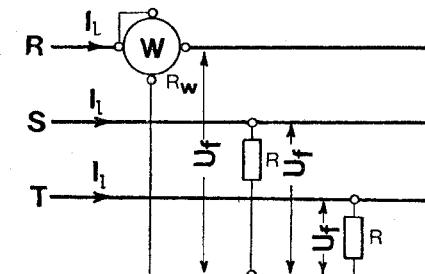


Figura III-20.

donde R_w es la resistencia del circuito de tensión del vatímetro y R_S y R_T son las resistencias conectadas a las fases respectivas.

Método Aron de 2 vatímetros

El método más frecuentemente utilizado para mediciones de potencia en el sistema trifásico de 3 conductores (sin neutro) es el de dos vatímetros, también denominado "método Aron". Para una comprensión más fácil de este método se pueden imaginar dos circuitos separados (fig. III-21 a) en los cuales los receptores R_{p1} y R_{p2} reciben su potencia de dos generadores G_1 y G_2 respectivamente. Para determinar la potencia total de ambos circuitos es suficiente colocar un vatímetro en cada uno de los dos circuitos y luego obtener el valor de la

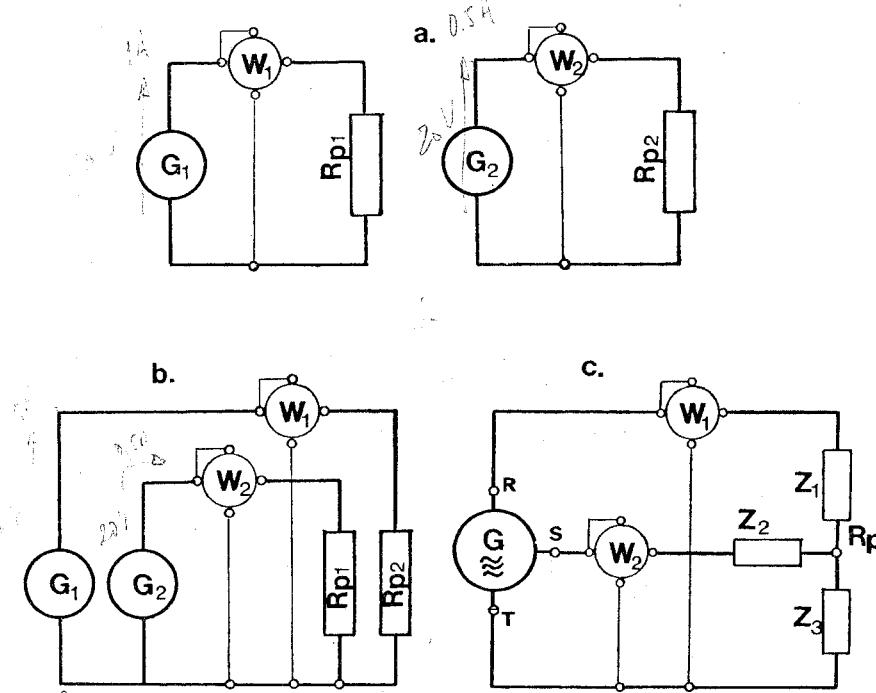


Figura III-21.

potencia total sumando sus indicaciones: $P_{\text{tot}} = P_1 + P_2$. Siguiendo esta lógica se puede sustituir los conductores de retorno con un solo conductor (fig. III-21 b), por lo cual no cambiará nada en el conjunto. Esto será válido en el caso de que uno de los generadores sea de c.c. y el otro de c.a. y también cuando sean los dos generadores iguales

o haya un solo generador trifásico (fig. III-21 c). Se puede apreciar en esta figura que los dos vatímetros miden la potencia total del receptor o del generador.

Este método reporta varias ventajas. En primer lugar resulta mucho más fácil efectuar lecturas simultáneas de dos vatímetros que de tres. También resulta más económico el uso de sólo dos vatímetros. Además, como se podrá apreciar a continuación, este método facilita mucho el análisis del circuito cuya potencia se mide.

La diferencia básica se puede apreciar al comparar la conexión de 3 vatímetros en el método anteriormente descrito (fig. III-15), con la conexión de 2 vatímetros en el método Aron (fig. III-21). Aparentemente existen tres variantes de la conexión de dos vatímetros. Sin embargo, al analizar los tres esquemas a, b y c, se llega a la conclusión que son idénticos. La diferencia real entre el método de 3 vatímetros y el de 2 vatímetros radica en las tensiones aplicadas a los circuitos de tensión de los vatímetros. En el método de 3 vatímetros, éstos están conectados a las respectivas tensiones de fase (*sencillas*) U_R , U_S y U_T , y en el método de 2 vatímetros se utilizan las tensiones compuestas; en el esquema a de la figura 22, las tensiones U_{RT} y U_{ST} :

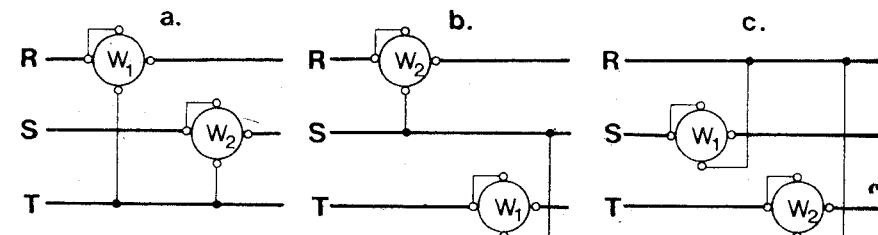


Figura III-22.

en el esquema b, U_{RS} y U_{TS} y en el esquema c, U_{SR} y U_{TR} . Las tensiones compuestas están desfasadas con respecto a las tensiones de fase en 30° . De esta particularidad resulta que el ángulo entre el vector de la tensión de fase y el vector de la intensidad de línea correspondiente se suma o resta del ángulo de 30° que existe entre la tensión de fase y la tensión compuesta. Al analizar el diagrama vectorial (fig. III-23), correspondiente al esquema a de la figura III-22, se puede deducir que en el primer vatímetro $\hat{U}_{RT}I_R = 30^\circ - \varphi$ y en el segundo vatímetro $\hat{U}_{ST}I_S = 30^\circ + \varphi$ cuando $\varphi < 30^\circ$. Cuando $\varphi > 30^\circ \rightarrow \hat{U}_{RT}I_R = \varphi - 30^\circ$.

$$\cos(30 - \varphi) = \cos(\varphi - 30)$$

El diagrama de la figura III-23 está construido para un ejemplo de un receptor trifásico equilibrado y de alimentación simétrica. En este caso:

$$U_R = U_S = U_T = U_f \quad (\text{de fase}); \quad I_R = I_S = I_T = I \quad (\text{de línea})$$

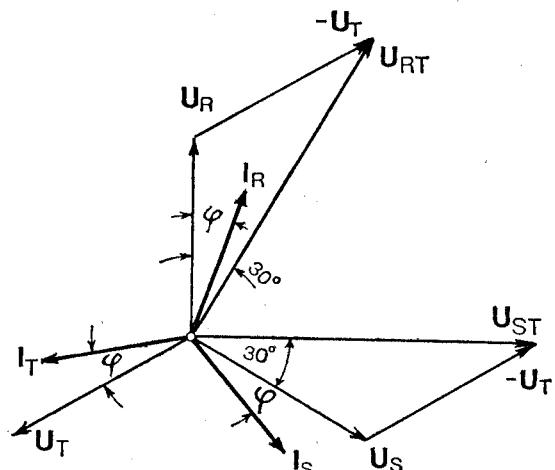


Figura III-23.

La potencia instantánea de la carga es:

$$p = u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T$$

donde u_R , u_S y u_T son los valores instantáneos de las tensiones de fase e i_R , i_S e i_T son los valores instantáneos de las respectivas intensidades de línea.

Siendo

$$i_R + i_S + i_T = 0 \quad \text{y por tanto} \quad i_S = -i_R - i_T$$

y sustituyendo i_S en la ecuación de potencia se obtiene:

$$p = u_R i_R + u_S (-i_R - i_T) + u_T i_T = i_R (u_R - u_T) + i_S (u_S - u_T)$$

también:

$$u_R - u_T = u_{RT} \quad \text{y} \quad u_S - u_T = u_{ST}$$

de esto resulta:

$$p = u_{RT} i_R + u_{ST} i_S$$

De esta ecuación se deduce que se puede medir la potencia del sistema trifásico utilizando solamente dos vatímetros. El primer vatímetro indica la potencia eficaz, $P_1 = I_R U_{RT} \cos(30^\circ - \varphi)$ y el segundo vatímetro indica la potencia eficaz, $P_2 = I_S U_{ST} \cos(30^\circ + \varphi)$, siendo la potencia total del sistema:

$$P_{\text{tot}} = P_1 + P_2$$

Como es sabido, la tensión compuesta es igual a $U_f \sqrt{3}$.

Cuando todas las tensiones de fase y todas las intensidades de línea son iguales, la suma de las indicaciones de ambos vatímetros es:

$$I \cdot U_f \cos(30^\circ - \varphi) \sqrt{3} + I \cdot U_f \cos(30^\circ + \varphi) \sqrt{3} = 3 \cdot I \cdot U_f \cos \varphi$$

En consecuencia el resultado es el mismo que se obtiene con el método de tres vatímetros.

Se debe prestar atención a la conexión de los circuitos de tensión de ambos vatímetros; el principio de la bobina de tensión debe estar conectada a la misma fase en la cual está intercalada la bobina de intensidad y el final a la fase "libre" (fig. III-22). Como se verá a continuación, tiene importancia el determinar cuál de los dos vatímetros es el primero (1) y cuál es el segundo (2). Como es sabido, la secuencia de fases es R-S-T-R-S-T. Al conectar los vatímetros según el esquema de la figura III-22 a, los vatímetros aparecerán en las fases subrayadas:

$$\begin{array}{ccccccc} R & - & S & - & T & - & R & - & S & - & T \\ \overline{1} & & \overline{2} & & & \overline{1} & & & \overline{2} & & \end{array}$$

En este caso el vatímetro n.º 1 es de la fase R y el vatímetro n.º 2 es de la fase S. Conectando los vatímetros según el esquema de la figura III-22 b, éstos aparecerán en las fases subrayadas:

$$\begin{array}{ccccccc} R & - & S & - & T & - & R & - & S & - & T \\ & \overline{1} & & \overline{2} & & & & & & & \end{array}$$

En consecuencia el vatímetro n.º 1 es de la fase T y el vatímetro n.º 2 es de la fase R. En el tercer caso, o sea, de la figura III-22 c, el vatímetro n.º 1 es de la fase S y el vatímetro n.º 2 es de la fase T.

$$\begin{array}{ccccccc} R & - & S & - & T & - & R & - & S & - & T \\ & \overline{1} & & \overline{2} & & & & & & & \end{array}$$

Para un análisis más detallado del método de dos vatímetros, a continuación se consideran 4 casos en los cuales el receptor origina diferentes desfases: 1. $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$; 2. $\varphi = 30^\circ$, $\cos \varphi = 0,866$; 3. $\varphi = 60^\circ$, $\cos \varphi = 0,5$; y 4. $\varphi = 90^\circ$, $\cos \varphi = 0$. Para este ejemplo se seleccionó la conexión según el esquema de la figura III-22 a, o sea, cuando el vatímetro n.º 1 es de la fase R y el vatímetro n.º 2 es de la fase S . Se supone que la alimentación es simétrica y el receptor está equilibrado. Las tensiones compuestas a las cuales están conectadas las bobinas de tensión de los vatímetros son U_{RT} y U_{ST} respectivamente.

EL ÁNGULO φ ENTRE LA TENSIÓN DE FASE Y LA INTENSIDAD DE LÍNEA ES IGUAL A CERO (FIG. III-24 a).

Como se puede apreciar en el diagrama vectorial, el ángulo de desfase es igual a cero, lo que significa que el receptor es puramente resistivo. Sin embargo, debido a que los vatímetros están conectados a las tensiones compuestas U_{RT} y U_{ST} respectivamente, aparecen las siguientes relaciones.

El vatímetro n.º 1 indica la potencia:

$$P_1 = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos 30$$

El vatímetro n.º 2 indica la potencia:

$$P_2 = U_{ST} \cdot I_S \cdot \cos 30$$

La carga es equilibrada y la alimentación es simétrica, por lo tanto:

$$I_R = I_S = I_T = I_l \quad (\text{de línea}) \quad \text{y} \quad U_{RT} = U_{ST} = U_{\text{comp}}$$

$$\cos \varphi = \cos 30 = 0,866 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$P_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{\text{comp}} I_l ; \quad P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{\text{comp}} I_l$$

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 = \sqrt{3} \cdot U_{\text{comp}} I_l$$

De esto resulta que las indicaciones de ambos vatímetros son iguales, (fig. III-24 b).

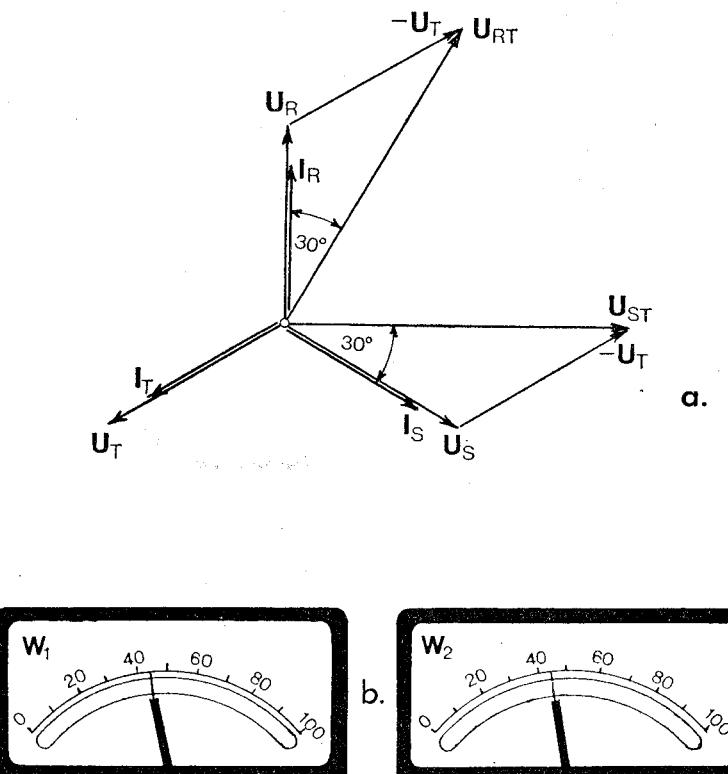


Figura III-24.

Cuando ambos vatímetros acusan las desviaciones iguales significa que el factor de potencia del receptor $\cos \varphi$ es 1 y la carga es puramente resistiva.

EL ÁNGULO $\varphi = 30^\circ$ (FIG. III-25 a)

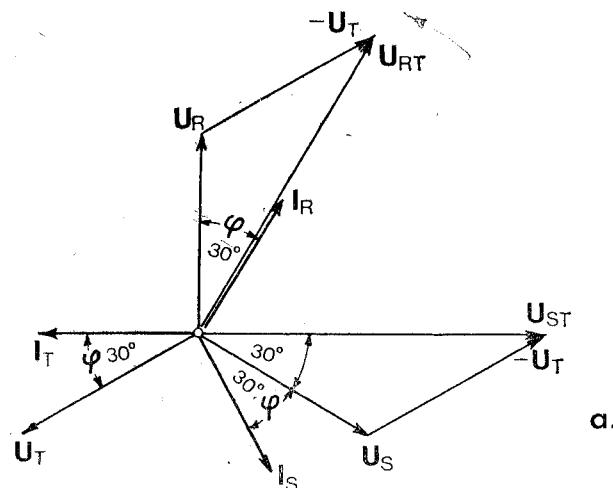
Del diagrama vectorial se deduce que entre la intensidad I_R que circula por el vatímetro y la tensión compuesta a la cual está conectada la bobina de tensión del vatímetro n.º 1 no existe desfase. Este vatímetro acusará:

$$P_1 = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos 0 = U_{RT} \cdot I_R \cdot 1$$

En cambio, en el vatímetro n.^o 2 aparece un desfase de 60° entre la intensidad I_S y la tensión U_{ST} y, por tanto, este instrumento acusará el valor:

$$P_2 = U_{ST} \cdot I_S \cdot \cos 60 = U_{ST} \cdot I_S \cdot 0,5$$

De esto se deduce que el vatímetro n.^o 2 indica la mitad del valor de la potencia acusada por el vatímetro n.^o 1 (fig. III-25 b) y que la carga es inductiva. La potencia total es $P_{\text{tot}} = P_1 + P_2$.



a.

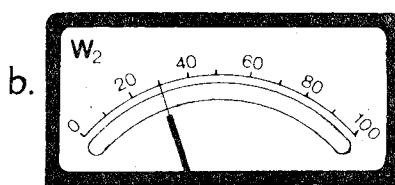
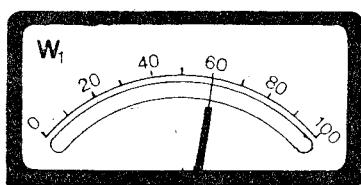
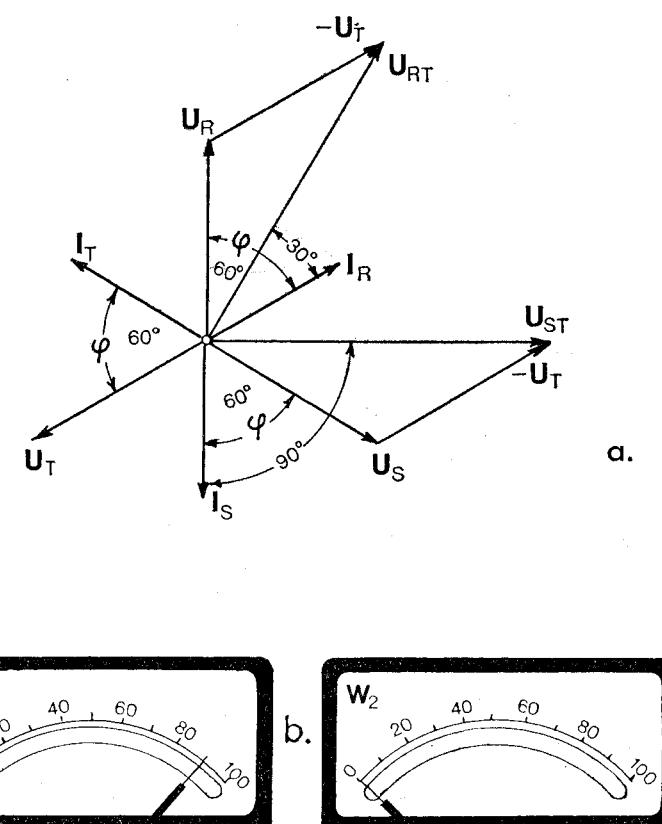


Figura III-25.

EL ÁNGULO $\phi = 60^\circ$ (FIG. III-26 a)

El caso en que el desfase entre la corriente y la tensión de fase del receptor alcanza el valor de 60° está representado en el diagrama



b.

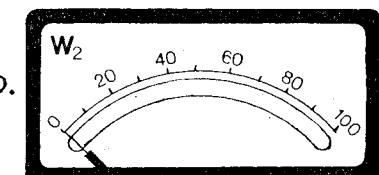
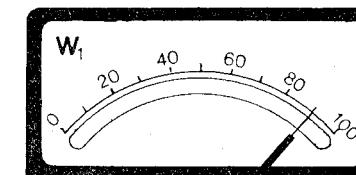


Figura III-26.

vectorial. En el vatímetro n.^o 1 aparece el desfase inductivo de 30° y siendo el $\cos 30 = 0,866 = \frac{\sqrt{3}}{2}$, la potencia acusada por este vatímetro es:

$$P_1 = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos 30 = 0,866 \cdot U_{RT} \cdot I_R$$

El vatímetro n.^o 2 indicará la potencia:

$$P_2 = U_{ST} \cdot I_S \cdot \cos 90 = 0$$

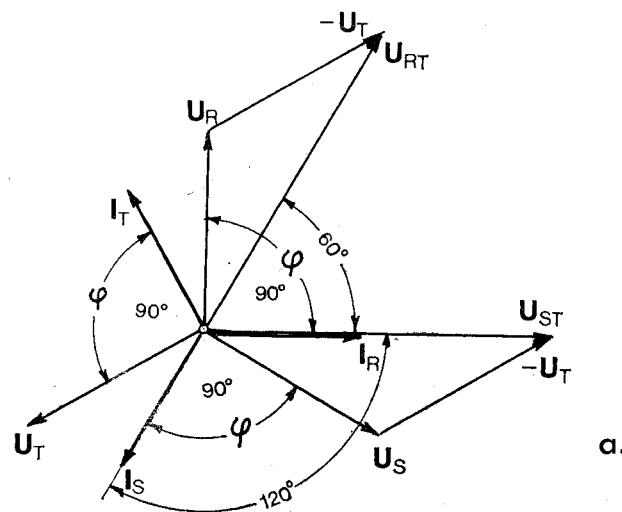
El vatímetro n.^o 1, acusa la totalidad de la potencia mientras el vatímetro n.^o 2 indica cero.

$$P_{\text{tot}} = P_1 + P_2 \quad ; \quad P_2 = 0 \quad ; \quad P_{\text{tot}} = P_1$$

De estos dos últimos ejemplos se pueden sacar las siguientes conclusiones: *Cuando el vatímetro n.^o 2 indica valor inferior al indicado por el vatímetro n.^o 1, la carga es inductiva y cuando el vatímetro n.^o 2 acusa cero, mientras el vatímetro n.^o 1 acusa la totalidad de la carga, ésta es inductiva y su $\cos \varphi = 0,5$.* En los casos de carga capacitiva se invierten las indicaciones de los vatímetros.

EL ÁNGULO $\varphi = 90^\circ$ (FIG. III-27 a)

Se considera un receptor puramente inductivo ($\varphi = 90^\circ$; $\cos \varphi = 0$). Del diagrama resulta que entre la intensidad de corriente de línea



a.

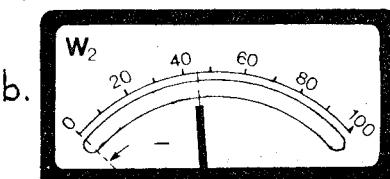
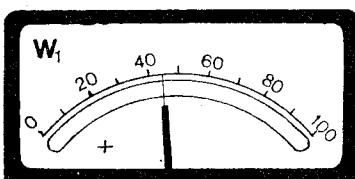


Figura III-27.

y la tensión compuesta a la cual está conectado el vatímetro, existe un desfase de 60° . En consecuencia la potencia indicada por el vatímetro n.^o 1 será:

$$P_1 = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos 60 = 0,5 \cdot U_{RT} \cdot I_R$$

En el vatímetro n.^o 2 aparece un desfase de 120° .

$$\cos 120 = -\sin 30 = -0,5$$

La potencia acusada por el vatímetro n.^o 2 es:

$$P_2 = U_{ST} \cdot I_S \cdot \cos 120 = -0,5 \cdot U_{ST} \cdot I_S$$

El signo negativo indica que el vatímetro acusará en sentido contrario. Para que el vatímetro pueda acusar hacia la derecha se invierte la conexión de la bobina de tensión del vatímetro. Después de invertir la bobina de tensión, el vatímetro acusará el mismo valor que el vatímetro n.^o 1, pero estando invertida la conexión, el valor de la potencia indicada por este vatímetro se resta (no se suma) del valor indicado por el vatímetro n.^o 1.

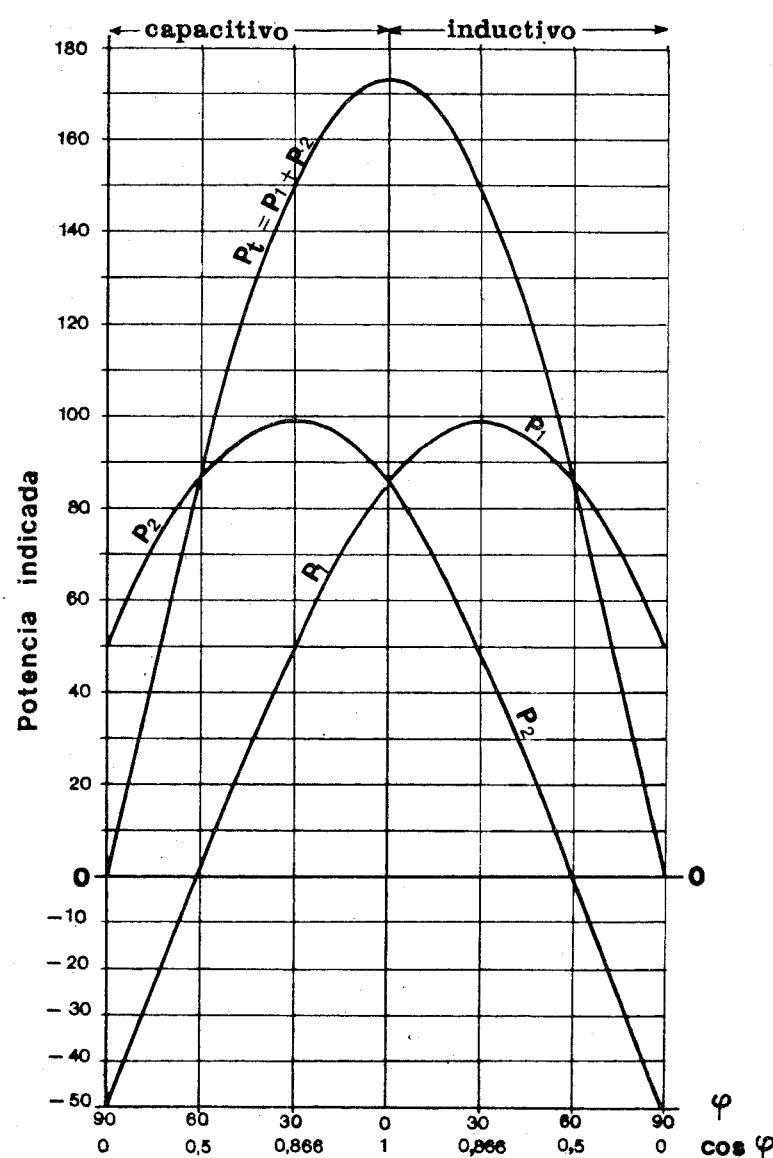
$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 = P_1 + (-P_2)$$

$$P_{\text{total}} = 0,5 \cdot U_{RS} \cdot I_R - 0,5 \cdot U_{ST} \cdot I_S = 0$$

El resultado es cero y concuerda con las características del receptor, el cual, siendo puramente inductivo, no consume potencia.

De estas consideraciones se deduce que, cuando la aguja indicadora de uno de los vatímetros tiende a acusar en sentido contrario, $\cos \varphi < 0,5$. En este caso se invierte la conexión del vatímetro y el valor indicado se resta del valor indicado por el vatímetro no invertido. Las indicaciones de los vatímetros dependen del factor de potencia y son iguales cuando el ángulo $\varphi = 0$ ($\varphi = 1$). Cuando el ángulo de desfase es mayor que 60° , el vatímetro n.^o 2 tiende a acusar en sentido contrario.

El gráfico de la figura III-28 representa las potencias parciales P_1 y P_2 indicadas por los dos vatímetros en función del $\cos \varphi$ del receptor en un caso de alimentación simétrica y del receptor equilibrado y de intensidad constante.



Medición de potencia con método Aron utilizando un solo vatímetro

Cuando la carga es *constante* se puede emplear el método Aron (de dos vatímetros) utilizando un solo vatímetro. La figura III-29 muestra el principio de este método basado en el uso de un interruptor especial o también, en un caso de necesidad, dos interruptores unipo-

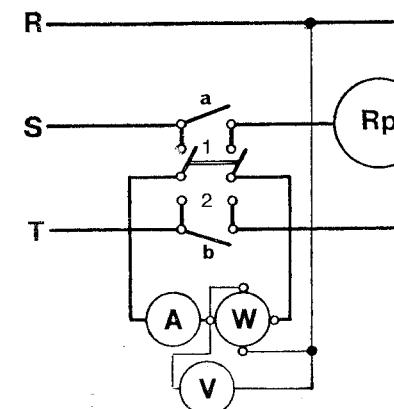


Figura III-29.

lares con un interruptor normal de dos vías. El procedimiento es el siguiente: 1.^{er} paso. Se coloca el interruptor en posición 1 (ver figura) y se abre el interruptor *a*. De este modo quedan intercaladas en la fase *S* la bobina de intensidad del vatímetro y el amperímetro y la bobina de tensión del vatímetro y el voltímetro estarán conectadas entre las fases *S* y *R*. Se efectúa la lectura midiendo la potencia P_1 . 2.^o paso. Se cierra el interruptor *a* y se abre el interruptor *b* pasando el interruptor a la posición 2. Queda intercalado el circuito de intensidad en la fase *T* y conectado el circuito de tensión a las fases *T* y *R*. Se efectúa la medición obteniendo esta vez el valor de P_2 . Sumando P_1 y P_2 se obtiene el valor total de la potencia.

El vatímetro cumple la función de dos vatímetros. Se puede establecer la secuencia y determinar en qué posición del interruptor (1 o 2), el vatímetro "será" el n.^o 1 y en cuál será el n.^o 2. El método se presta para medir potencias constantes y no necesariamente de alimentación simétrica y carga equilibrada.

Existen interruptores especiales para utilizarlos con este métod-

do, combinados con los interruptores *a* y *b* de modo que el procedimiento resulta muy simple y sin necesidad de prestar atención especial a la secuencia operacional de los interruptores y del conmutador.

Casi todos los métodos de mediciones de potencia en sistemas trifásicos se basan en general en los métodos de 2 y de 3 vatímetros, cuya teoría se ha considerado. Al elegir el método adecuado para cada caso hay que tener en cuenta, además de la disponibilidad del instrumental, las siguientes condiciones:

A. Condiciones de la red y del receptor

1. Alimentación simétrica, las tres tensiones iguales; receptor equilibrado, las tres intensidades iguales.
2. Alimentación simétrica, las tres tensiones iguales, pero el receptor desequilibrado y las intensidades desiguales.
3. Alimentación asimétrica, tensiones desiguales y en consecuencia el receptor desequilibrado e intensidades desiguales.

B. Sistema de la red y del receptor

1. La red de alimentación es de 4 conductores (3 fases y el neutro) o de 3 conductores (sin neutro), pero el receptor está conectado en estrella con el neutro accesible.
2. La red de alimentación es de 3 fases (sin neutro) y el receptor no tiene acceso al neutro.

Ejemplos de medición de potencia con el método de 3 vatímetros

Ejemplo 1. Utilizando el esquema de la figura III-30 en una red de 4 conductores (3 fases y el neutro), se determina la potencia de

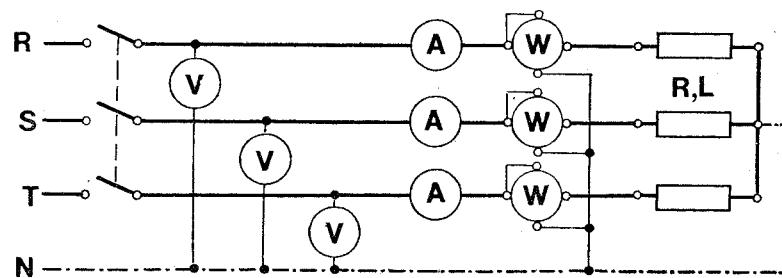


Figura III-30.

receptores trifásicos de las siguientes características: resistiva pura equilibrada, combinada resistiva-inductiva equilibrada y combinada desequilibrada.

Instrumentos empleados: 3 voltímetros 0-150-300 V; 3 amperímetros 0-6-12 A; 3 vatímetros 0-5-10 A y 150-300 V de 150 divisiones de escala.

Se utilizan dos cuadros de valores: uno para los valores tomados durante la medición y el otro para anotar valores calculados a base de los valores medidos. Las potencias activas de cada fase indican los vatímetros (P_R , P_S , P_T). Las potencias aparentes de cada fase se calculan por el producto de la tensión de fase por la intensidad de línea correspondiente, ($S_R = U_R \cdot I_R$; $S_S = U_S \cdot I_S$; $S_T = U_T \cdot I_T$). La potencia activa total del sistema es la suma de las tres potencias parciales,

CUADRO DE VALORES MEDIDOS

N. ^o	<i>f</i>	U_R	U_S	U_T	I_R	I_S	I_T	P_R	P_S	P_T	Observaciones
	Hz	V	V	V	A	A	A	W	W	W	
1	60	228	226	228	2,85	2,85	2,90	650	640	660	Carga resistiva equilibrada
2	60	230	226	228	3,40	3,40	3,50	480	470	480	Carga combinada R, L
3	60	230	228	230	5,70	4,10	3,55	1100	700	500	Carga combinada desequilibrada

CUADRO DE VALORES CALCULADOS

N. ^o	S_R	S_S	S_T	P_{tot}	S_{tot}	$\cos \varphi_R$	$\cos \varphi_S$	$\cos \varphi_T$	$\cos \varphi_{prom.}$	Observaciones
	VA	VA	VA	W	VA					
1	6498	644,1	661,2	1950	1955,1	1	0,99	0,99	~ 1	Carga resistiva equilibrada
2	782	768,4	798	1430	2348,4	0,614	0,611	0,601	0,608	Carga combinada R, L
3	1311	934,8	816,5	2300	3062	0,83	0,748	0,612		Carga combinada desequilibrada

$P_{\text{tot}} = P_R + P_S + P_T$ y la potencia total aparente es la suma de las tres potencias aparentes parciales, $S_{\text{tot}} = S_R + S_S + S_T$. Los factores de potencia se obtienen:

$$\cos \varphi_R = \frac{P_R}{S_R} ; \quad \cos \varphi_S = \frac{P_S}{S_S} ; \quad \cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T}$$

$$\cos \varphi_{\text{prom}} = \frac{P_{\text{tot}}}{S_{\text{tot}}}$$

El valor promedio del $\cos \varphi$ es válido únicamente en el caso de la carga equilibrada.

Ejemplo 2. Medir la potencia eléctrica requerida por un motor trifásico conectado a la red trifásica simétrica. Es accesible el neutro tanto de la red como del motor. Considerando que un motor trifásico representa una carga equilibrada, la medición se efectúa utilizando un solo vatímetro multiplicando sus indicaciones por 3. La red es de 380/220 V de valores nominales. Se mide la tensión de fase (U_f) y la intensidad de línea en un conductor, suponiendo que las tres tensiones de fase (U_R, U_S, U_T) son iguales y también que $I_R = I_S = I_T = I_l$. La figura III-31 muestra el esquema práctico y los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

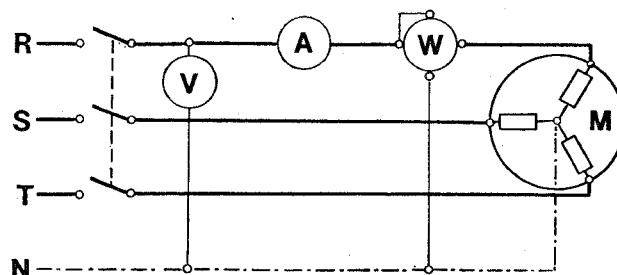


Figura III-31.

- 1 Vatímetro marca AEG clase 0,2; 5 y 10 A; 30, 90, 150 y 300 V con escala de 150 divisiones.
- 1 Amperímetro electromagnético marca CROMPTON & PARKINSON, clase 0,5 con escala 0-7,5 A.
- 1 Voltímetro electromagnético marca SANGAMO WESTON, clase 0,5 de 150 y 300 V.

En el cuadro de valores están anotados los valores tomados y calculados.

$$P_{\text{tot}} = 3 \cdot P_f = 3 \cdot 690 = 2070 \text{ W}$$

$$S_{\text{tot}} = 3 \cdot U_f \cdot I_l = 3 \cdot 228 \cdot 4,0 = 2736 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{tot}}}{S_{\text{tot}}} = \frac{2070}{2736} = 0,75$$

CUADRO DE VALORES

N.º	f	U_f	I_l	S_f	P_f	$P_{\text{tot}} =$	$S_{\text{tot}} =$	$\cos \varphi$	Observa-
						$3 \cdot P_f$	$3 \cdot S_f$		
1	60	228	4,0	912	690	2070	2736	0,75	

Ejemplo 3. Determinar la potencia que absorbe una fábrica alimentada por una red trifásica de 4 conductores. La tensión nominal es de 416/240 V y el valor aproximado de las intensidades determinado por un cálculo previo es del orden de 30 a 40 A. En consecuencia, para los circuitos de intensidad de los instrumentos (vatímetros y amperímetros) se utilizarán los transformadores de intensidad de relación 50/5 A. La figura III-32 muestra el esquema de conexión

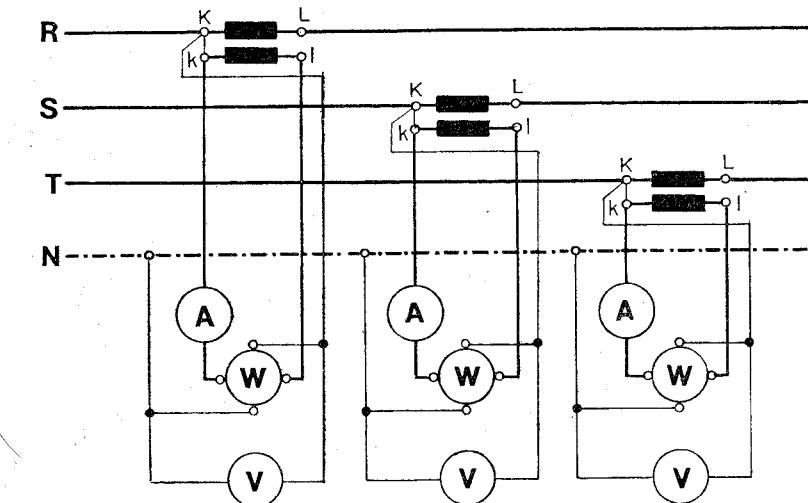


Figura III-32.

correspondiente a esta medición. En el esquema se pueden apreciar las conexiones equipotenciales entre K y k de cada transformador. Las conexiones "equipotenciales" tienen la finalidad de igualar los potenciales entre las bobinas de tensión y de intensidad de los vatímetros.

Los instrumentos de medición utilizados son:

- 3 transformadores de intensidad, clase 0,2 marca H & B con $K_i = 50/5$.
- 3 amperímetros electromagnéticos, clase 0,5, marca AEG, 0-5 A.
- 3 vatímetros, clase 0,2 marca AEG, 5 A y 300 V con 150 divisiones.
- 3 voltímetros electromagnéticos, clase 0,5, marca WESTON, 0-300 V.

Debido al uso de los transformadores de intensidad cuya intensidad de corriente secundaria está normalizada en 5 A, tanto los amperímetros como los vatímetros fueron elegidos con el alcance de intensidad de 5 A. En consecuencia, las lecturas de los amperímetros y de los vatímetros deben ser multiplicadas, aparte de sus propias constantes, por la relación de transformación $K_i = 10$. En el presente ejemplo las intensidades acusadas por los amperímetros son de 3,05 A; 2,80 A; 3,20 A. Las intensidades que aparecen en el cuadro de valores tomados son de 30,5; 28,0 y 32,0 A respectivamente. De igual manera se calculan las potencias indicadas por los vatímetros:

$$\text{La constante del vatímetro } C_w = \frac{I_{\text{nom}} \cdot U_{\text{nom}}}{\text{divisiones}} = \frac{5 \text{ A} \cdot 300 \text{ V}}{150} = 10$$

La constante de lectura del vatímetro conjuntamente con el transformador de intensidad es: $C_t = C_w \cdot K_i = 10 \cdot 10 = 100 \text{ W/}^{\circ}$.

Los tres vatímetros acusan 61, 52 y 61 divisiones respectivamente lo que, multiplicado por la constante de lectura, representa 6100 W; 5200 W; 6100 W.

CUADRO DE VALORES MEDIDOS

N. ^o	U_R	U_S	U_T	K_i	I_R	I_S	I_T	P_R	P_S	P_T	Observaciones
	V	V	V		A	A	A	W	W	W	
1	230	225	229	10	30,5	28,0	32,0	6100	5200	6100	

CUADRO DE VALORES CALCULADOS

N. ^o	S_R	S_S	S_T	P_{tot}	S_{tot}	$\cos \varphi_R$	$\cos \varphi_S$	$\cos \varphi_T$	$\cos \varphi_{\text{prom}}$	Observaciones
	VA	VA	VA	W	VA					
1	7015	6300	7328	17400	20643	0,869	0,825	0,832	0,842	

Ejemplos de medición de potencia con el método Aron de 2 vatímetros

Ejemplo 1. Se mide la potencia de varios tipos de carga trifásica. No es disponible el neutro de la red ni existe el acceso al receptor. Se utiliza el método de 2 vatímetros según el esquema de la figura III-33. Se efectuaron cinco mediciones de diferentes cargas combinadas por R y L.

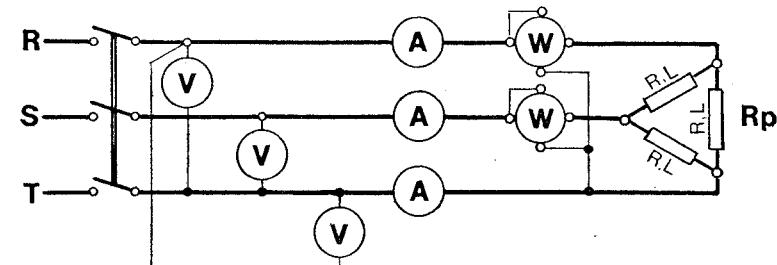


Figura III-33.

CUADRO DE VALORES MEDIDOS

N. ^o	U_{RS}	U_{ST}	U_{TR}	I_R	I_S	I_T	P_1			P_2			Observaciones
	V	V	V	A	A	A	α	C	W	α	C	W	
1	220	200	210	2,50	2,45	2,50	47	10	470	23,5	10	235	$C = C_w$
2	210	210	218	2,55	2,45	2,55	53	10	530	10	10	100	
3	196	196	202	2,72	2,65	2,72	51	10	510	6	10	60	
4	220	216	220	3,4	3,5	3,35	64	10	640	64	10	640	
5	220	216	220	2,75	2,70	2,70	53	10	530	-2	10	-20	Vatímetro 2 invertido

CUADRO DE VALORES CALCULADOS

N. ^o	U_{comp} prom	I_{lin} prom	$S = \sqrt{3} U \cdot I$	$P = P_1 + P_2$	$\cos \varphi$ prom	Observaciones
	V	A	VA	W		
1	203	2,48	870	705	0,81	
2	213	2,51	924	630	0,68	
3	198	2,70	925	570	0,61	
4	218	3,41	1286	1260	0,979	
5	218	2,71	1022	510	0,484	$P = P_1 - P_2$

La primera medición (n.^o 1 en los cuadros de valores):

La carga es casi equilibrada, pero la alimentación ni es del todo simétrica. Sin embargo, dado que las diferencias entre las tensiones no son muy grandes, se puede calcular la potencia aparente a base de los valores promedios de la tensión compuesta y de la intensidad de línea.

La potencia total:

$$P = P_1 + P_2 = 470 + 235 = 705 \text{ W}$$

La potencia aparente:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{comp}} \cdot I_{\text{lin}} = 1,73 \cdot 203 \cdot 2,48 = 870 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi = \frac{705 \text{ W}}{870 \text{ VA}} = 0,81.$$

La medición n.^o 4 corresponde a una carga resistiva, lo que se puede apreciar en las iguales indicaciones de ambos vatímetros (ver la explicación anterior).

La potencia total:

$$P = P_1 + P_2 = 640 + 640 = 1280 \text{ W}$$

La potencia aparente:

$$S = 3 \cdot U_{\text{comp}} \cdot I_{\text{lin}} = 1,73 \cdot 218 \cdot 3,41 = 1286 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi = \frac{1280}{1286} = 0,995 \approx 1$$

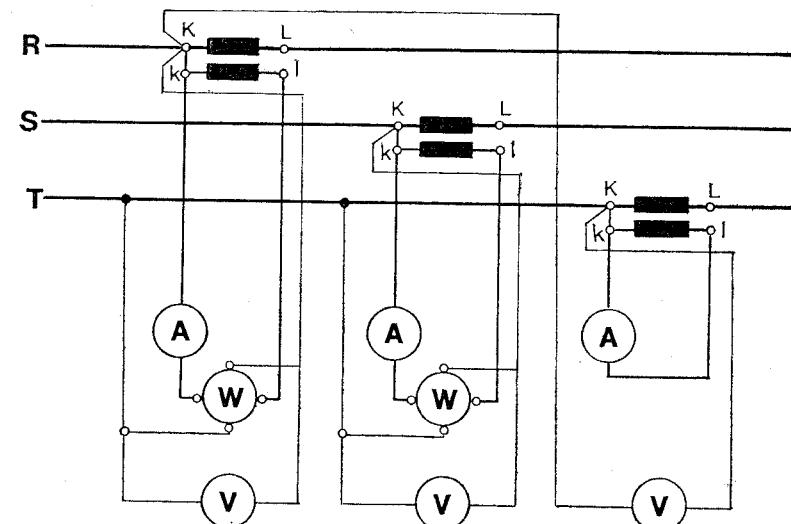


Figura III-34.

Para la medición n.^o 5 se utilizó una carga inductiva de la cual resultó negativa la desviación del vatímetro n.^o 2. Se deduce de este efecto que el $\cos \varphi < 0,5$. Se invierte la conexión de la bobina de tensión y luego, al efectuar la lectura, se resta el valor de P_2 del valor de P_1 .

La potencia total:

$$P = P_1 - P_2 = 530 - 20 = 510 \text{ W}$$

La potencia aparente:

$$S = 1,73 \cdot 218 \cdot 2,71 = 1022 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi = \frac{510}{1022} = 0,484$$

lo que comprueba la regla.

Ejemplo 2. Medir la potencia que absorbe un taller alimentado por una red trifásica de $3 \times 416 \text{ V}$ (nominal). Según el cálculo previo, la potencia instalada es de 30 kVA aproximadamente. Asumiendo que las intensidades son relativamente elevadas, se utilizarán los transformadores de intensidad para los amperímetros y las bobinas de intensidad de vatímetros. En consecuencia se utilizarán los siguientes instrumentos, según el esquema de la figura III-34:

- 3 transformadores de intensidad de relación 15/5 y 50/5, de 5 VA, marca AEG, clase 0,2.
- 3 amperímetros 0-5 A, clase 0,5, marca CROMPTON & PARTRIDGE.
- 3 vatímetros marca H & B, clase 0,5, 5 A y 450 V. $C_w = 10 \text{ W/}^\circ$.
- 3 voltímetros, marca H & B, 150, 300 y 600 V, clase 1.

El procedimiento difiere del anterior en que, debido al uso de los transformadores de intensidad, las lecturas de los amperímetros y de los vatímetros se multiplican por la relación de transformación utilizada. En este ejemplo se utilizó la relación $K_i = 50/5 = 10$. Siendo la constante del vatímetro $C_w = 10$ y la relación de transformación $K_i = 10$, la constante de lectura del vatímetro es $C = K_i \cdot C_w = 10 \cdot 10 = 100 \text{ W/}^\circ$.

CUADRO DE VALORES MEDIDOS

N. ^o	U_{RS}	U_{ST}	U_{TR}	K_i	I_R	I_S	I_T
	V	V	V		A	A	A
1	396	388	392	10	22,5	23,4	24,3
2	392	388	392	10	28,0	26,0	27,0

	P_1			P_2			Observaciones
	α	C	W	α	C	W	
	99	100	9900	31	100	3100	$C = K_i \cdot C_w$
	110	100	11000	42	100	4200	

CUADRO DE VALORES CALCULADOS

N. ^o	U_{comp}	I_{lin}	$S = \sqrt{3} U \cdot I$	$P = P_1 + P_2$	$\cos \varphi$	Observaciones
	prom.	prom.	VA	W		
1	392	23,4	15869	13000	0,82	
2	390,67	27,0	18248	15200	0,83	

Ejemplo 3. Se mide la potencia en una rama de la línea de distribución de tensión nominal 3×4160 V. Siguiendo el esquema de la figura III-35, se utilizarán los siguientes instrumentos:

- 2 transformadores de tensión 5000/100 V, clase 0,5; 20 VA.
- 2 transformadores de intensidad 15/5 A, clase 0,5; 20 VA (para la tensión ≥ 5000 V).

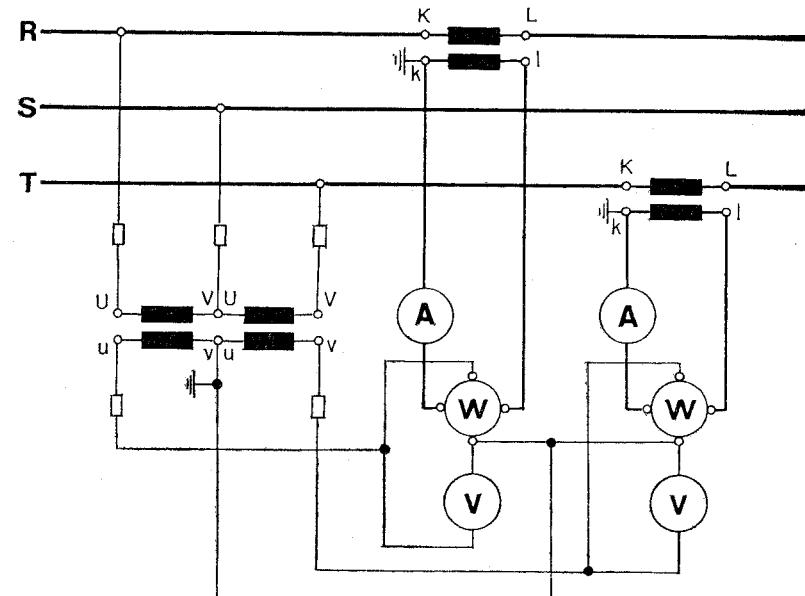


Figura III-35.

- 2 vatímetros marca H & B, clase 0,5; 5 A y 120 V, $C_w = 2 \text{ W/}^\circ$.
- 2 voltímetros marca SANGAMO & WESTON, clase 0,5, 0-120 V.

De esto resulta que las lecturas de los voltímetros se multiplicarán por $K_u = 100$; las lecturas de los amperímetros por $K_i = 3$ y las lecturas de los vatímetros por $C_w = 2$, $K_u = 100$ y $K_i = 3$. La constante de lectura de los vatímetros será: $C = C_w \cdot K_u \cdot K_i = 2 \cdot 100 \cdot 3 = 600 \text{ W/}^\circ$.

El vatímetro n.^o 1 es el intercalado en la fase T y el vatímetro n.^o 2, en la fase R; la fase común es la fase S.

Los valores anotados en los cuadros de valores fueron obtenidos de la siguiente manera:

En la medición n.^o 1

Los voltímetros conectados a los transformadores de tensión indican:

$$U'_{RS} = 78 \text{ V}; \quad U'_{TS} = 78 \text{ V}; \quad U'_{TR} = 78 \text{ V}$$

La tensión compuesta es:

$$U_{RS} = U'_{RS} \cdot K_u = 78 \cdot 50 = 3900 \text{ V}$$

$$U_{TS} = U'_{TS} \cdot K_u = 78 \cdot 50 = 3900 \text{ V}$$

$$U_{TR} = U'_{TR} \cdot K_u = 78 \cdot 50 = 3900 \text{ V}$$

Los amperímetros conectados a los transformadores de intensidad indican:

$$I'_R = 2,50 \text{ A}; \quad I'_S = 2,35 \text{ A}; \quad I'_T = 2,50 \text{ A}$$

$$I_R = I'_R \cdot K_i = 2,50 \cdot 3 = 7,50 \text{ A}; \quad I_S = I'_S \cdot K_i = 2,35 \cdot 3 = 7,05 \text{ A}$$

$$I_T = I'_T \cdot K_i = 2,50 \cdot 3 = 7,50 \text{ A}$$

CUADRO DE VALORES MEDIDOS

N. ^o	K_u	U_{RS}	U_{TS}	U_{TR}	K_i	I_R	I_S	I_T
	V	V	V			A	A	A
1	50	3900	3900	3900	3	7,50	7,05	7,50
2	50	3950	3950	3950	3	8,85	8,25	8,40
3	50	3950	3950	3950	3	9,00	8,85	8,85

P_1			P_2			Observaciones
α	C	W	α	C	W	
81	300	24300	84	300	25200	$C = K_u \cdot K_i \cdot C_w$
112	300	33600	66	300	19800	$= 50 \cdot 3 \cdot 2 = 300$
111	300	33300	61	300	18300	$(C_w = 2W^{\circ})$

CUADRO DE VALORES CALCULADOS

N. ^o	U_{comp}	I_{lin}	$S =$	$P =$	$\cos \varphi$	Observaciones
	prom.	prom.	$\sqrt{3} U \cdot I$	$P_1 + P_2$		
	V	A	VA	W		
1	3900	7,34	49523	49500	0,999	
2	3950	8,50	58085	53400	0,919	
3	3950	8,90	60818	51600	0,840	

Los vatímetros tienen las bobinas de tensión conectadas en paralelo con los voltímetros, a los transformadores de tensión y las bobinas de intensidad en serie con los amperímetros a los transformadores de intensidad.

El vatímetro n.^o 1 acusa:

$$P'_1 = \alpha \cdot C_w = 81 \cdot 2 \quad (C_w \text{ es la constante del vatímetro})$$

La potencia indicada por el vatímetro es:

$$P_1 = \alpha \cdot C_w \cdot K_u \cdot K_i = 81 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 3 = 24300 \text{ W}$$

El vatímetro n.^o 2 acusa:

$$P'_2 = \alpha \cdot C_w = 84 \cdot 2$$

La potencia indicada por el vatímetro es:

$$P_2 = \alpha \cdot C_w \cdot K_u \cdot K_i = 84 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 3 = 25200 \text{ W}$$

La potencia aparente del sistema es:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{comp}} \cdot I$$

U_{comp} se obtiene del valor promedio de las tres tensiones:

$$U_{\text{comp}} = \frac{U_{RS} + U_{TS} + U_{TR}}{3} = 3900 \text{ V}$$

$$I_{\text{linea}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = 7,34 \text{ A}$$

finalmente, el $\cos \varphi$ promedio del sistema es:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (\text{donde } P = P_1 + P_2)$$

La otra forma de obtener el valor promedio de $\cos \varphi$ es mediante la relación:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$$

La potencia reactiva:

$$Q = Q_1 + Q_2 = U_{RS} \cdot I_R \cdot \operatorname{sen} \varphi_R + U_{TR} \cdot I_T \cdot \operatorname{sen} \varphi_T$$

$$P = P_1 + P_2 = U_{RS} \cdot I_R \cdot \cos \varphi_R + U_{TR} \cdot I_T \cdot \cos \varphi_T$$

Calculando por separado los valores de $\cos \varphi_R$ y de $\cos \varphi_T$ se pueden hallar los de $\operatorname{sen} \varphi_R$ y de $\operatorname{sen} \varphi_T$ y, por consiguiente, obtener el valor promedio del $\cos \varphi$ del sistema por la tangente.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_1 + Q_2}{P_1 + P_2}$$

Medición de la potencia reactiva del sistema trifásico

Para las mediciones directas de la potencia reactiva (Q), se utiliza un vatímetro especial denominado "varímetro", instrumento ya descrito en el primer tomo de esta obra. En este instrumento, el flujo magnético de la bobina de intensidad y el flujo magnético de la bobina de tensión están desfasados entre sí 90° . En la práctica, frecuentemente es más fácil calcular la potencia reactiva a base de la medición de la potencia activa (P) y el $\cos \varphi$ determinado. Sin embargo, en el circuito trifásico equilibrado se puede utilizar una tensión compuesta desfasada 90° con respecto a la tensión de fase y medir directamente la potencia reactiva utilizando el vatímetro común. La figura III-36 a muestra la conexión del vatímetro en la red trifásica equilibrada para que indique la potencia reactiva (Q). Como se puede apreciar en el diagrama vectorial (fig. III-36 b), el vatímetro conectado según el esquema mide una potencia:

$$P' = I_R \cdot U_{ST} \cdot \cos (90^\circ - \varphi)$$

donde la tensión compuesta U_{ST} está desfasada 90° con respecto a la tensión de la fase U_R . En consecuencia el vatímetro acusa:

$$U_{\text{comp}} \cdot I_{\text{lnea}} \cdot \cos (90^\circ - \varphi) = U_{\text{comp}} \cdot I_{\text{lnea}} \cdot \operatorname{sen} \varphi = Q'$$

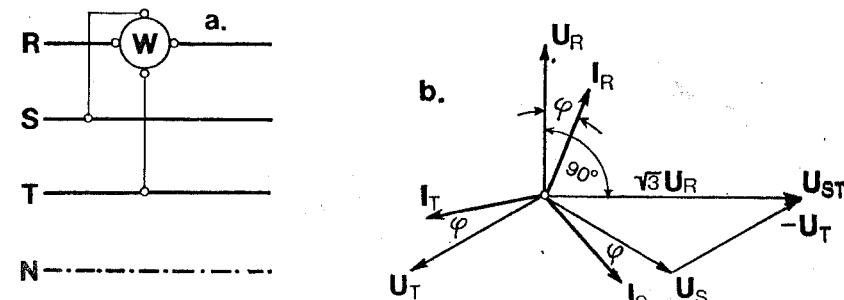


Figura III-36.

lo que significa que mide una potencia reactiva. La bobina de tensión del vatímetro está conectada a $U_{\text{comp}} = U_{\text{fase}} \cdot \sqrt{3}$. La potencia reactiva del sistema trifásico equilibrado es:

$$Q = U_{\text{comp}} \cdot I_{\text{lnea}} \cdot \operatorname{sen} \varphi \cdot \sqrt{3} = Q' \cdot \sqrt{3}$$

donde Q' es el valor acusado por el vatímetro.

Ejemplo: Se mide la potencia reactiva Q que absorbe un motor trifásico de 2 CV de potencia, conectado a la red trifásica de $3 \times 220/127$ V de valores nominales.

Ejecución. Se supone que, por ser un motor trifásico en buen estado, las tres intensidades son iguales y, por lo tanto, la carga es equilibrada. En consecuencia se puede utilizar un solo vatímetro. Para determinar los alcances de intensidad de los instrumentos (amperímetro y vatímetro) se hace un cálculo previo del cual se obtuvieron valores inferiores a los 5 A.

Se utilizarán dos vatímetros: uno para medir la potencia activa P , conectado según el esquema de la figura III-17, y el otro para determinar la potencia reactiva Q , conectado según el esquema de la figura III-36 a. Además, se utilizarán un amperímetro electromagnético 0-7,5 A y dos voltímetros de 150 y 300 V respectivamente.

La bobina de tensión del vatímetro que mide la potencia activa P está conectada a la tensión de fase (U_R) (alcance de tensión 150 V) y el vatímetro que mide la potencia reactiva tiene la bobina de tensión conectada a la tensión compuesta (U_{ST}) en su alcance de tensión de 300 V.

Los valores medidos obtenidos están anotados en el cuadro de valores:

CUADRO DE VALORES

N. ^o	U_f	U_{comp}	I_1	P_f	$P_{\text{tot}} = 3 \cdot P_f$	Q'	$Q_{\text{tot}} = \sqrt{3} \cdot Q'$	Observaciones
	V	V	A	W	W	VAr	VAr	
1	120	210	4,16	450	1350	370	640	

Verificación de los resultados. En base a los valores medidos, la potencia aparente $S = 3 \cdot 4,16 \text{ A} \cdot 120 \text{ V} = 1497,6 \text{ VA}$. Según el triángulo de potencias (fig. III-2):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1350^2 + 640^2} = 1494 \text{ VA}$$

El error es insignificante, lo que demuestra que las mediciones fueron efectuadas correctamente.

El método de medir la potencia reactiva Q mediante un solo vatímetro es adecuado únicamente en los casos de la simetría de la alimentación y del equilibrio de la carga. Como se puede apreciar en el ejemplo, el procedimiento es similar cuando se usa un solo vatímetro para medir la potencia activa P del circuito trifásico en el método de 3 vatímetros. Condición: $U_R = U_S = U_T = U_{\text{fase}}$ e $I_R = I_S = I_T = I_{\text{línea}}$.

Para las mediciones de potencia reactiva trifásica cuando la alimentación es simétrica, pero la carga es desequilibrada, se utilizan 3 vatímetros conectados según el esquema de la figura III-37 a.

Del diagrama vectorial de la figura III-37 b se deduce que los 3 vatímetros acusan una potencia:

$$P' = U_{ST} \cdot I_R \cdot \cos(U_{ST}I_R) + U_{TR} \cdot I_S \cdot \cos(U_{TR}I_S) + U_{RS} \cdot I_T \cdot \cos(U_{RS}I_T)$$

Por ser la alimentación simétrica: $U_{ST} = U_{TR} = U_{RS} = U_{\text{comp}}$.

$$\begin{aligned} \cos(U_{ST}I_R) &= \cos(90 - \varphi_R) ; \quad \cos(U_{TR}I_S) = \cos(90 - \varphi_S) ; \\ \cos(U_{RS}I_T) &= \cos(90 - \varphi_T) \end{aligned}$$

de esto resulta que la suma de las indicaciones de los 3 vatímetros es:

$$Q'' = U_{\text{comp}}I_R \sin \varphi_R + U_{\text{comp}}I_S \sin \varphi_S + U_{\text{comp}}I_T \sin \varphi_T$$

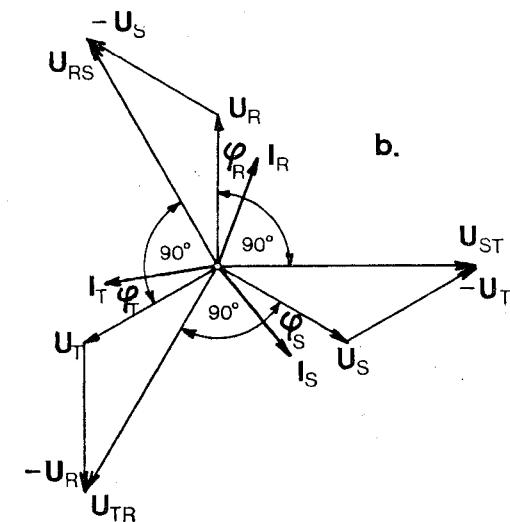
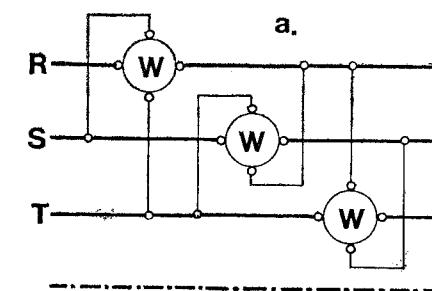


Figura III-37.

Por ser: $U_{\text{comp}} = 3 U_f$, la potencia reactiva del circuito trifásico es:

$$Q = \frac{U_{\text{comp}}}{\sqrt{3}} (I_R \sin \varphi_R + I_S \sin \varphi_S + I_T \sin \varphi_T) = Q_R + Q_S + Q_T$$

De esto resulta que para obtener el valor de la potencia reactiva se debe dividir la suma de las indicaciones de los 3 vatímetros por $\sqrt{3}$.

Ejemplo. Se determina la potencia reactiva en una red trifásica simétrica 220/127 V, utilizando el método de 3 vatímetros. Además de los tres vatímetros conectados según el esquema de la fig. III-37 a, se utilizan 3 amperímetros para el control de la carga y dos voltímetros para medir las tensiones sencilla y compuesta.

CUADRO DE VALORES

N. ^o	U_f	U_{comp}	I_R	I_S	I_T	Q'_R	Q'_S	Q'_T	Q''	$Q = \frac{Q''}{\sqrt{3}}$	Observaciones
	V	V	A	A	A	VAr	VAr	VAr	VAr	VAr	
1	124	215	3,6	3,6	3,7	480	490	470	1440	832	equilibrada
2	124	215	4,1	2,52	2,85	240	220	110	570	329	desequilibrada

En el cuadro de valores están anotados los valores tomados y calculados para dos casos: uno de carga equilibrada (1) y el otro (2) de carga desequilibrada.

Capítulo IV

TEORÍA Y CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DE ENERGÍA

Las mediciones de la energía eléctrica que se efectúan mediante medidores o contadores, se utilizan para calcular el valor de la energía que vende al consumidor la compañía suministradora. También se utilizan para el control de la energía gastada en las redes, fábricas, etc.

Debido a que las relaciones monetarias se basan sobre las lecturas de medidores, tanto la producción como la venta y uso de estos instrumentos están sujetas en todos los países a un estricto control de las oficinas estatales de pesas y medidas.

La energía utilizada o suministrada se puede determinar de la manera siguiente: cuando de una línea se recibe una intensidad de corriente i bajo la tensión u , donde tanto u como i pueden variar en el tiempo; la potencia instantánea es $p = i \cdot u$ y la energía A utilizada entre los instantes t_1 y t_2 se puede expresar:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} p \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot dt$$

La función de un medidor de energía o contador es sumar e indicar este trabajo eléctrico que corresponde al consumo de la energía, en forma continua. En consecuencia, la medición de la energía es la medición de la potencia con la simultánea integración en el tiempo y, un medidor o contador de energía es en realidad un vatímetro giratorio provisto de un dispositivo integrador-numerador.

Los mismos principios que sirven para construir vatímetros valen también para la construcción de medidores de energía eléctrica; por ejemplo, el vatímetro electrodinámico es el principio de construcción

de medidor de energía de corriente continua y el vatímetro de inducción es la base de construcción del medidor de corriente alterna. (Véase Tomo I, Instrumentos electrodinámicos e Instrumentos de inducción).

Dada la importancia y la extensión mundial de las redes de corriente alterna, la mayor parte de medidores que hoy día se utilizan son medidores de corriente alterna y concretamente tipos basados en el sistema motor de inducción. A estos medidores se refieren los capítulos dedicados a los medidores de energía en la obra presente.

Los medidores de energía eléctrica de corriente alterna pueden ser adaptados para medir por separado varios tipos de energía que influyen en la tarifa. Como se ha aclarado en el capítulo anterior, la potencia de corriente alterna puede ser representada por sus tres componentes: la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la potencia aparente (S). De igual manera se distinguen 3 tipos de energía:

energía eléctrica activa:

$$A_p = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot \cos \varphi \cdot dt \quad (\text{Wh}); \quad (\text{kWh}); \quad (\text{MWh})$$

energía eléctrica reactiva:

$$A_q = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot \operatorname{sen} \varphi \cdot dt \quad (\text{VArh}); \quad (\text{kVArh}); \quad (\text{MVArh})$$

energía eléctrica aparente:

$$A_s = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot dt \quad (\text{VAh}); \quad (\text{kVAh}); \quad (\text{MVAh})$$

Los medidores de energía se diferencian de los vatímetros por carecer su parte móvil de un dispositivo que origina un momento antagonista proporcional al ángulo de desviación. En su lugar el rotor de un medidor, que es de rotación continua como el rotor de un motor eléctrico, es frenado por el campo de un imán permanente, lo que origina un momento opuesto al momento propulsor del sistema motor y que es proporcional a la velocidad de rotación.

Las partes principales de un medidor de energía son: (A) el sistema motriz y (B) el sistema de frenado, los cuales actúan sobre el mismo rotor y, además, (C) el numerador-integrador, el cual traduce las revoluciones efectuadas por el rotor durante un determinado tiempo, a la cantidad de unidades de energía consumida.

La figura IV-1 representa en forma esquemática el principio de construcción del sistema motriz. Este consta de dos electroimanes 1 y 3, con sus respectivos arrollamientos de tensión y de intensidad. El arrollamiento de tensión de muchas espiras y de muy alta inductancia está conectado a la tensión U de la red que alimenta el receptor y el otro, de pocas espiras y de muy baja impedancia, está intercalado en serie con el receptor. Ambos electroimanes abrazan el rotor 2, que es un disco de aluminio montado en un eje. El electroimán 1 conectado a la red origina

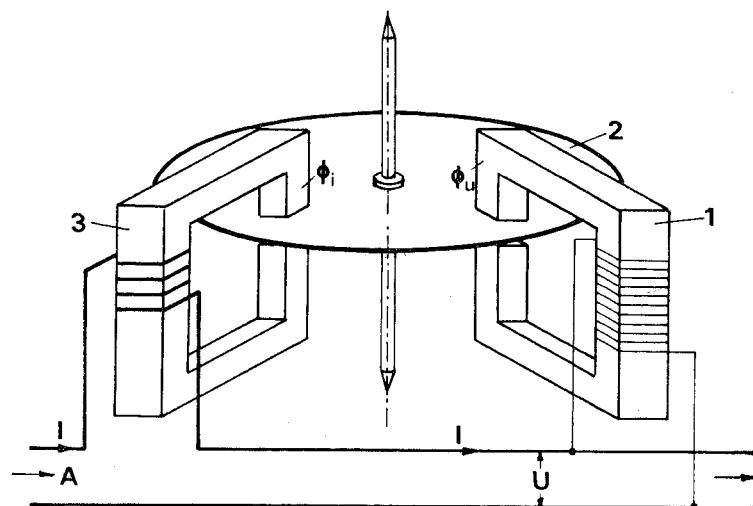


Figura IV-1.

un flujo magnético Φ_u proporcional a la tensión U , y el otro electroimán 3, por el cual se hace circular la corriente del consumidor, origina el flujo magnético Φ_i proporcional a dicha corriente. Ambos flujos (Φ_u y Φ_i) inducen en el disco las corrientes de Foucault (I_{Du} e I_{Di}), las cuales, conjuntamente con los dos flujos, producen un par motor M_m proporcional a la potencia que se mide. (Véase Instrumentos de inducción descritos en el Capítulo VII del tomo I de la obra presente y la figura IV-2).

El sistema de frenado consiste en un fuerte imán permanente, que abraza el disco-rotor del sistema motriz. Durante la rotación del disco el flujo magnético del imán Φ_{im} induce en él corrientes de Foucault y se produce un par de frenado M_f proporcional a la velocidad periférica del disco.

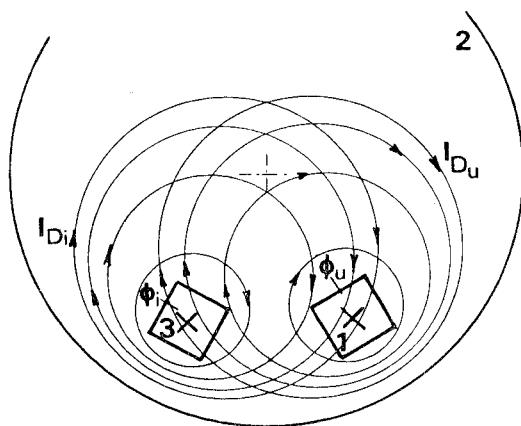


Figura IV-2.

Deducción de la relación entre energía y las revoluciones en el tiempo

El medidor de energía eléctrica funciona de la forma siguiente: mientras no se consume energía, sólo existe el flujo ϕ_u y el medidor queda parado; al consumir energía, aparece además el flujo ϕ_i y el medidor se pone en marcha, impulsado por el momento motor M_m . Al principio el movimiento del disco es lento y por lo tanto el par de frenado M_F es muy débil. A medida que la velocidad del disco va aumentando, también crece el par de frenado hasta que se establece el equilibrio entre los dos momentos de torsión M_m y M_F . Debido a la forma del imán de freno y a la construcción de su soporte, se puede influir sobre la velocidad del disco y obtener así una regulación muy precisa del número de revoluciones del rotor en un margen muy amplio.

Como se expone más adelante, el par motor M_m que actúa sobre el disco es proporcional a la potencia que se mide:

$$M_m = c_1 \cdot P$$

donde c_1 es una constante cuyo valor depende de las particularidades constructivas del sistema motor.

El momento torsional de freno M_F es proporcional a la velocidad periférica del disco:

$$M_F = c_2 \cdot v$$

donde c_2 es una constante cuyo valor depende del imán y de su posición respecto al disco y v es la velocidad uniforme cuando ambos pares —motor y de frenado— son iguales. Puede expresarse:

$$v = \frac{dl}{dt}$$

donde $l = 2\pi n$ y significa el recorrido de un punto del disco cuya distancia del eje de rotación es igual a una unidad de longitud.

$$v = \frac{d(2\pi n)}{dt} = 2\pi \frac{dn}{dt}$$

De la igualdad de momentos de torsión $M_m = M_F$ se deduce:

$$c_1 \cdot P = c_2 \cdot v = c_2 \cdot 2\pi \frac{dn}{dt}$$

$$P \cdot dt = \frac{c_1}{c_2} \cdot 2\pi \cdot dn = C \cdot dn, \text{ siendo } C = \frac{c_2}{c_1} \cdot 2\pi$$

Para un período de medición desde t_1 hasta t_2 integramos ambos miembros entre t_1 y t_2 :

$$\int_{t_1}^{t_2} P \cdot dt = C \int_{n_1}^{n_2} dn$$

El primer miembro de esta ecuación expresa el valor A de la energía medida y el segundo expresa el número de vueltas n del disco, efectuadas durante el período de medición, multiplicado por una constante C .

$$A = C \cdot n$$

El número de vueltas del disco-rotor es proporcional a la cantidad de energía medida.

Constante

La constante C depende de la construcción del sistema motor y del mecanismo integrador-numerador y es por lo tanto una cifra característica para cada modelo de medidor. Se denomina *constante del medidor* y se la determina para las condiciones normalizadas del fun-

cionamiento del medidor, o sea a una temperatura determinada y en una posición del medidor también determinada, con la carga nominal, etc.

El movimiento del rotor se transmite al integrador-numerador (fig. IV-29) mediante un sistema de engranajes, que mueve agujas indicadoras o tambores con cifras. Este dispositivo está acoplado al eje del rotor y suma su número de vueltas. Como su indicación es proporcional al número de revoluciones efectuadas y éste es proporcional a la energía A , la indicación del numerador resulta proporcional a la energía consumida. La relación de transmisión de las ruedas dentadas en el mecanismo integrador se calcula de modo que las indicaciones en cifras correspondan directamente a las unidades de energía eléctrica medida.

Debido a varios factores externos o/y a errores originados por el medidor mismo, el valor de su constante puede diferir del valor nominal C_N . En tal caso, el valor de la energía indicada por el medidor difiere de su valor real. El valor de este error está limitado por los reglamentos pertinentes. El error δ en % del valor real se calcula:

$$\delta = \frac{A_{\text{ind}} - A_{\text{real}}}{A_{\text{real}}} \cdot 100$$

donde A_{ind} es el valor de la energía acusada por el medidor, y A_{real} es el valor real de la energía consumida.

El error δ resulta positivo cuando el medidor acusa una energía mayor a la energía consumida realmente, y viceversa.

Como ya se ha dicho, en la medición de la energía eléctrica (tanto en instalaciones monofásicas como polifásicas) se utilizan medidores cuyo funcionamiento está basado en el principio de instrumentos de inducción. El sistema de inducción fue ampliamente descrito en el Capítulo VII del primer tomo de esta obra. En el capítulo presente se describe este sistema enfocándolo desde el punto de vista del medidor-contador de energía eléctrica. Como ya se puede apreciar, es un sistema de dos flujos sin dispositivo que origina el par antagonista. Esto permite la rotación continua del disco-rotor con registro simultáneo de las vueltas traducidas a las unidades de energía. El registro se efectúa mediante un sistema de engranajes acoplado al eje de rotación del disco. La velocidad de rotación corresponde a la constante del numerador-integrador y se la puede ajustar mediante un imán permanente que actúa sobre una porción del disco. Además existen otras regulaciones, que se explican más adelante, y que se utilizan para varios tipos de carga.

El medidor de energía activa debe registrar, con cualquier tipo de carga (resistiva, reactiva-inductiva, reactiva-capacitiva), la componente activa, $U \cdot I \cdot t \cdot \cos \varphi$. Para que se cumpla esta condición, es imprescindible que el momento motor, que impulsa el disco y produce su rotación, sea siempre proporcional al producto de los componentes activos de la tensión U y de la intensidad I .

La condición de 90°

Sobre el disco actúan dos momentos:

el momento M_1 que se produce por la acción recíproca entre el flujo Φ_u del electroimán de tensión (1), y la corriente I_{D1} inducida en el disco por el flujo Φ_i del electroimán de intensidad (3) y el momento M_2 que se origina por el flujo Φ_i y la corriente inducida I_{Du} en disco por el flujo Φ_u .

La suma de ambos momentos da el momento resultante que hace girar el disco: $M_T = M_1 + M_2$.

Para que el momento resultante M_T sea proporcional a la potencia activa se debe cumplir la condición:

$$\Psi = 90^\circ - \varphi$$

donde Ψ es el ángulo entre los vectores de los flujos Φ_u y Φ_i , y φ es el ángulo de desfase entre la tensión U y la intensidad I del receptor. De esto surge que:

$$\sin \Psi = \cos \varphi$$

Debido al acoplamiento de los flujos magnéticos con las magnitudes medidas (U, I), cualquier variación del ángulo φ origina una igual variación del ángulo Ψ (fig. IV-3). En consecuencia, cuando se consigue que, con el factor de potencia $\cos \varphi = 1$, ambos flujos (Φ_u, Φ_i) estén desfasados exactamente 90°, el par motor o momento de torsión M_T será siempre proporcional a la potencia activa, cualquiera que sea el ángulo de desfase entre U e I . Se dice que el sistema motor del medidor debe ser contrastado a la "condición de 90°". La coincidencia de las posiciones de los vectores de los flujos magnéticos (Φ_u, Φ_i) con las posiciones de los vectores de las respectivas intensidades magnetizantes (I_u, I_i), significa que se cumple la condición:

$$\sin \Psi = \cos \varphi$$

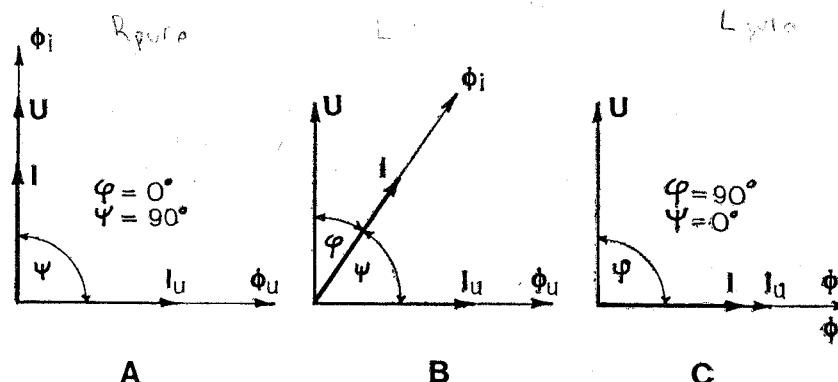


Figura IV-3.

Esto sucede cuando la intensidad magnetizante I_u está desfasada en 90° con respecto a la tensión U y para que esto ocurra la bobina del electroimán de tensión (1) debe comportarse como una inductancia pura. En realidad, el bobinado del electroimán de tensión es muy inductivo (núcleo ferromagnético, gran número de espiras) y debido a un entrehierro relativamente largo y a las pérdidas en hierro y en cobre, en la práctica el máximo ángulo de desfase (φ_u) entre U e I_u es de 70° . Además, debido a varios factores, los flujos ϕ_u y ϕ_i no están exactamente en fase con sus respectivas corrientes magnetizantes (I e I_u).

Diagrama vectorial

La figura IV-4 muestra un diagrama vectorial de un sistema primario (no corregido). En este diagrama aparecen las siguientes magnitudes representadas por sus respectivos vectores:

- U — tensión de la red a la cual está conectada la bobina del electroimán de tensión (1) y el receptor;
- I — intensidad de la corriente que circula por la bobina del electroimán de intensidad (3) y por el receptor;
- I_u — intensidad de la corriente que circula por la bobina del electroimán de tensión ($I_u = \frac{U}{Z_u}$). Esta corriente debería estar desfasada 90° con respecto a la tensión U , pero debido a lo expuesto anteriormente, $\varphi_u < 90^\circ$;

- ϕ_u — flujo magnético originado por el electroimán de tensión; al atravesar el disco el flujo induce en él la fem de Foucault E_{Du} (90° con respecto a ϕ_u), y las corrientes de torbellino I_{Du} ;
- ϕ_i — flujo magnético originado por el electroimán de intensidad; al atravesar el disco el flujo induce en él la fem de Foucault E_{Di} (90° con respecto a ϕ_i), y las corrientes de torbellino I_{Di} ;

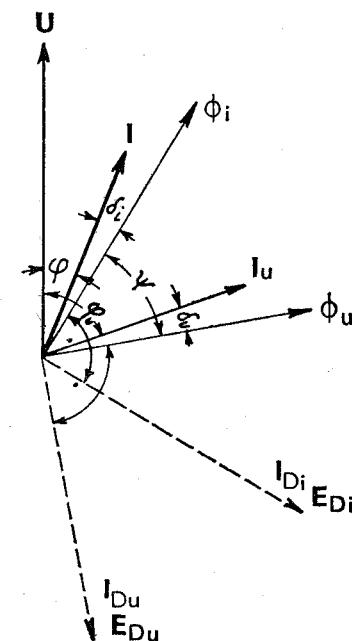


Figura IV-4.

- ϕ_i — ángulo de desfase entre la tensión U y la intensidad I del receptor ($\cos \varphi = \text{factor de potencia del receptor}$);
- ϕ_u — ángulo de desfase (interno) entre la tensión U y la intensidad I_u de la bobina de tensión;
- δ_i , δ_u — ángulos de error de los flujos ϕ_i y ϕ_u con respecto a sus corrientes magnetizantes.
- Ψ — ángulo de desfase entre los flujos ϕ_u y ϕ_i . Este ángulo debe ser de 90° cuando el ángulo de desfase φ es igual a cero y $\Psi = 90^\circ - \varphi$ con cualquier otro valor de φ (fig. IV-3).

Para lograr la proporcionalidad de las indicaciones del medidor

a la potencia activa, es imprescindible corregir los errores originados por el sistema motor que surgen del análisis del diagrama vectorial de la figura IV-4. Los errores más importantes se deben al ángulo $\phi < 90^\circ$ y a los ángulos δ_u y δ_i de desfases entre los flujos y sus respectivas corrientes magnetizantes (I e I_u). Más adelante se estudiarán los métodos y dispositivos de corrección que se emplean.

La figura IV-5, muestra la forma aproximada del equipo motor de un medidor marca AEG. Esta forma es típica para la mayoría de

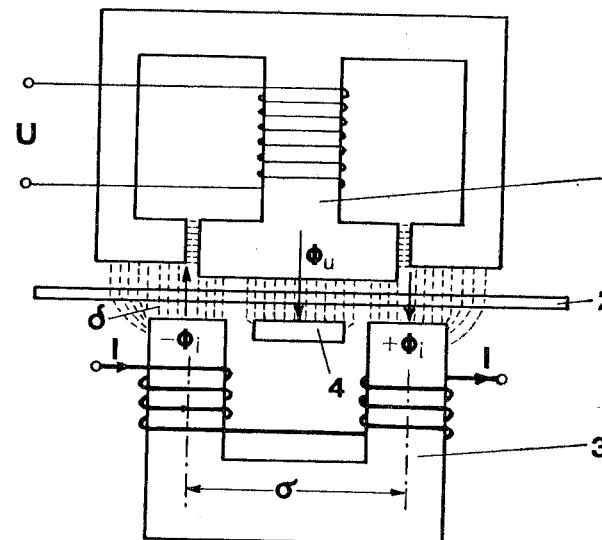


Figura IV-5.

los medidores de energía de distintas marcas. Las diferencias existen únicamente en las dimensiones de los entrehierros y en la forma de los polos. Como se puede apreciar en la figura, los flujos de tensión Φ_u y de intensidad Φ_i están señalados por separado, pero ambos actúan en conjunto en la formación de las características magnéticas del circuito. Los símbolos Φ_u y Φ_i significan los componentes activos de los flujos que atraviesan el disco y que inducen en él las corrientes de Foucault que originan el par motor. Las cifras tienen el mismo significado que en la figura IV-1.

Momento o par motor

Para determinar el par o momento motor del sistema se parte de la ecuación básica del instrumento de inducción de dos flujos (tomo I, Capítulo VII):

$$M_T = C \cdot f \cdot \Phi_u \cdot \Phi_i \cdot \sin(\hat{\phi}_u, \hat{\phi}_i)$$

donde Φ_u y Φ_i son dos flujos magnéticos que atraviesan el disco-rotor y que están desfasados, f es la frecuencia de los flujos y C es la constante que depende de la construcción del medidor.

El disco rotor (2) del medidor está atravesado por los tres flujos magnéticos: $+\Phi_u$; $+\Phi_i$ y también $-\Phi_i$ (fig. IV-6), lo que significa que existen tres momentos parciales:

$$M_1 = C_1 \cdot f \cdot \Phi_u \cdot \Phi_i \cdot \sin(\hat{\phi}_u, \hat{\phi}_i)$$

$$M_2 = C_2 \cdot f \cdot \Phi_u \cdot (-\Phi_i) \cdot \sin(\hat{\phi}_u, -\hat{\phi}_i)$$

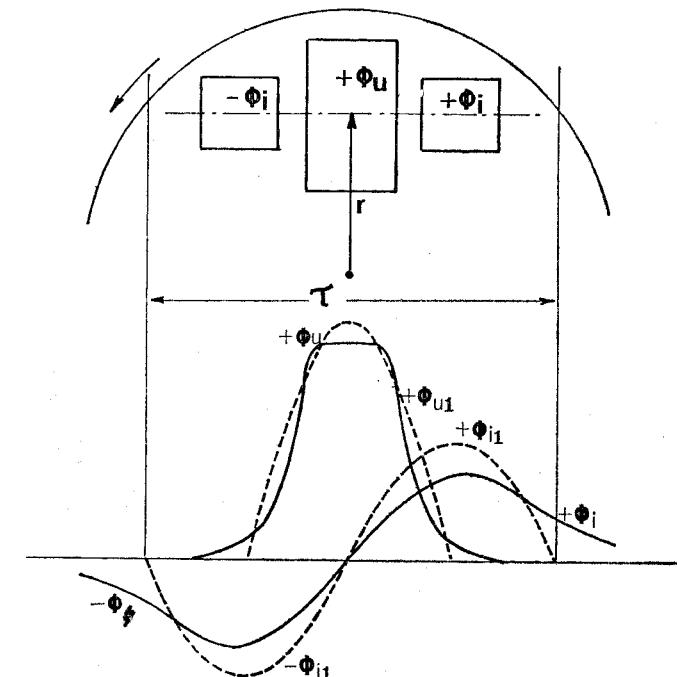


Figura IV-6.

$$M_3 = C_3 \cdot f \cdot \phi_i (-\phi_i) \cdot \sin(\phi_i - \hat{\phi}_i)$$

Los momentos actúan en la dirección desde el flujo adelantado hacia el flujo atrasado. El ángulo de desfase entre ϕ_i y $-\phi_i$ es de 180° de modo que $\sin(\phi_i - \hat{\phi}_i) = \sin 180^\circ = 0$. En consecuencia, $M_3 = 0$. Los dos momentos restantes M_1 y M_2 se suman originando el momento resultante M_T que impulsa el disco.

$$M_T = M_1 + M_2$$

sustituyendo tenemos:

$$M_T = C_1 \cdot f \cdot \phi_u \cdot \phi_i \cdot \sin(\phi_u - \hat{\phi}_i) + C_2 \cdot f \cdot \phi_u \cdot (-\phi_i) \cdot \sin(\phi_u - \hat{\phi}_i)$$

Suponiendo que el ángulo entre los flujos ϕ_u y ϕ_i es Ψ .

Finalmente se obtiene:

$$M_T = C \cdot f \cdot \phi_u \cdot \phi_i \sin \Psi$$

Para simplificar se admite que la función $\phi = f(I)$ es lineal, de modo que

$$\phi_i = k_i \cdot I$$

También se considera que:

$$\phi_u = k_u \cdot I_u$$

donde $I_u = \frac{U}{Z_u}$ y Z_u es la impedancia de la bobina del electroimán de tensión. Por ser la resistencia activa del arrollamiento muy pequeña en comparación con su resistencia reactiva ($R \ll L\omega$) se puede considerar:

$$Z_u = 2\pi \cdot f \cdot L$$

y sustituyendo tenemos

$$\phi_u = k_u \cdot I_u = k_u \frac{U}{Z_u} = \frac{k_u \cdot U}{2\pi \cdot f \cdot L}$$

Sustituyendo los valores de ϕ_i y ϕ_u en la ecuación del par motor se obtiene:

$$M_T = C \cdot f \cdot \frac{k_u \cdot U}{2\pi \cdot f \cdot L} \cdot k_i \cdot I \sin \Psi = C_N \cdot U \cdot I \cdot \sin \Psi$$

Como ya se ha expuesto anteriormente, la condición para que el par motor sea proporcional a la potencia activa es:

$$\Psi = 90^\circ - \phi$$

$$M_T = C_N \cdot U \cdot I \cdot \sin(90^\circ - \phi) = C_N \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi = C_N \cdot P$$

Para que el ángulo Ψ sea realmente igual a $90^\circ - \phi$ se emplean artificios con el fin de poder ajustar el ángulo entre ϕ_i y ϕ_u . Esto se consigue bifurcando el flujo total ϕ_{ut} , producido por la bobina de tensión, en dos partes: en un flujo derivado o flujo shunt ϕ_{sh} y en un flujo activo ϕ_u , que atraviesa el disco-rotor. En el ejemplo de la figura IV-7 a el flujo shunt ϕ_{sh} está dividido en dos partes iguales $\phi_{sh} = \frac{\phi_{sh}}{2} + \frac{\phi_{sh}}{2}$ debido a la construcción del medidor tomado como ejemplo. De esto resulta:

$$\phi_{ut} = \phi_u + \phi_{sh}$$

La figura IV-7 b muestra el diagrama vectorial en el cual se pue- de apreciar la corrección del flujo producido por la bobina de tensión.

Se supone una carga reactiva que origina el desfase del ángulo ϕ entre la tensión U y la corriente I y con un ángulo δ_i entre I y ϕ_u . Debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre, el ángulo entre la tensión U y la corriente I_u en la bobina de tensión será $< 90^\circ$. Con respecto a esta corriente I_u el flujo shunt ϕ_{ush} acusa un retraso relativamente pequeño, mientras el flujo ϕ_u está cargado; además, con las corrientes inducidas en el disco su retraso con respecto a I_u es mayor. La suma geométrica de estos dos flujos es igual a ϕ_{ut} . Del diagrama se deduce que para cumplir la condición $\Psi = 90^\circ - \phi$, el ángulo entre la tensión U y el flujo ϕ_u debe ser $90^\circ - \phi$, es decir, $> 90^\circ$.

Los retrasos de los flujos parciales ϕ_u y ϕ_{ush} con respecto a la corriente I_u pueden ser regulados colocando espiras en cortocircuito (6 en la fig. IV-7 a) que hacen aumentar el ángulo entre I_u y ϕ_{ush} , disminuyendo así el ángulo Ψ . También se obtiene una regulación de este ángulo variando el entrehierro d del circuito magnético shunt.

Los medios de regulación descritos pueden ser empleados por separado o bien combinados y sirven para el ajuste del medidor. Se consigue un ajuste fino con unas espiras (7) sobre el núcleo del electroimán de intensidad y una resistencia variable (R) (fig. IV-7 a). Con ello se regula el ángulo δ_i y el flujo ϕ_i . También se utiliza un shunt magnético (5) en el núcleo del electroimán de intensidad.

Momentos o pares de frenado

Cuando el medidor está en marcha, el par motor M_T está equilibrado por el momento de frenado M_F , el cual proviene principalmente del imán de freno. Además, se originan otros momentos de frenado eléctrico adicionales, debidos a los flujos de tensión ϕ_u y

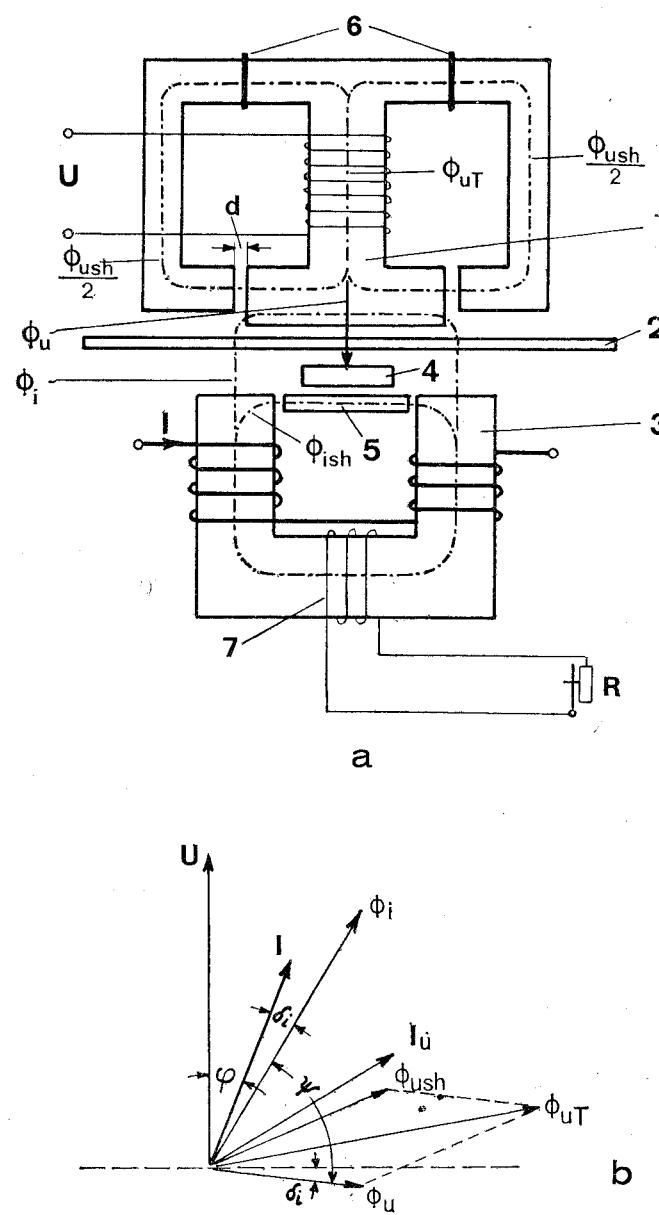


Figura IV-7.

de intensidad ϕ_i . Finalmente, se debe tener en cuenta un pequeño frenado originado por fricción en distintas partes móviles del medidor (cojinetes y numerador). En consecuencia, el frenado total debe a la suma de todos estos momentos parciales:

$$M_F = M_{F, im} + M_{F, i} + M_{F, u} + M_{F, fr}$$

El momento de frenado $M_{F, im}$ del imán de freno (2) en la figura IV-8 depende de su flujo ϕ_{im} y de la velocidad del disco (1) en la zona de influencia del imán (ver: Dispositivos amortiguadores, en el capítulo III del primer tomo de la presente obra). Al girar el disco (1)

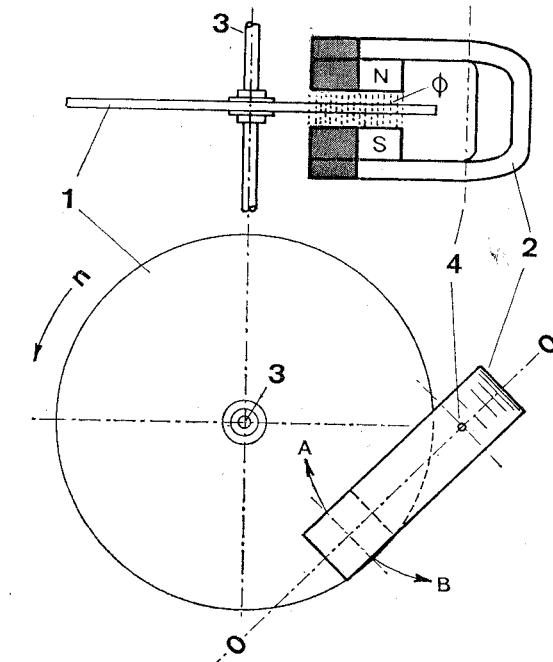


Figura IV-8.

se genera en él una fuerza electromotriz E_D , que provoca una corriente de Foucault I_D . La fem E_D es proporcional al flujo del imán ϕ_{im} y a la velocidad del disco v :

$$E_D = c_1 \cdot \phi_{im} \cdot v$$

donde c_1 es una constante que depende de las características constructivas del medidor. La corriente de Foucault es proporcional a la fem E_D :

$$I_D = c_2 \cdot E_D = c_1 \cdot c_2 \cdot \Phi_{im} \cdot v$$

Esta corriente origina con el flujo Φ_{im} un momento torsional en el disco, opuesto al sentido de rotación:

$$\begin{aligned} M_{F, im} &= c_3 \cdot I_D \cdot \Phi_{im} = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi_{im}^2 \cdot v \\ M_{F, im} &= c_4 \cdot \Phi_{im}^2 \cdot v \end{aligned}$$

Con una determinada potencia constante, el par motor M_T es igual al momento de frenado total M_F , siendo uniforme la velocidad angular del disco. El momento de frenado depende de la posición del imán, es decir, de la velocidad de la porción del disco abarcada por él y, por consiguiente, moviendo el imán, se puede variar el momento de frenado $M_{F, im}$ y con ello la velocidad angular del disco, sin que varíe la potencia medida.

En la figura IV-8 el imán está colocado en la posición 0-0, que corresponde al máximo valor del momento de frenado $M_{F, im}$. Al desplazar el imán girándolo alrededor del punto 4 en el sentido señalado por la flecha A, disminuye el frenado debido a la disminución de la velocidad de desplazamiento de la porción del disco abarcada por los polos del imán. También se puede disminuir el momento de frenado desplazando el imán en el sentido señalado por la flecha B, debido a la disminución de la superficie de los polos que actúa sobre el disco. En los medidores de energía, se utiliza para la regulación el desplazamiento del imán en el sentido señalado por la flecha A.

Los momentos de frenado adicionales $M_{F, u}$ y $M_{F, i}$ dependen de la tensión U y de la intensidad I respectivamente. Por esto, el momento $M_{F, u}$ sólo varía con la velocidad v ya que la tensión U y el flujo Φ_u son por lo general constantes, mientras que el momento $M_{F, i}$ varía además con la intensidad de corriente de carga I . Debido a ésta se puede producir un frenado excesivo con cargas grandes. Este frenado adicional se corrige automáticamente mediante un shunt magnético (5 en fig. IV-7 a) para el flujo magnético Φ_i . Con intensidades cuyo valor no sobrepasa el valor nominal, el flujo Φ_i que traspasa el disco (2) es proporcional al flujo total Φ_{it} y a la corriente I . Con grandes intensidades, el shunt (5) queda saturado y el flujo Φ_i crece más de lo que corresponde. De este modo se compensa el aumento del momento de frenado $M_{F, i}$.

El momento de frenado $M_{F, fr}$ originado por las fricciones mecánicas es aproximadamente constante y su influencia en el valor del error es importante cuando el medidor funciona con una fracción

de su potencia nominal. Como ya se ha mencionado, el momento $M_{F, fr}$ depende de la construcción y del estado de los cojinetes y del engranaje del numerador. También depende este momento de la temperatura ambiente, de la posición del medidor y de la velocidad del disco-rotor.

Para compensar los errores originados por la fricción, especialmente con cargas pequeñas en las que además se hace notar la falta de linealidad de la curva de permeabilidad del material del núcleo del electroimán de intensidad, se crea un pequeño momento motor adicional utilizando uno de los procedimientos que muestra la figura IV-9, en la que a es un tornillo en el polo del electroimán de tensión; b muestra una chapita de cobre atravesada por una fracción del flujo Φ_u ; c es un entrehierro desigual y d es un trozo de acero de baja saturación, colocado cerca del polo.

Todos estos elementos, aplicados en el polo del electroimán de tensión, cuyo flujo Φ_u es constante, dividen este flujo y originan así un pequeño par motor constante, cuya influencia sólo es apreciable cuando el medidor funciona con cargas pequeñas, es decir, con un momento M_T relativamente débil.

Influencia de las variaciones de los parámetros

Como ya se ha expuesto, el momento total de frenado es la suma de cuatro momentos parciales, de los cuales el momento principal $M_{F, im}$ es proporcional al número de revoluciones del disco y, una vez ajustado el imán en su posición correcta, no presenta dificultades durante el funcionamiento normal del medidor. La calidad principal que se exige de este imán es que no envejezca, es decir, que su flujo magnético sea constante en el tiempo y que al estar sometido a influencias exteriores varíe lo mínimo posible.

De los tres momentos de frenado restantes, dos pueden influir considerablemente en la exactitud de las indicaciones del medidor: el momento de fricción $M_{F, fr}$ y el momento $M_{F, i}$, producido por el flujo Φ_i . Este momento aumenta cuadráticamente con el flujo Φ_i y resulta excesivo con corrientes mayores que las nominales del medidor. Ya se ha expuesto cómo se consigue compensar, hasta cierto límite, los errores originados por el aumento de este flujo.

El momento $M_{F, fr}$, en cambio, es constante y su influencia se hace notar con muy bajas intensidades cuando el momento motor M_T es el valor comparable con el valor del momento $M_{F, fr}$. Como se ha visto, el momento $M_{F, fr}$ puede ser compensado, por un momento motor adicional, que depende del flujo Φ_u . Este momento adicional no debe ser tan grande que el disco gire en vacío en el caso de sobreten-

sión. Generalmente, la reglamentación oficial exige que un aumento de la tensión nominal (15 a 20 % según las normas aplicadas en cada país), no haga girar el disco, estando el circuito de intensidad desconectado.

Cuando el medidor funciona a una fracción de su potencia nominal, el flujo Φ_i resulta demasiado pequeño en comparación con el flujo Φ_u que se produce cuando el medidor funciona con su potencia nominal. Esto origina errores negativos. El momento motor adicional, que contrarresta los efectos del frenado por fricción (fig. IV-9), también actúa en el sentido de corregir los errores originados por el electroimán de intensidad.

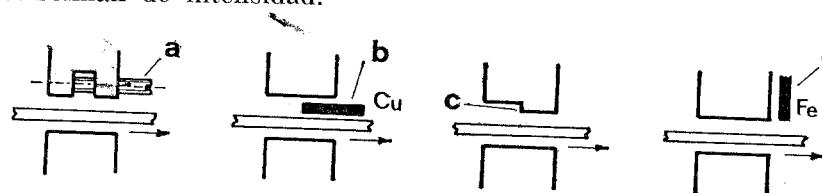


Figura IV-9.

Teóricamente las indicaciones del medidor deben ser proporcionales a la tensión de la red aun cuando ésta no sea constante. En realidad la tensión varía siempre, pero la influencia de estas variaciones es despreciable mientras las variaciones de la tensión se mantengan dentro de los límites establecidos ($\pm 10\%$). El aumento de la tensión hace aumentar el flujo Φ_u y con ello el momento de torsión o par motor, pero en mayor cuantía aumenta también el momento de frenado $M_{F,u}$ (por ser proporcional al cuadrado del flujo Φ_u) y el medidor registra menos energía de la que en realidad se consume; en el caso de una disminución de la tensión, el medidor registra más energía de la consumida.

Las variaciones de la frecuencia tienen poca influencia sobre las indicaciones de los medidores cuando éstos se conectan en las redes de frecuencia constante. El par motor $M_T = C \cdot f \cdot \Phi_u \cdot \Phi_i \cos \phi$ donde el flujo de tensión Φ_u es inversamente proporcional a la frecuencia y, en consecuencia el producto $f \cdot \Phi_u$ queda constante. Los errores originados son positivos con frecuencias superiores a la nominal y negativos con frecuencias inferiores.

La elevación de la temperatura aumenta la resistividad y, en consecuencia, la resistencia de los conductores y del disco. La mayor influencia de la temperatura es la que ejerce sobre el flujo del imán de freno. Con mayor temperatura disminuye su flujo, en grado que depende del tipo de la aleación del imán. En consecuencia, debido al

aumento de la resistencia del arrollamiento de tensión y de la resistencia del disco y la disminución del momento de frenado, se origina un error negativo que se compensa por medio de un pequeño shunt magnético, cuya permeabilidad varía de modo inversamente proporcional a la temperatura. Si la temperatura aumenta 10°C , el flujo del imán permanente disminuye alrededor de 0,3 %. Por ser el momento de frenado $M_{F,im}$ proporcional al cuadrado del flujo, el momento de frenado disminuye en 0,6 % aproximadamente. En consecuencia el disco gira con un aumento de 0,6 % del número de sus revoluciones, lo que produce un error positivo del correspondiente valor.

Partes componentes

Las principales partes componentes de un medidor de energía se dividen según su función en el sistema, de modo que se tiene:

- Partes del sistema motor (estator)
- Rotor y cojinetes
- Imán de freno
- Mecanismo numerador-integrador

PARTES DEL SISTEMA MOTOR

El estator del sistema motor está compuesto por el núcleo de electroimán de intensidad y por el núcleo de electroimán de tensión. Según la marca y el modelo del medidor, estos dos elementos están construidos por separado o forman una sola pieza. La figura IV-10

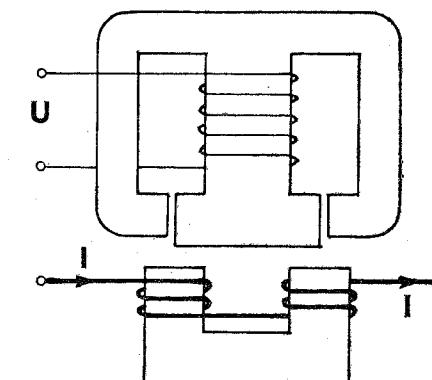


Figura IV-10.

y la figura IV-11 muestran los núcleos de ambos electroimanes construidos por separado (AEG y FUJI) y las figuras IV-12 y IV-13, muestran los núcleos de una sola pieza (GENERAL ELECTRIC y UHER), respectivamente. El material que se utiliza para la confección de núcleos es la

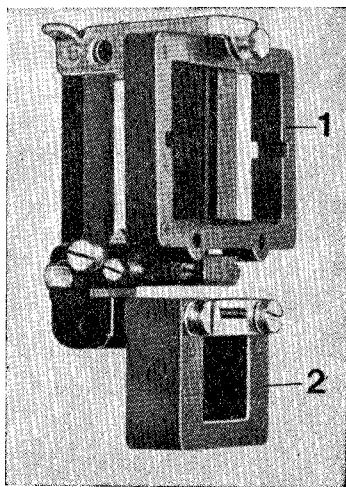


Figura IV-11.

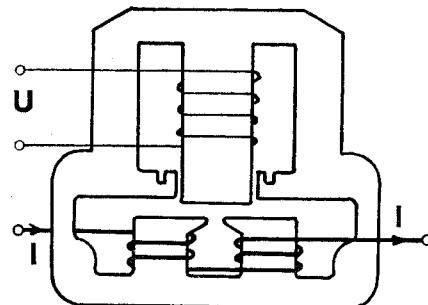


Figura IV-12.

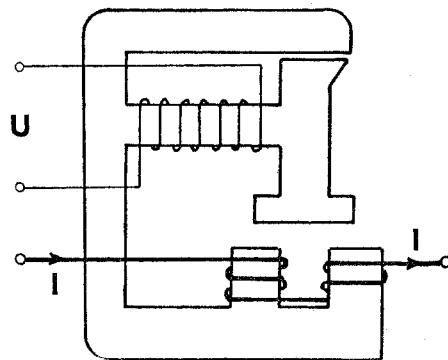


Figura IV-13.

minación de chapa magnética de alta inducción magnética y de permeabilidad lo más constante posible. Esta última característica tiene una gran importancia ya que condiciona el cumplimiento de $\frac{\phi}{I} \approx \text{constante}$

tante en el electroimán de intensidad. En un núcleo magnético ~~construido~~ (sin entrehierro) esta condición se cumple únicamente en la parte recta de la curva de histéresis. El entrehierro, relativamente largo, que contiene el núcleo de los electroimanes del medidor es causa de alargamiento de la parte recta de la correspondiente curva de magnetización. Debido a la construcción especial de los electroimanes del sistema motor, se obtiene la relación $\frac{\phi}{I} \approx \text{constante}$, dentro del alcance de medición del medidor de energía.

Lo expuesto es también válido para el electroimán de tensión en el cual se requiere que $\frac{\phi}{I}$ sea constante. El flujo total ϕ_{ut} generado en el electroimán de tensión se bifurca (fig. IV-7) en el flujo ϕ_u y el flujo derivado por el shunt magnético ϕ_{ush}

$$\phi_{ut} = \phi_u + \phi_{ush}$$

Para que el flujo ϕ_u , que actúa sobre el disco, sea también proporcional a la tensión U , se requiere que $\frac{\phi_u}{I_u} = \text{constante}$, lo cual se consigue utilizando uno de los sistemas representados en la figura IV-9.

Sobre los núcleos de los electroimanes de tensión y de intensidad están colocadas las bobinas de tensión y de intensidad respectivamente. La bobina de tensión, colocada sobre su respectivo núcleo, debe caracterizarse por una gran impedancia. Como se ha explicado anteriormente es imprescindible que este electroimán tenga la impedancia totalmente inductiva, o sea que la intensidad de corriente I_u que circula por la bobina quede desfasada 90° con respecto a la tensión de la red aplicada U . Esto no sucede debido a que la bobina tiene un gran número de espiras y, por tanto, una considerable resistencia óhmica (entre 300 y 600 Ω). Esta resistencia depende del modelo, marca y tensión nominal del medidor. El máximo desfase que se consigue entre la tensión U y la corriente magnetizante I_u en este electroimán es del orden de 80° . El desfase adicional para que se completen los 90° requeridos se obtiene con dispositivos adicionales que se explicarán a continuación. También, debido a que la bobina de tensión está conectada permanentemente a la red, es de mucha importancia que la potencia que disipa sea lo menor posible.

Por lo general, las bobinas de tensión de los medidores disipan 1 W por cada 100 V de la tensión nominal. La figura IV-14 muestra la bobina de tensión, sin y con núcleo, de un medidor marca AEG.

Sobre el núcleo del electroimán de intensidad está colocado el

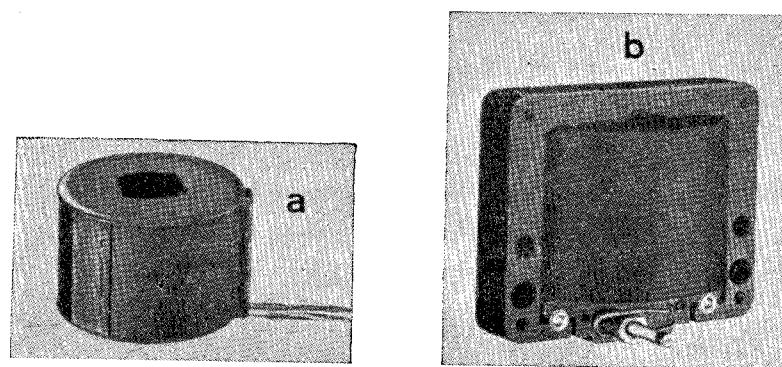


Figura IV-14.

arrollamiento de intensidad confeccionado con el alambre de cobre esmaltado, perfilado en los casos de intensidades mayores de 10 A (fig. IV-15). Su sección está sobredimensionada para disminuir la disipación de potencia en esta bobina. La potencia disipada también varía con la marca, modelo y la intensidad nominal del medidor. Tomando como ejemplo los datos de un medidor monofásico de marca G.E.C. (Inglaterra), se ve que las pérdidas por la potencia disipa-

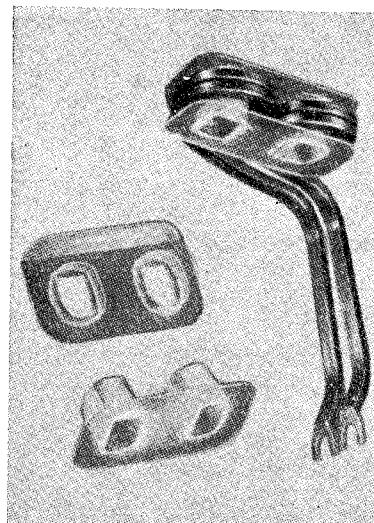


Figura IV-15.

da en las bobinas de intensidad no sobrepasan 6,30 W, como valor medio.

Para los ajustes finales y exactos del desfase de 90° entre los flujos magnéticos Φ_u y Φ_i , lo que teóricamente equivale al ajuste de desfase entre la tensión U y la corriente magnetizante I_u , se utilizan varios métodos. Del análisis del diagrama vectorial de la figura IV-4 se deducen varios medios de obtención del ángulo $\Psi = 90^\circ$. Una posibilidad es operar en el circuito magnético del electroimán de tensión y la otra en el circuito magnético del electroimán de intensidad o en ambos. A continuación se mencionan los métodos más frecuentemente usados:

1. Espiras en cortocircuito sobre la parte que actúa como shunt magnético sobre el núcleo del electroimán de tensión (6 en la fig. IV-7).
2. Algunas espiras colocadas sobre el núcleo del electroimán de tensión cortocircuitadas por una resistencia regulable.
3. Regulación del entrehierro d del shunt magnético del núcleo del electroimán de tensión (figs. IV-10, IV-12 y IV-13).
4. Bobina de pocas espiras colocadas sobre el núcleo del electroimán de intensidad, cortocircuitada por una resistencia variable (7 en fig. IV-7 y fig. IV-16).

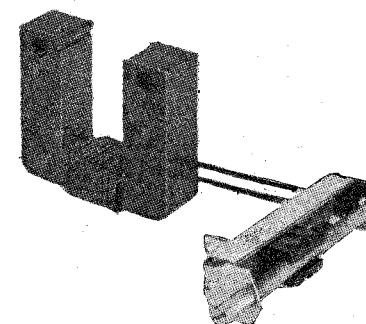


Figura IV-16.

5. Regulación mediante un shunt magnético variable entre los polos del núcleo del electroimán de intensidad (5 en fig. IV-7).
6. Una chapita regulable de cobre introducida en el entrehierro (fig. IV-9 b).

La figura IV-17 muestra varios ejemplos del sistema motor completo (núcleo con bobinas de tensión y de intensidad colocadas), utili-

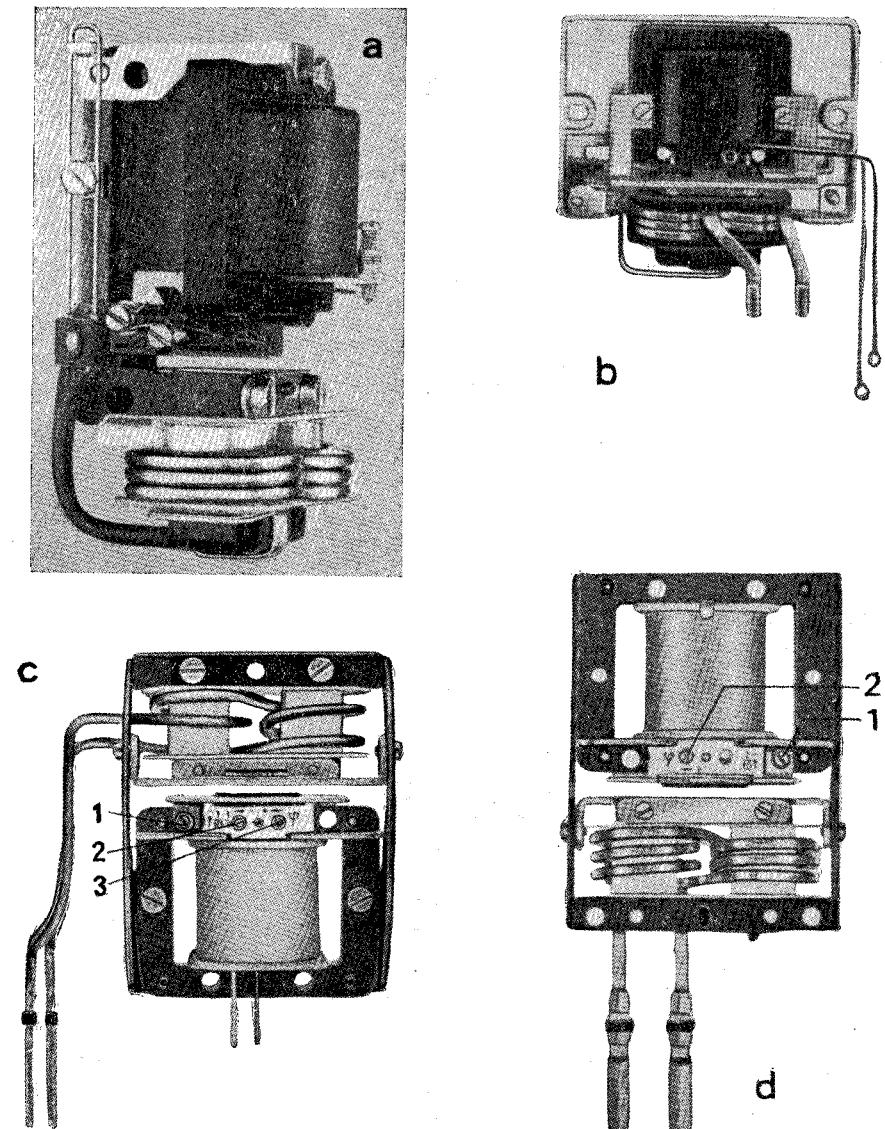


Figura IV-17.

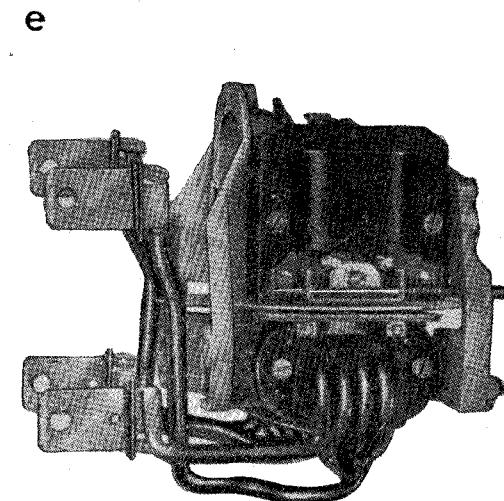


Figura IV-17 (continuación).

zados en la fabricación de los medidores de energía por las siguientes firmas: *a, b*: AEG (Alemania); *c, d*: DANUBIA ZÄHLER (Austria); *e*: SANGAMO (Canadá).

ROTOR Y COJINETES

El rotor es un disco de aluminio que gira a bajo número de revoluciones por minuto. La velocidad nominal de giro del rotor del medidor es el número de revoluciones por minuto del disco al aplicar al medidor la tensión U nominal, la intensidad de corriente I nominal y el factor de potencia del receptor $\cos \phi = 1$. Es obvio que la velocidad de giro será inferior a la nominal cuando los valores de los parámetros enumerados sean inferiores a los nominales. Para la orientación del lector, la tabla IV-1 a continuación contiene las velocidades nominales y los pesos de los rotores en las distintas marcas de los medidores monofásicos.

El disco (1), fig. IV-18 y IV-19 a estampado es de chapa de aluminio de un espesor no mayor de 1,5 mm. Está fijado sobre el eje provisto del sin fin (2) que engrana con el numerador. El sin fin puede ser postizo y de material plástico o fresado sobre el mismo eje. En la mayoría de los medidores el disco tiene estampada sobre su circunferencia una escala que tiene la finalidad de facilitar el contraste del medidor en serie. En medidores polifásicos se utilizan 2 o 3 discos colocados sobre el mismo eje (fig. IV-20). Los momentos motor

TABLA IV-1

MARCA	Velocidad nominal de giro en varios modelos (r.p.m.)	Peso neto del rotor (g)
AEG, Alemania	17,1 a 54,6	20
DANUBIA, Austria	8,8 a 27,5	22
THE ENGLISH ELECTRIC, Inglaterra	12 a 19	19,7 a 22,8
GENERAL ELECTRIC, U.S.A.	8,5	—
FUJI ELECTRIC CO. LTD. Japón	54 a 66	18,8
METRONEX - PAFAL, Polonia	12 a 16	25
SANGAMO, Canadá	9	18,4
UHER, Austria	28	18

originados por el sistema de cada fase se suman actuando sobre el mismo eje.

En el caso de un momentáneo aumento de la tensión de la red el dispositivo de compensación del momento de fricción (fig. IV-9), puede producir el movimiento del rotor (muy lento), a pesar de que no circula carga alguna. Para compensar este defecto, algunos de los

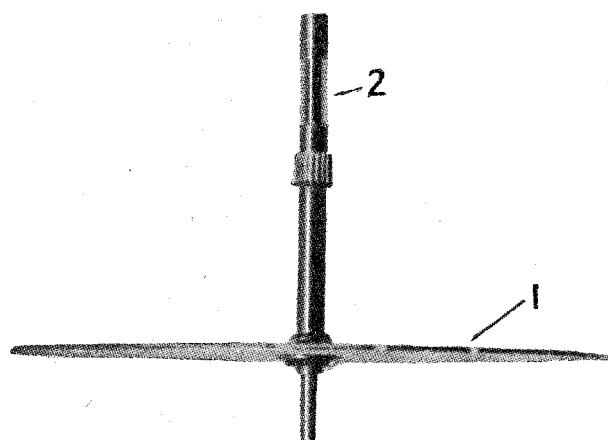


Figura IV-18.

TEORÍA Y CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DE ENERGÍA

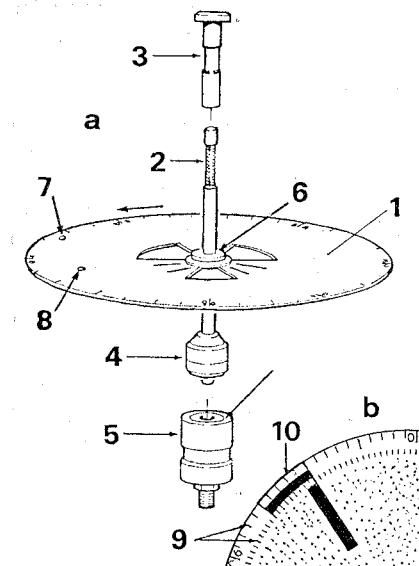


Figura IV-19.

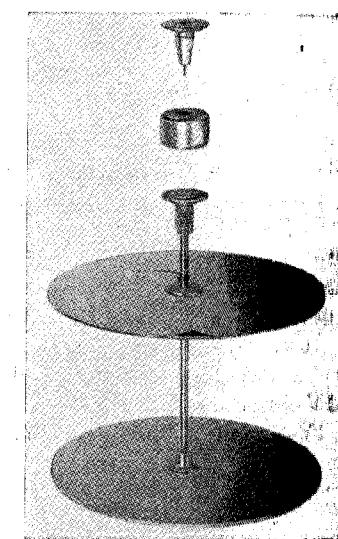


Figura IV-20.

medidores están provistos de un dispositivo adicional que consiste en una lengüeta de alambre o de lámina de hierro (3, fig. IV-21), fijada al eje del rotor (1). Otra lengüeta (4) está fijada sobre el núcleo (6) del electroimán de tensión y es excitada por el flujo Φ_{ut} originado por la bobina de tensión (5). El disco, al girar muy despacio, acerca

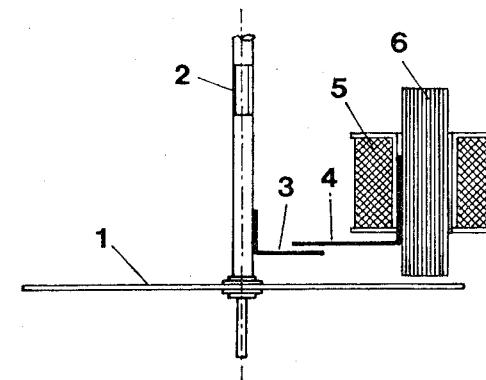


Figura IV-21.

la lengüeta móvil (3) a la lengüeta fija (4) y por la mutua atracción entre ambas se detiene. La lengüeta fija así una posición determinada de paro del rotor.

El medidor funciona durante largos períodos sin ninguna clase de mantenimiento y, por lo tanto, es de máxima importancia que con el tiempo no aumenten los errores adicionales que se deben a la fricción en el sistema (M_{fr}). Los errores por fricción se originan principalmente en los cojinetes y los fabricantes ponen mucho esmero en su diseño y su construcción. Del análisis del sistema desde el punto de vista mecánico se deduce que el rotor está apoyado sobre el cojinete inferior y el cojinete superior impide su inclinación. En consecuencia, el cojinete inferior reacciona a las fuerzas verticales y el superior a las laterales. Con este criterio están diseñados los sistemas de suspensión y en todos se trata de disminuir la presión que ejerce la presión del rotor sobre el cojinete inferior. Las figuras IV-22, IV-23 y IV-24 muestran 3 tipos de suspensión. La suspensión de la figura IV-22 es la típica en los medidores monofásicos (de un disco), en

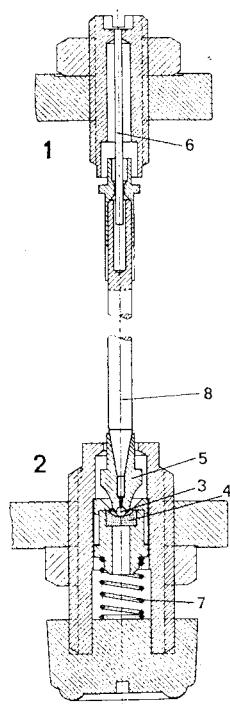


Figura IV-22.

1, cojinete superior; 2, cojinete inferior; 3, esfera del cojinete; 4, zafiro; 5, punta de apoyo; 6, perno de guía; 7, resorte de compresión; 8, eje del rotor.

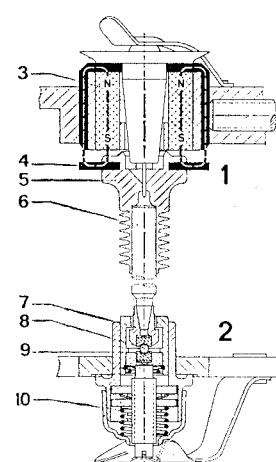


Figura IV-23.

1, cojinete superior; 2, cojinete inferior; 3, imán anular; 4, arandela de hierro dulce; 5, punta del eje con sin fin (de plástico); 6, eje del rotor; 7, punta del eje con zafiro; 8, esfera del cojinete; 9, zafiro inferior; 10, resorte de compresión.

los cuales el peso del rotor es reducido. Existen variantes, según la marca, pero en todos el eje del rotor descansa sobre una esfera en el cojinete inferior. Los detalles de la construcción se pueden apreciar en la figura. Las figuras IV-23 y IV-24 muestran los cojinetes con la suspensión magnética. Los cojinetes de la figura IV-23 son los utilizados por la firma AEG en los medidores trifásicos. El cojinete superior 1 contiene un imán anular (3) que tiende a levantar la aran-

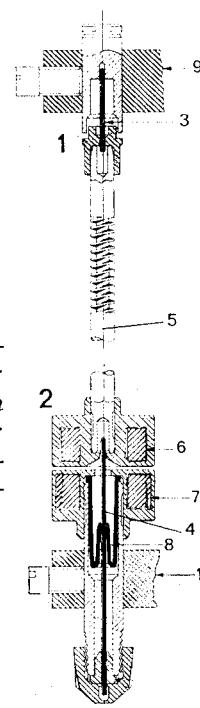


Figura IV-24.

1, cojinete superior; 2, cojinete inferior; 3, perno de guía superior; 4, perno de guía inferior; 5, eje con sin fin; 6, imán anular sobre el eje; 7, imán anular fijo; 8, soporte flexible; 9, soporte del cojinete; 10, soporte del cojinete.

da (4) de material no remanente, fijada a la punta del eje del rotor (con el sin fin) (5). La acción del imán origina una descarga del cojinete inferior 2, disminuyendo la presión del rotor sobre la esfera del cojinete.

Los cojinetes de la figura IV-24 son los utilizados por las firmas ENGLISH ELECTRIC, Inglaterra y FUJI ELECTRIC, Japón. En este sistema se obtiene la descarga del cojinete inferior mediante dos imanes anulares 6 y 7, uno sobre el eje del rotor y el otro sobre el cojinete, colocados en oposición polar (repulsión) y formando de este modo una "almohada magnética".

Imán de freno

El imán de freno es uno de los elementos más importantes del sistema de ajuste del medidor. De su posición y de la estabilidad de su flujo magnético depende el error principal del medidor; por lo tanto es muy importante que cumpla con unas determinadas características, a saber: alta estabilidad magnética, gran fuerza coercitiva y mínima sensibilidad a los cambios de temperatura. Se debe tener en cuenta la influencia de los campos magnéticos externos al imán, existentes dentro del sistema del medidor. Los núcleos de los imanes

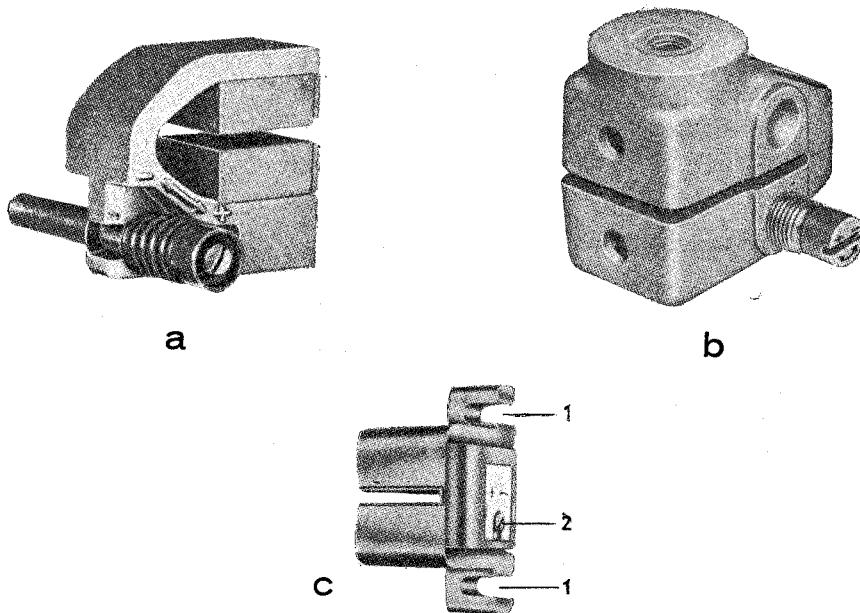
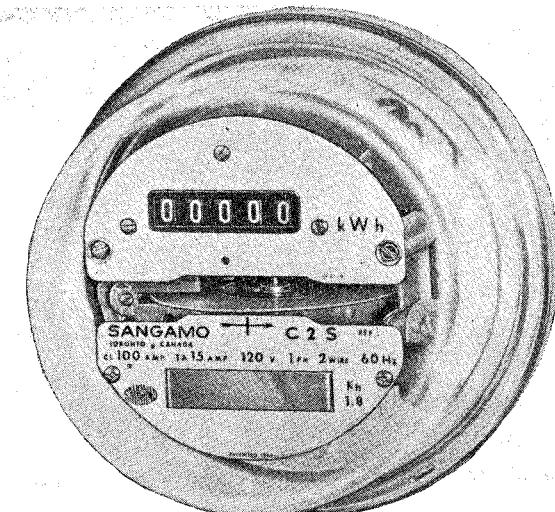
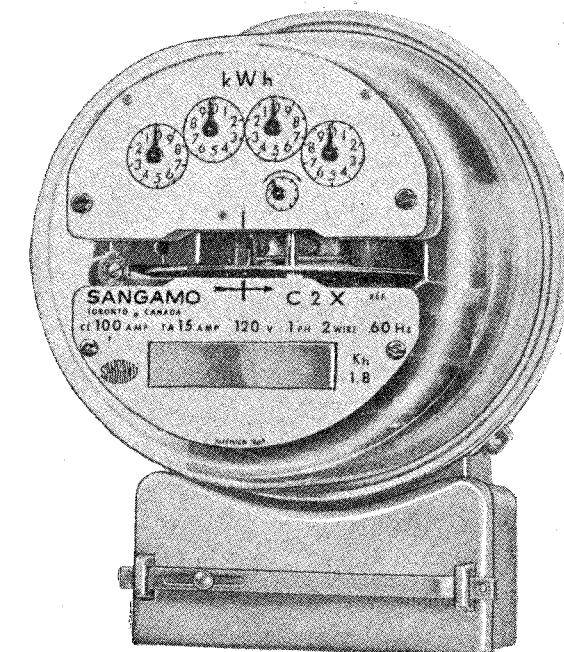


Figura IV-25.

tienen una sección longitudinal en forma de U (figura IV-25). Se los fabrica de las aleaciones de alnico, ya que este grupo de materiales se caracteriza por la estabilidad y fuerza coercitiva altas. Para la compensación de la influencia de temperatura, algunas firmas proveen al imán en su parte frontal de una placa de material magnético como un shunt magnético ajustable. El shunt magnético está confeccionado de una aleación cuya capacidad de conducción térmica disminuye con



a



b

Figura IV-26.

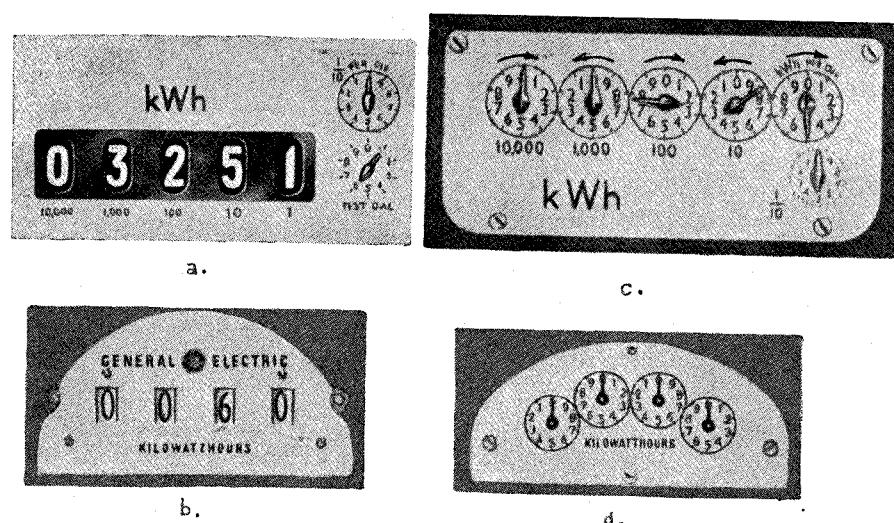


Figura IV-27.

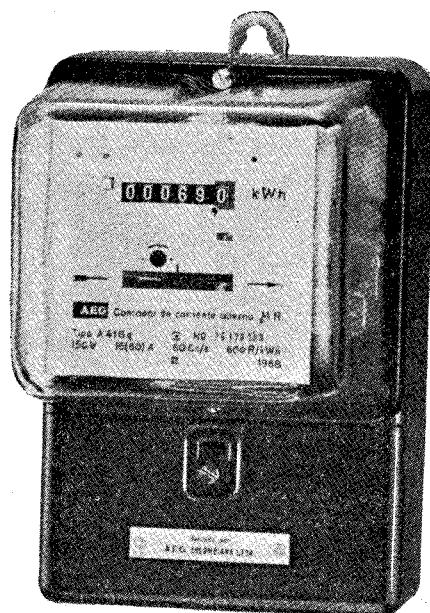


Figura IV-28.

mayor rapidez con el aumento de temperatura que el material del imán. De este modo la pérdida de flujo del imán de freno, que se presenta en temperaturas más elevadas, es compensada por el flujo del shunt.

Algunos medidores tienen colocada entre el imán del freno y la bobina de intensidad una pantalla magnética confeccionada de chapa de material de poca remanencia. Esta pantalla tiene la finalidad de proteger el imán contra el flujo magnético de la bobina de intensidad, lo que es especialmente importante en los casos de cortocircuitos o sobrecargas en la red. La pantalla impide la penetración de líneas magnéticas procedentes de la bobina de intensidad en el imán de freno.

Mecanismo registrador

Como ya se ha mencionado, el medidor de energía está provisto de un dispositivo capaz de sumar las vueltas efectuadas por el disco proporcionalmente a la energía suministrada al consumidor e indicarla en las unidades correspondientes (kWh; MWh). La constante nominal del medidor C_N está determinada por la relación de engranajes del numerador, y a ésta se ajusta, durante su contraste, el medidor de energía.

Existen dos tipos de numeradores en cuanto se refiere a su construcción y en consecuencia a la lectura. Uno denominado numerador de tambor o de disparo y el segundo, numerador de agujas o de esferas. El primer tipo, o sea el numerador de tambor, es de uso más frecuente y es el tipo que se utiliza en los países que fabrican instrumentos normalizados. El tipo de esferas está entrando ya en desuso; todavía se utiliza en los países anglosajones (USA, Canadá, Inglaterra). La figura IV-26 muestra dos medidores idénticos de marca SANGAMO (Canadá), con los dos tipos de numeradores. A primera vista se aprecia que la lectura del numerador de tambor (A) es mucho más rápida y cómoda; en cambio, la lectura del medidor (B) es más complicada. Al efectuar la lectura de este último hay que tener en cuenta que las agujas de distintas esferas giran en sentido contrario (tal como lo indican las flechas en la fig. IV-27 c), característica que se presta para cometer errores. La única ventaja del numerador de esferas sobre el numerador de tambor es que su momento de fricción es de valor muy pequeño. La figura IV-27 muestra distintos tipos de cuadrantes donde los ejemplos a y b pertenecen a los numeradores de tambor y los de las figuras c y d, a los numeradores de esferas. La figura IV-28 muestra un medidor monofásico marca AEG, provisto de un numerador de tambor.

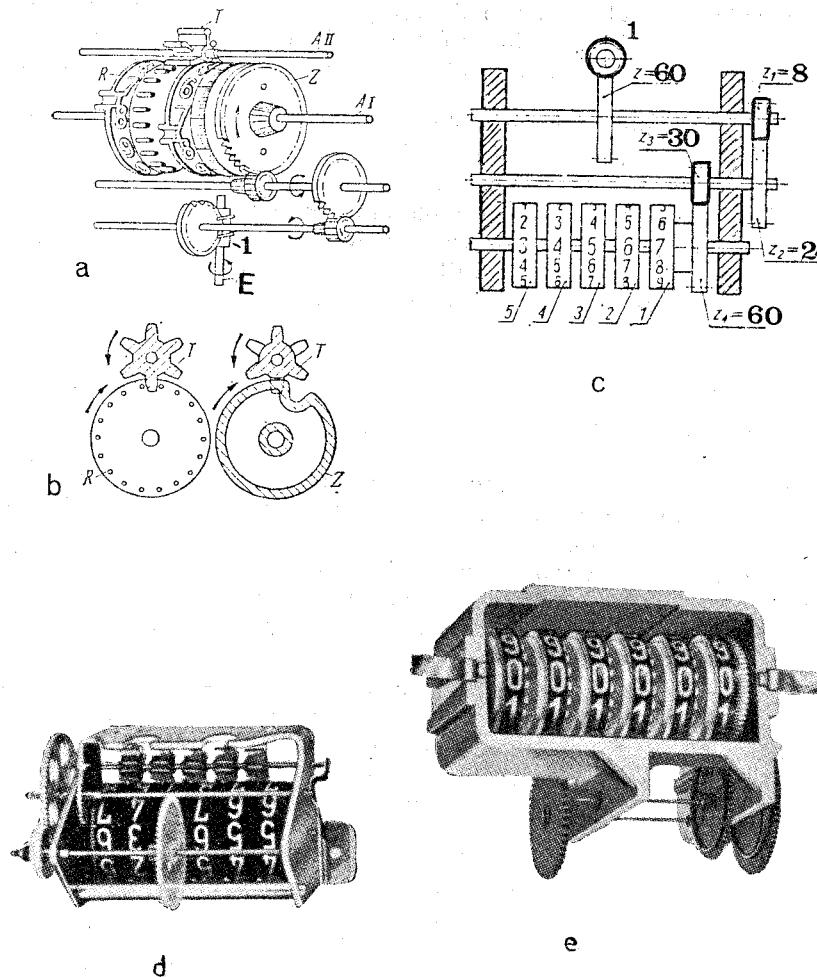


Figura IV-29.

La figura IV-29 muestra la construcción del registrador del tipo de tambor o de disparo. Se puede apreciar en la figura IV-29 a el tren de engranajes que interviene entre el sin fin (1) colocado sobre el eje (E) del rotor del medidor y el juego de tambores. En la figura IV-29 c se presenta el juego de 5 tambores, o sea de 5 dígitos que se observan durante la lectura. Sobre la circunferencia de cada uno de los tambores están grabadas cifras desde 0 a 9. Al realizar

el primer tambor una vuelta completa, el tambor siguiente salta por $\frac{1}{10}$ parte de su circunferencia (disparo). El sistema se puede apreciar en la figura IV-29 b. La figura IV-29 d muestra la vista posterior de un numerador y la IV-29 e un numerador visto de frente después de quitar el cuadrante.

La figura IV-30 muestra el tren de engranajes del numerador de tipo de esferas o agujas. Con la letra "E" está señalada la posición del eje del rotor y el sin fin y con la letra "A" el eje de la aguja indicadora de la primera esfera.

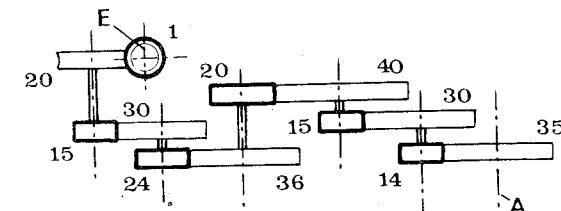


Figura IV-30.

La relación de engranajes del numerador determina la constante nominal C_N del medidor de energía al cual está destinado el numerador. A veces resulta conveniente determinar esta constante mediante el cálculo de engranajes.

Para determinar la constante C_N del medidor de energía a base de la relación de engranajes del registrador, se empieza determinando los engranajes conductores y engranajes conducidos. En las figuras IV-29 c y IV-30 los engranajes conductores están trazados con líneas gruesas y los engranajes conducidos con líneas finas. En la representación matemática, los numeradores de los quebrados representan los números de dientes de los engranajes conductores y los denominadores los números de dientes de los engranajes conducidos. El sin fin se considera como un engranaje cuyo número de dientes es igual a 1 salvo en los casos excepcionales en que se trata de los sin fin de dos o tres entradas. En estos casos el número de dientes del sin fin es de 2 o 3 respectivamente.

Ejemplo I. Registrador de la figura IV-29 c,

$$\frac{1}{60} \cdot \frac{8}{24} \cdot \frac{30}{60} = \frac{240}{86400} = 0,0027777 \text{ kWh/rev}$$

El valor inverso es la constante C_N

$$C_N = \frac{86400}{240} = \frac{1}{0,0027777} = 360 \text{ rev/kWh}$$

Ejemplo II. Registrador de la figura IV-30 (de esferas)

$$\frac{1 \ 15 \ 24 \ 20 \ 15 \ 14}{20 \ 30 \ 36 \ 40 \ 30 \ 35} = \frac{1}{600} = 0,0016666 \text{ kWh/rev}$$

$$C_N = 600 \text{ rev/kWh}$$

En la figura IV-31 se puede apreciar un numerador de esferas colocado en un medidor de energía marca SANGAMO (Canadá).

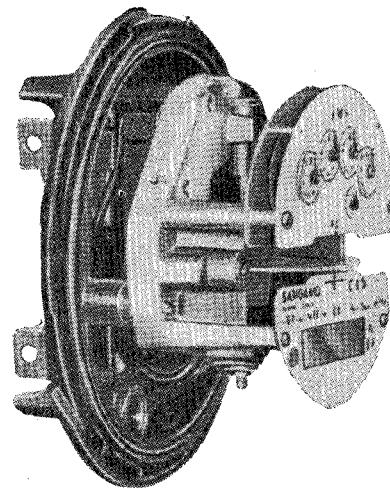


Figura IV-31.

En las figuras IV-32 y IV-33, se muestra el ejemplo de un típico medidor de energía monofásico construido según las normas internacionales. El medidor de las figuras es de marca AEG mod. A41G. La figura IV-32 muestra la sección del medidor en perspectiva y la figura IV-33 muestra el mismo medidor visto de frente, sin tapa.

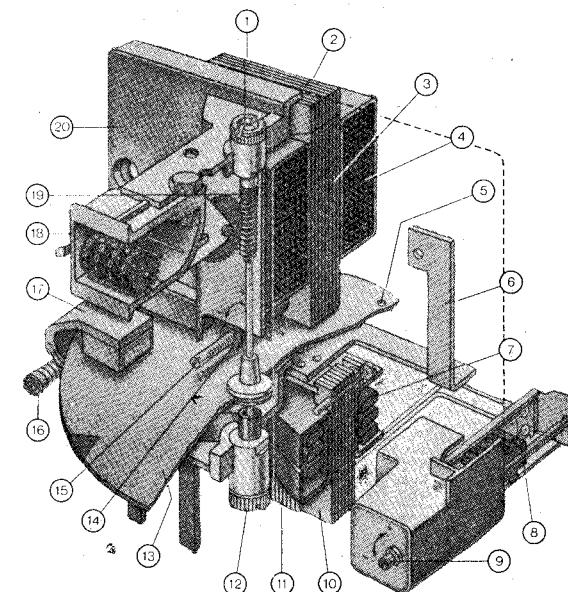


Figura IV-32. (Cortesía de AEG.)

1, cojinete superior; 2, núcleo de tensión exterior; 3, núcleo de tensión interior; 4, bobina de tensión; 5, orificio para el enclavamiento de la marcha libre; 6, arco de reacoplamiento; 7, bobina de corriente; 8, resistencia regulable; 9, tornillo de regulación para la compensación de fases; 10, núcleo de corriente; 11, devanado de compensación de desfase; 12, cojinete inferior; 13, rotor; 14, tubo de cobre (carga); 15, tornillo motriz; 16, tornillo de ajuste del imán; 17, imán de freno; 18, mecanismo contador; 19, casquillo del cojinete superior con sin fin; 20, soporte del mecanismo de medida.

Errores del medidor de energía

El medidor de energía, lo mismo que cualquier otro instrumento de medición, indica con error. El error del medidor depende de varios factores y existe un límite del valor del error admisible, el cual está determinado por las normas que rigen en cada país y su cumplimiento está controlado por las respectivas autoridades del departamento de pesos y medidas. En consecuencia el medidor debe ser verificado y contrastado antes de entrar en servicio y después en períodos determinados por la ley, por personal autorizado.

La verificación de un medidor consiste en la comprobación de la

velocidad del disco-rotor y el contraste en el ajuste y regulación de esta velocidad a la correcta, o sea a la velocidad nominal. La velocidad nominal del disco es la velocidad con la cual el medidor acusará sin error la energía consumida por una potencia nominal durante un tiempo determinado.

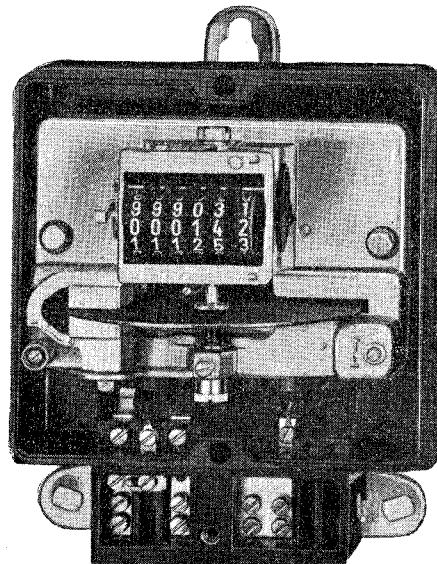


Figura IV-33.

El error de cualquier instrumento de medición y, por tanto, también del medidor de energía se expresa:

$$\delta \% = \frac{A_m - A_N}{A_N} \cdot 100$$

donde: A_m es lo que indica (valor medido)

A_N es lo que debe indicar (valor verdadero)

El contraste del medidor es la operación de su ajuste al número de vueltas que debe efectuar el disco cuando la energía medida $P \cdot t$ es 1 kWh. La constante nominal del medidor se expresará así:

$$C_N = \frac{\text{revoluciones}}{1 \text{ kWh}} = \frac{n}{P[\text{W}] \cdot t[\text{s}]} = \frac{n \cdot 1000 \cdot 3600}{1000 \cdot 3600}$$

Utilizando esta fórmula se puede calcular el tiempo que tardará el disco en efectuar n número de vueltas:

$$t[\text{s}] = \frac{3600 \cdot 1000 \cdot n}{P[\text{W}] \cdot C_N}$$

El error consiste en la diferencia que aparece entre el tiempo calculado t_N y el tiempo realmente transcurrido t_m en efectuarse n número de revoluciones (tiempo medido):

$$\delta \% = \frac{t_N - t_m}{t_N} \cdot 100 \quad (\text{error relativo})$$

De esto se deduce que la verificación y contraste se reducen a la medición del tiempo que tarda el disco en efectuar un determinado número de vueltas con una determinada carga conectada. Los detalles de las operaciones de verificación y ajuste se exponen en los capítulos siguientes, pero, por lo general, durante la prueba se emplea un número de vueltas del disco en las que no tarde más que un minuto aproximadamente. El número de vueltas más conveniente para la prueba se estima a base de las características dinámicas del disco (ver la Tabla IV-1), y al porcentaje de la carga nominal con la cual se efectúa la verificación.

Ejemplo: Verificar el error del medidor monofásico de las siguientes características: Marca FUJI ELECTRIC CO LTD.; $U_{\text{nom}} = 120 \text{ V}$; $I_{\text{nom}} = 10 \text{ A}$; $C_{\text{nom}} = 750 \text{ rev/kWh}$.

Se efectúa la verificación midiendo el tiempo que tarda el disco en dar 10 vueltas:

$$t_N = \frac{3600 \cdot 1000 \cdot 10}{120 \cdot 10 \cdot 750} = 40''$$

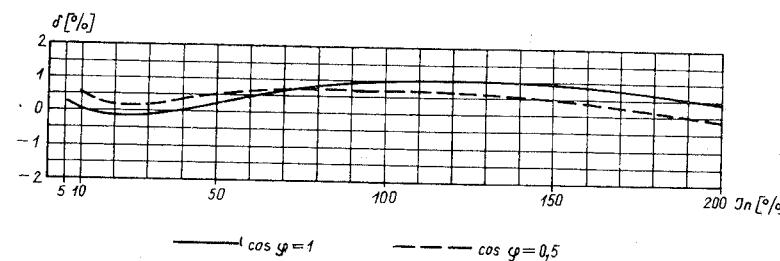
el tiempo medido es $t_m = 40,5''$.

El error del medidor es:

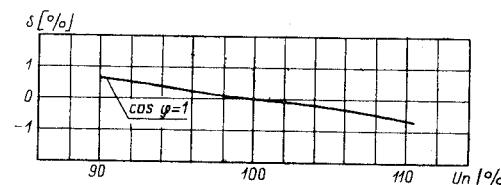
$$\delta \% = \frac{40,5 - 40}{40} \cdot 100 = 1,25 \%$$

El error, que es inevitable, se determina en condiciones nominales y normalizadas, o sea con la tensión nominal del medidor, con la intensidad nominal o su fracción determinada por las normas y con la frecuencia nominal. Durante la prueba, el medidor debe funcionar en la posición correcta y a la temperatura ambiente también

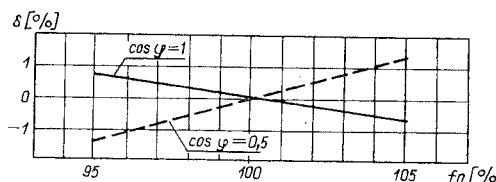
determinada por las normas (20°C). Como se ha mencionado anteriormente, cualquier variación de las condiciones nominales, o sea de la tensión U , de la intensidad I , de la frecuencia f y de la temperatura ambiente, influye en el valor del error y en ciertos casos



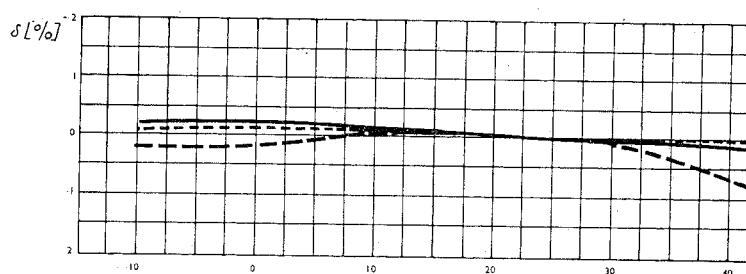
Curva de errores de corriente de un medidor de energía activa.



Curva de errores de voltaje de un medidor de energía activa.



Curva de errores de frecuencia de un medidor de energía activa.



Curva de errores de temperatura de un medidor de energía activa.

Figura IV-34.

puede sobrepasar los límites admisibles. En vista de esto los fabricantes de los medidores de energía, incluyen en los catálogos y folletos de medidores, las curvas de errores en función de los parámetros mencionados. La figura IV-34 muestra los ejemplos de las curvas de verificación del error en función de: *a*, carga (I) con $\cos \varphi = 1$ y $\cos \varphi = 0.5$; *b*, tensión U ; *c*, frecuencia f ; *d*, temperatura ambiente. De la influencia de los parámetros *a*, *b*, *c* y *d*, en la variación del valor del error depende la calidad del medidor.

Capítulo V

TIPOS DE MEDIDORES DE ENERGÍA

La medición de la energía eléctrica tiene varias finalidades pero la principal finalidad del uso del medidor de energía (contador), es la comercialización de la misma. Al principio del desarrollo de su utilización, la comercialización, o sea su venta, se efectuaba de manera muy simple. Se facturaba por la unidad de energía vigente (Ah, Wh, kWh). Sin embargo, con el desarrollo industrial y la consecuente búsqueda del abaratamiento de su producción y de su utilización, en vista de su consumo masivo, se hizo necesario la aplicación de tarifas complejas. No es el tema de este libro el tratado económico de la producción y el uso de la energía eléctrica ya que este tema es muy amplio, complejo y de otra índole. Es obvio que la economía de la producción de la energía eléctrica depende del modo de utilización y esto, a su vez, depende de múltiples factores. Los factores de mayor importancia en la economía mencionada son los siguientes:

- a. La carga máxima que puede soportar la planta generadora.
- b. La distribución de la carga durante las 24 horas.
- c. Las características y el rendimiento eléctrico de los receptores.

Estos factores originaron la creación de una gran variedad de medidores de energía, los cuales, mediante la aplicación de varios tipos de tarifas, permiten obligar al consumidor a ajustar sus instalaciones y sus receptores de la energía eléctrica así como los horarios de su funcionamiento, de tal manera que la compañía productora trabaje con el mayor rendimiento y, en consecuencia, pueda vender la energía eléctrica a precios más bajos y más asequibles.

Agrupación de los medidores

En vista de lo expuesto y con fin de que se puedan seleccionar los medidores para que cumplan con su propósito, se los puede agrupar en los siguientes grupos principales:

Grupo A. En consideración del sistema de la red a través de la cual se utiliza la energía.

1. Medidores monofásicos.
2. Medidores trifásicos (para 3 y 4 conductores).

Grupo B. En consideración del tipo de receptor cuyo funcionamiento influye en la tarifa.

1. Medidores de energía activa.
2. Medidores de energía reactiva.
3. Medidores de energía aparente.

Grupo C. En consideración del horario de la utilización y de la máxima carga de corta duración.

1. Medidores de la tarifa múltiple.
2. Medidores de la demanda máxima.

Los diferentes tipos de medidores pueden, según el modelo, pertenecer a un grupo o a varios.

Ejemplo: El medidor A1, B1, C1 es un medidor monofásico de energía activa y de tarifa doble y el medidor A2, B1, C2 es un medidor trifásico de energía activa y de demanda máxima.

A continuación se describen los tipos de medidores correspondientes a cada uno de los grupos enumerados. En los esquemas de los medidores se utilizará la codificación y la numeración de los bornes de conexión según las normas internacionales IEC, lo que se podrá apreciar en los esquemas agrupados en la tabla de la figura V-3.

Medidor monofásico de energía activa, (A1, B1)

El sistema motor descrito en el capítulo anterior se utiliza en todos los tipos de medidores de energía de corriente alterna. Su conexión es "vatimétrica", o sea la bobina de intensidad en serie con el consumo y la bobina de tensión en paralelo con la red. Utilizando dos o tres de los sistemas se construyen medidores trifásicos y, conectando la bobina (o las bobinas) de tensión de diferente manera, se obtienen medidores de energía activa, reactiva y aparente. La figura V-1 muestra en perspectiva los principios de su construc-

ción (también en fig. IV-32). En lo que se refiere a su utilización como medidores monofásicos de energía activa, existen algunas variantes en sus conexiones internas cuyos detalles resume la tabla de la figura V-3. En el presente manual se utiliza la codificación y la numeración de los bornes de conexión según las normas internacio-

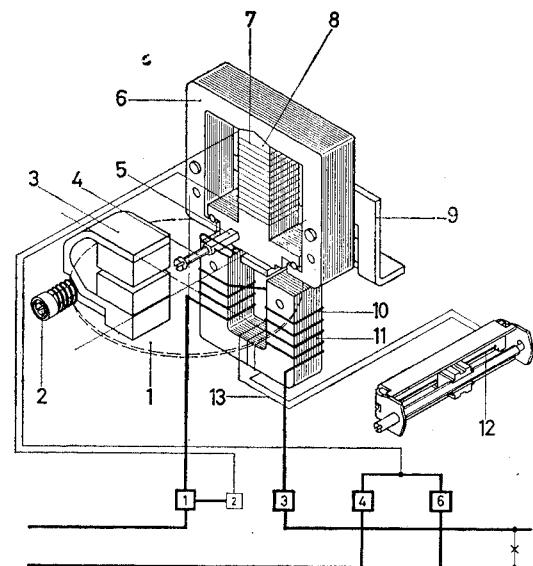


Figura V-1 (Cortesía de FUJI ELECTRIC Co.).

1, disco-rotor; 2, ajuste posición imán de freno; 3, imán de freno; 4, ajuste de baja carga; 5, tubo de cobre (carga); 6, núcleo de electroimán de tensión; 7, bobina de tensión; 8, columna central del núcleo de tensión; 9, soporte; 10, bobina de intensidad; 11, núcleo de electroimán de intensidad; 12, resistencia variable; 13, arrollamiento de ajuste $\cos \phi$.

nales IEC, aunque en algunos países rigen todavía las normas británicas BSS, utilizadas en USA, Canadá, Japón e Inglaterra. La figura V-2 muestra dos marcas de medidores de AEG (según las normas IEC y DIN) y de FUJI (según las normas BSS). La diferencia radica en que según las normas IEC un conductor de entrada entra por el borne 1 y sale por el borne 3 y el segundo conductor entra por el 4 y sale por el 6; en cambio, según las normas BSS el primer conductor entra por 1 y sale por 6 y el segundo conductor entra por 3 y sale por 4.

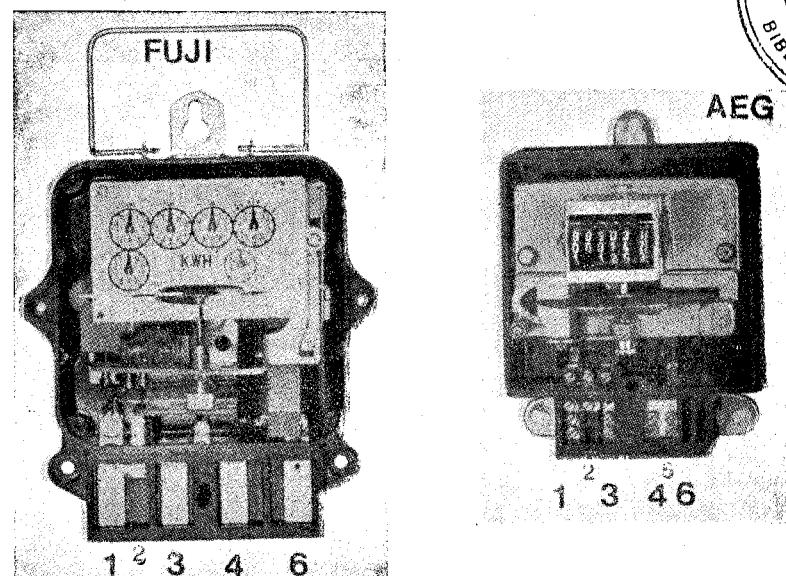


Figura V-2.

De esto resulta que el puente une los bornes 4 y 6 en el sistema IEC y 3 y 4 en el sistema BSS. La bornera está protegida con una tapa precintada independientemente de la tapa del medidor, la cual puede ser sacada únicamente en los laboratorios de contraste y de legalización.

Esquemas de conexiones de medidores monofásicos

La figura V-3 muestra varios esquemas de conexiones internas de los medidores monofásicos. El esquema n.º 1 corresponde al sistema normalizado según IEC y el esquema n.º 2 según BSS. El esquema n.º 3 representa la conexión "bipolar" de la bobina de intensidad del medidor. Este sistema se utiliza en los casos de la conexión del abonado a las dos fases de la red trifásica cuando existe el neutro en la red. La mitad de las espiras del electroimán de intensidad está intercalada en una fase (R) y la otra mitad en la segunda fase de la red (S o T). La finalidad de este tipo de conexión interna del medidor es la protección de la Compañía de Electricidad contra

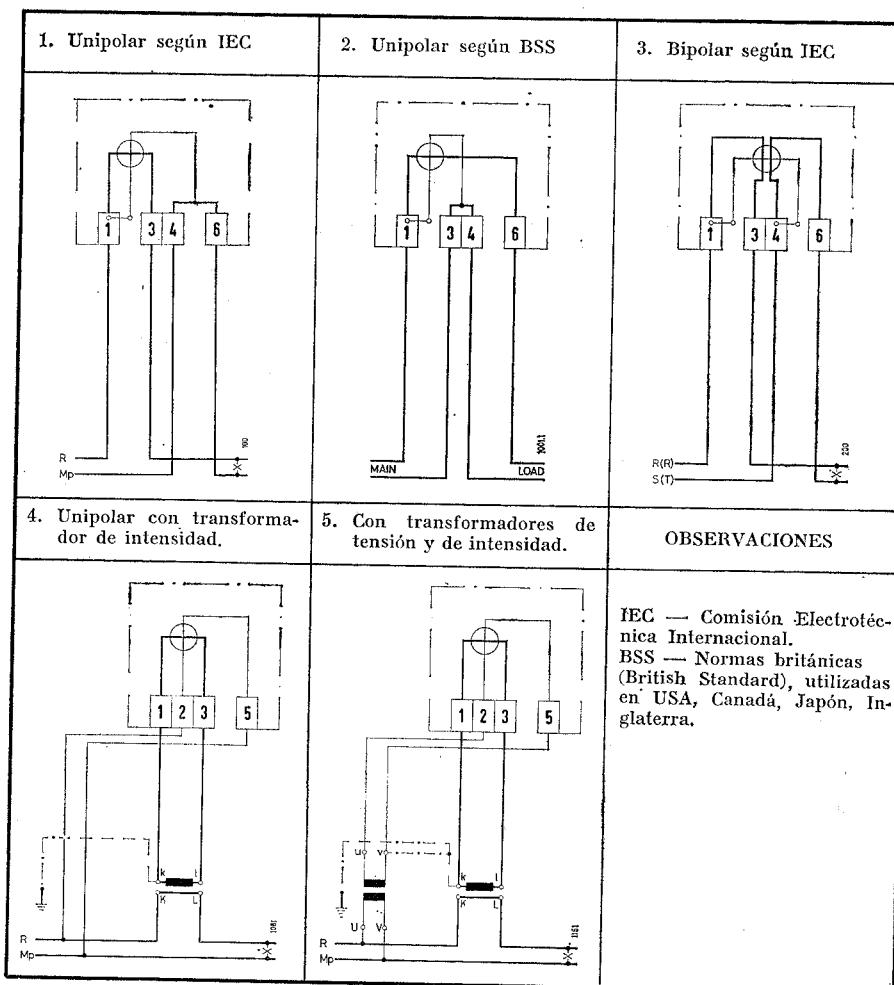


Figura V-3.

el fraude que podría efectuar un abonado deshonesto al conectar algunos receptores entre una fase y tierra.

El esquema n.º 4 corresponde al medidor monofásico para altas intensidades de corriente cuando es imprescindible el uso del transformador de intensidad. Como se puede apreciar en el esquema, este medidor tiene separada eléctricamente la bobina de tensión del cir-

cuito de intensidad, siendo anulado el puente "vatimétrico" entre los bornes 1 y 2. Los bornes 2 y 5 sirven para la conexión independiente de la bobina de tensión a las dos fases de la red (ver medición de potencia método semidirecto, Capítulo III). La bobina de intensidad está prevista para 5 A, intensidad que corresponde a la corriente nominal secundaria de los transformadores de intensidad. En consecuencia, el medidor es de $I_{nom} = 5$ A y U_{nom} de la red. El numerador considera la relación de transformación del transformador de intensidad previsto, de modo que su constante está relacionada con la energía real medida. El contraste de este medidor en laboratorios de legalización se efectúa con relación a $I_{nom} = 5$ A, teniendo en cuenta la relación de transformación del transformador de intensidad. Sobre la chapa de identificación del medidor debe figurar la relación del transformador, por ejemplo,

$$U_{nom} = 120 \text{ V} ; I_{nom} = \frac{200}{5} \text{ A}$$

El esquema n.º 5 es el del medidor de energía en la red de alta tensión y, por tanto, está previsto el uso de los transformadores de tensión y de intensidad. Su bobina de tensión (2-5), es para 100 V, tensión que corresponde a la tensión normalizada del secundario de los transformadores de tensión y la bobina de intensidad (1-3) es para 5 A como en el caso anterior. En consecuencia es un medidor de 100 V y 5 A. Las relaciones de transformación de ambos transformadores de medición están incluidos en la constante del numerador. La identificación del medidor debe contener ambas relaciones de transformadores, por ejemplo:

$$U_{nom} = \frac{6000}{100} \text{ V} ; I_{nom} = \frac{20}{5} \text{ A}$$

Medidores trifásicos de energía activa, (A2, B1)

En principio, para la medición de la energía activa en la red trifásica se podrían emplear 2 o 3 medidores monofásicos de igual manera que se utilizan 2 o 3 vatímetros para la determinación de la potencia trifásica (ver el Capítulo III). Aparte del costo, el inconveniente es la necesidad de sumar la energía registrada por 3 numeraidores para obtener el valor total. Esto justifica la construcción del medidor trifásico en el cual se pueden integrar los pares motor de dos o tres sistemas monofásicos por medio de un eje común que acciona un solo numerador que acusa la totalidad de la energía consumida en una instalación trifásica. Según el sistema de la red, se

utilizan los medidores de dos o tres sistemas motor, conectados de igual modo que los tres vatímetros en mediciones de potencia en la red trifásica con neutro o dos vatímetros en la red trifásica de tres conductores. Sin embargo, existe hoy la tendencia a utilizar los medidores trifásicos de tres sistemas para ambos tipos de red.

MEDIDORES TRIFÁSICOS DE TRES SISTEMAS MOTOR

Los medidores trifásicos de tres sistemas motor se construyen en tres variantes:

- Con el rotor de tres discos sobre el mismo eje y con un sistema motor aplicado sobre cada disco.
- Con el rotor de dos discos; sobre un disco están aplicados dos sistemas motor y sobre el segundo disco un sistema motor y el imán de freno.
- Con el rotor de un solo disco sobre el cual actúan los tres sistemas motor.

El imán, o los imanes de freno, pueden ser aplicados sobre cualquiera de los discos independientemente de los sistemas motor.

En un medidor trifásico se encuentran varios sistemas motor (dos o tres) en un espacio reducido. En consecuencia, hay que tener en cuenta que los flujos de dispersión de un sistema motor en combinación con los flujos principales de un sistema vecino, originan momentos adicionales, los cuales, en ciertas condiciones, pueden occasionar errores de consideración. La construcción que permite evitar estos errores adicionales es la de tres discos. Sin embargo, debido al volumen de este tipo de medidor, el sistema de tres discos está casi en desuso.

Los medidores cuya construcción está basada en el rotor de dos discos (fig. V-4) tienen un volumen relativamente reducido y, por tanto, son de uso más frecuente. Sobre un disco de este tipo de medidor están aplicados dos sistemas motor y sobre el otro disco el tercer sistema y el imán de freno. Debido a que los dos sistemas que actúan sobre el mismo disco están colocados diametralmente (fig. V-5), no se producen momentos adicionales por la acción mutua entre los flujos Φ_{u1} y Φ_{u3} . En el instante en el cual se origine una fuerza F debida a la existencia de dos flujos, el momento resultante es igual a cero por pasar el eje de la fuerza por el centro del disco.

Se obtiene un volumen muy reducido del medidor trifásico utilizando el rotor de un solo disco sobre el cual están aplicados los tres sistemas motor y el imán de freno.

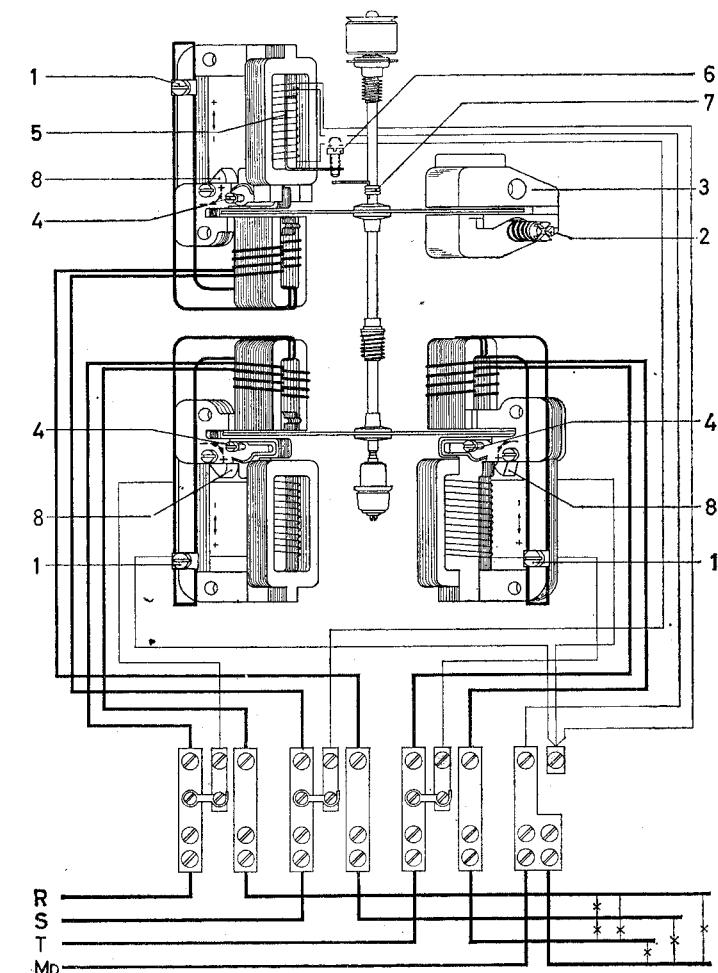


Figura V-4 (a). (Cortesía AEG.)

1, cursor de resistencia variable; 2, regulación imán de freno; 3, imán de freno; 4, ajuste en 10 %; 5, ajuste-giro al vacío; 6, equilibrio de momentos; 7, lengüeta de giro al vacío; 8, ajuste fino de momento motor.

Debido a las fuerzas adicionales F_1 , F_2 y F_3 (fig. V-6 a) en este caso se producen los momentos adicionales cuya dirección coincide con el campo giratorio, resultante de la secuencia de las fases. Algunas firmas (SANGAMO, Canadá) utilizan en este tipo de medidores el

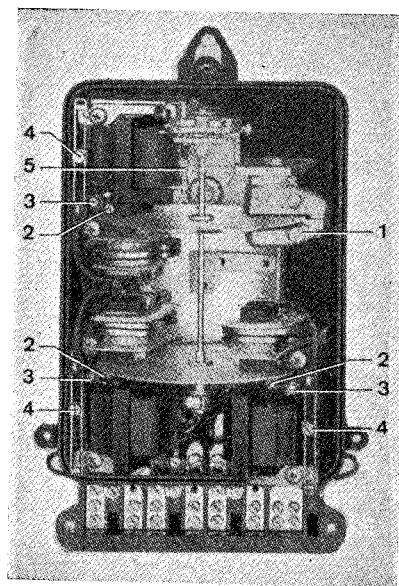


Figura V-4 (b).

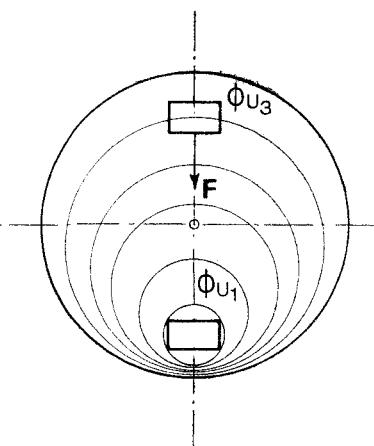


Figura V-5.

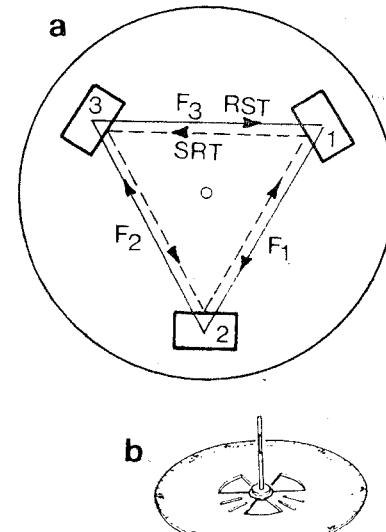


Figura V-6.

disco con perforaciones (fig. V-6 b) para impedir las interferencias entre los tres elementos.

Esquemas de conexiones de medidores trifásicos de tres sistemas motor

La figura V-7 muestra los cuatro esquemas básicos de medidores trifásicos de tres sistemas motor. El esquema n.^o 1 es de un medidor trifásico de conexión directa a la red, según las normas IEC, con la correspondiente numeración de los bornes de entrada y de salida. El esquema n.^o 2 es el mismo tipo de medidor pero con la conexión interna, según las normas BSS. Este tipo de conexión interna es utilizado en USA, Inglaterra, Canadá y Japón. El esquema n.^o 3, corresponde a los medidores de medición semidirecta (ver Capítulo III), en los cuales se utilizan los transformadores de intensidad, de modo que el medidor tiene los arrollamientos de intensidad para 5 A, intensidad secundaria de los transformadores de intensidad, y las bobinas de tensión corresponden a las tensiones sencillas (entre fase y neutro) de la red. En consecuencia, el medidor no tiene los puentes "vatométricos" entre los principios de las bobinas de intensidad y los principios de las bobinas de tensión, de igual manera que en mediciones de potencia con el método semidirecto.

El esquema n.^o 4 muestra las conexiones internas del medidor de energía en las redes trifásicas de alta tensión. La conexión interna es igual que la del medidor del esquema n.^o 3, con la diferencia que las bobinas de tensión son para 100 V, o sea la tensión secundaria normalizada de los transformadores de tensión. En consecuencia, el medidor está construido para 5 A y 100 V por fase y ambas relaciones de los transformadores están incluidas en la constante del medidor. La verificación y el contraste se efectúan en los laboratorios con 5 A y 100 V.

MEDIDORES TRIFÁSICOS CON DOS SISTEMAS MOTOR

Los medidores trifásicos de dos sistemas motor se fabrican con las siguientes variantes:

- Con el rotor de dos discos fijados sobre el mismo eje; sobre cada disco actúa un sistema motor (fig. V-8) para prevenir la interferencia entre los flujos magnéticos de ambos sistemas. El imán de freno actúa sobre uno de los discos y, en el caso de dos imanes de freno, uno sobre cada disco. La figura V-8 muestra la ejecución de la firma AEG.

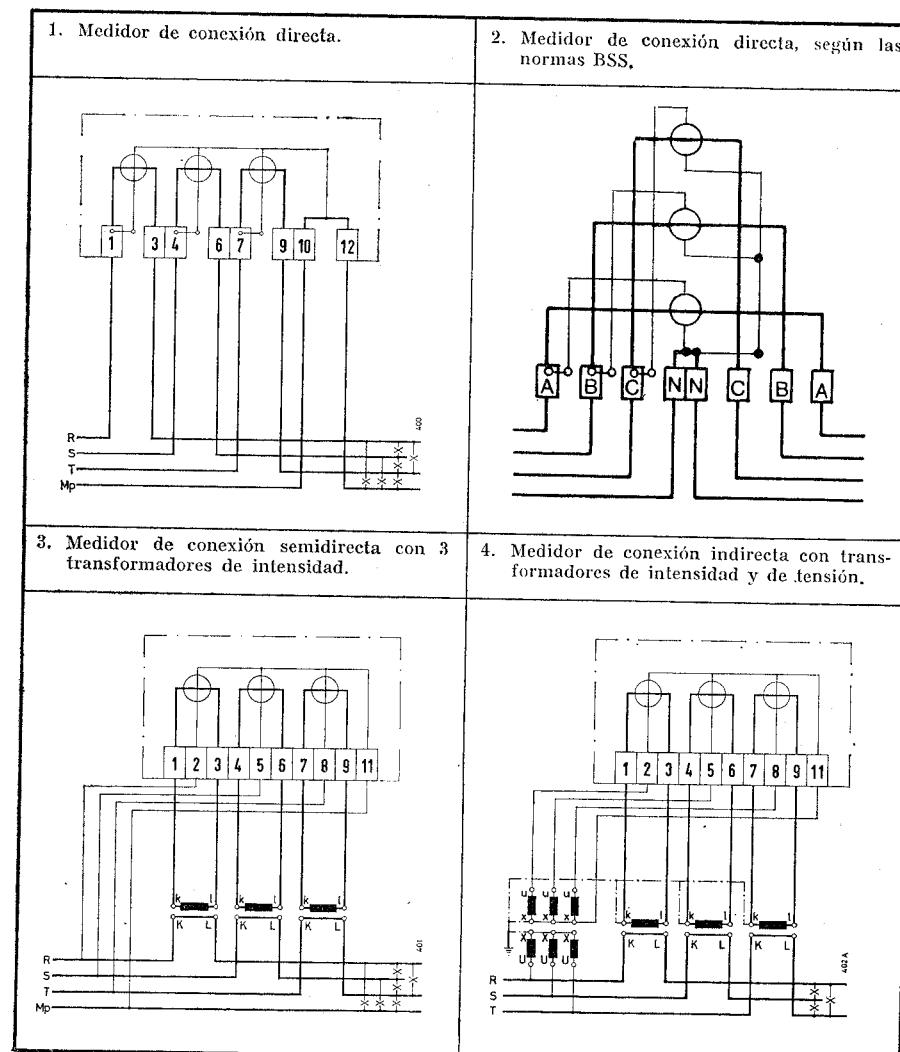


Figura V-7.

- b. Con el rotor de dos discos fijados sobre el mismo eje; ambos sistemas están aplicados sobre el disco inferior diametralmente (fig. V-5) para compensar los momentos adicionales. El disco superior se utiliza para el frenado por el imán (o los

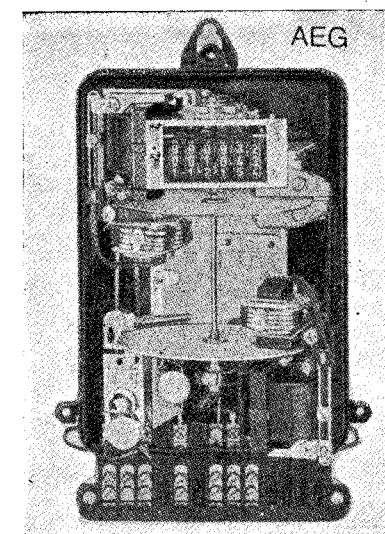


Figura V-8.

imanes). La figura V-9 muestra un medidor de este tipo fabricado por METRONEX, Polonia. Esta construcción está también utilizada por G.E. USA y otros.

- c. Con el rotor de un solo disco sobre el cual están dispuestos los dos sistemas motor y el imán de freno (fig. V-10).

Ejemplos de fabricación: SANGAMO, Canadá y FUJI, Japón.

Los medidores trifásicos de dos sistemas motor se utilizan para registrar la energía en las redes trifásicas de 3 conductores (sin neutro), en baja y alta tensión. Su conexión a la red puede ser directa, semidirecta o indirecta como en los medidores de tres sistemas motor.

Esquemas de conexiones de medidores trifásicos de dos sistemas motor

La figura V-11 muestra cuatro conexiones típicas. El esquema n.º 1 es de un medidor de energía activa según las normas IEC, con la correspondiente numeración de los bornes de entrada y de salida. El esquema n.º 2 es del medidor de dos sistemas motor de conexión interna según las normas BSS mencionadas anteriormente. El esquema n.º 3 corresponde al medidor de dos sistemas de conexión

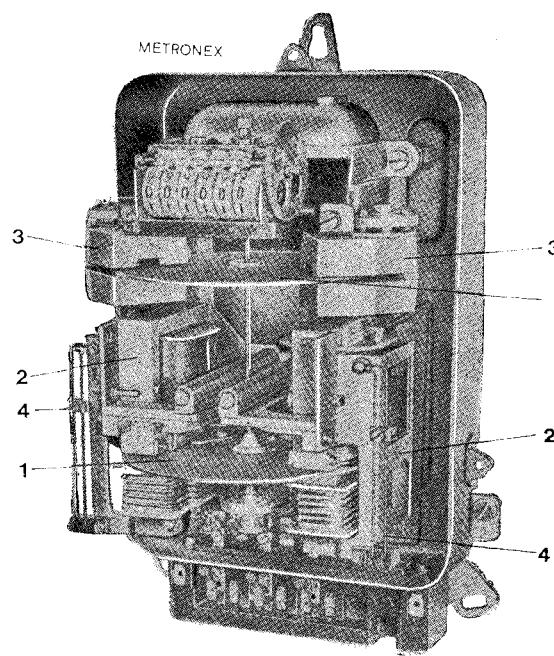


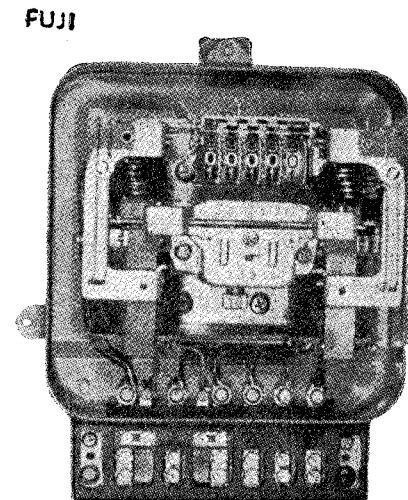
Figura V-9.

1, disco de aluminio del rotor; 2, sistema motor; 3, imán de freno;
4, regulación $\cos \phi$.

ta del circuito de intensidad mediante 2 transformadores de intensidad cuya relación de transformación está incluida en la constante del numerador. El esquema n.^o 4, muestra dos variantes de conexión del medidor de dos sistemas a la red de alta tensión. En ambas variantes la intensidad está medida por intermedio de dos transformadores de intensidad, de modo que las bobinas de intensidad son para 5 A. La variante *a* representa la conexión del circuito de tensión por medio de tres transformadores monofásicos conectados en estrella y la variante *b* por medio de 2 transformadores en V.

Medidores de energía reactiva

Consideraciones de tipo económico. Como ya se ha expuesto en el capítulo III, en corriente alterna se deben considerar 3 expresiones



A

B

a) ajuste de plena carga, b) regulación del momento motor, c) ajuste de carga pequeña, d) regulación de $\cos \phi$.

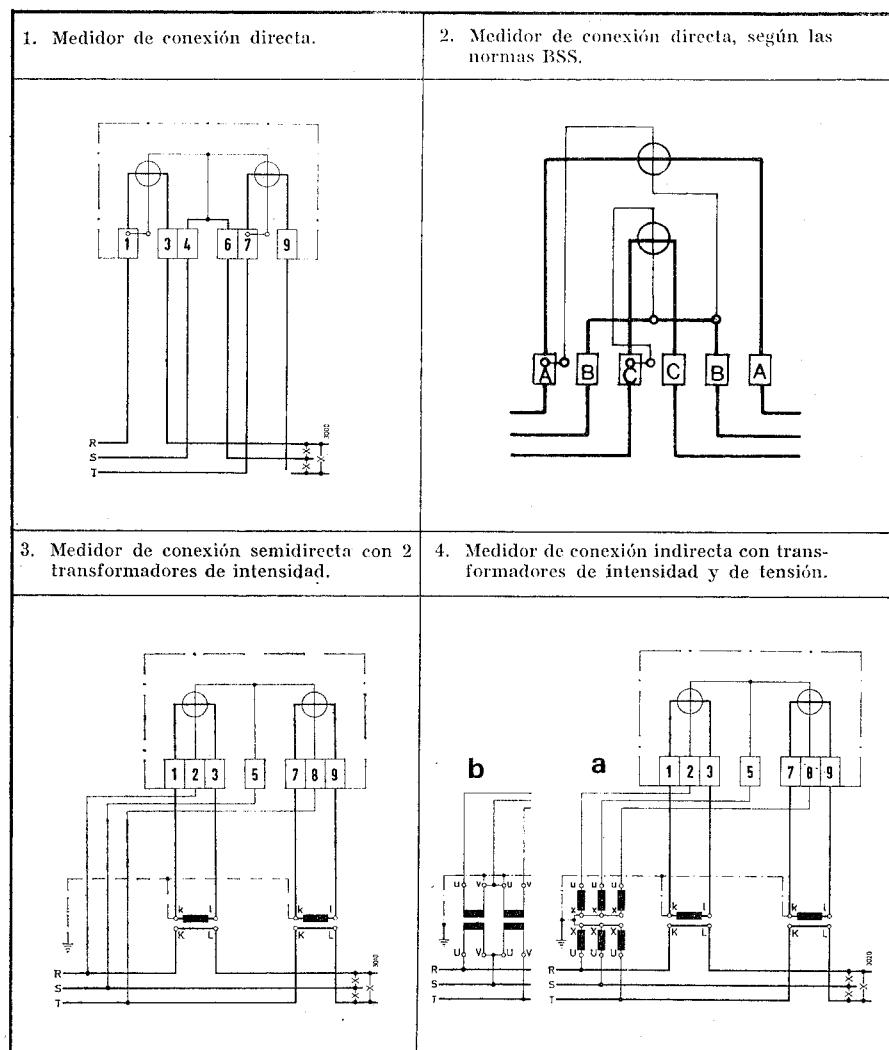


Figura V-11.

de potencia: 1) La potencia activa, $P = U \cdot I \cos \varphi$ en sistema monofásico, y en sistema trifásico, $3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$; 2) La potencia reactiva, $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ en sistema monofásico, y en sistema trifásico, $Q = 3 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$; y 3) La potencia aparente $S = U \cdot I$ y en sistema

trifásico $S = 3 \cdot U \cdot I$. La potencia activa P se mide en W, kW y MW; la potencia reactiva Q se mide en VAr, kVAr y MVAr y la potencia aparente S en VA, kVA y MVA. A consecuencia de estos tres conceptos de potencia surgen tres conceptos de energía como producto de cada tipo de potencia por el tiempo: A_P , A_Q y A_S .

La energía activa, que es el producto de la potencia activa por el tiempo ($A_P = P \cdot t$), se mide con los medidores de energía activa, monofásicos y trifásicos, según el caso, y se expresa en Wh, kWh y MWh y es la energía que realmente efectúa el trabajo. El abonado paga a la compañía por la cantidad de energía calculada en las unidades mencionadas, según la tarifa aplicada.

La energía denominada reactiva ($A_Q = Q \cdot t$) se mide en VArh, kVArh y MVArh y, la energía aparente ($A_S = S \cdot t$) se mide en VAh, kVAh y MVAh.

En el diagrama vectorial de la figura V-12 se puede apreciar que en la mayoría de los casos no se puede transferir al abonado la "pura"

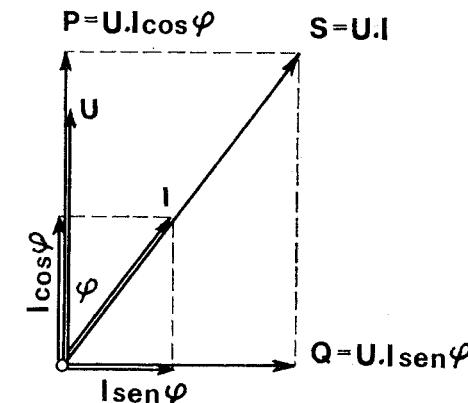


Figura V-12.

energía activa" A_P , ya que depende de las características inductivas o/y capacitivas de los receptores que utiliza el abonado. Aunque la componente reactiva A_Q de la energía no efectúa ningún trabajo efectivo, el transporte de la energía total provoca pérdidas en las líneas de transporte y en las redes de distribución y, por tanto, las compañías aplican ciertas medidas a sus abonados para que se vean obligados a ajustar sus instalaciones y receptores para la compensación de estas pérdidas. En resumen, les obligan a mejorar el factor de potencia ($\cos \varphi$) en sus instalaciones. No es el tema del presente manual

enumerar todos los medios con los cuales el usuario puede hacer frente a estas obligaciones. En cambio, se explica a continuación el principio de funcionamiento de los medidores especiales que registran la energía reactiva A_Q y aparente A_S .

Midiendo el consumo de energía activa A_P y el consumo de la energía reactiva A_Q habidos en el mismo periodo del tiempo contable, por ejemplo en un mes, se puede determinar el valor promedio del $\cos \varphi$ con el cual funcionaban las instalaciones del abonado durante este periodo. Esta medición tiene mucha importancia en los casos de contratos por el suministro de la energía eléctrica; contratos que prevén tarifas especiales para ciertos límites del factor de potencia ($\cos \varphi$). Para un $\cos \varphi$ cuyo valor oscila alrededor de "1" se ofrecen mejores condiciones económicas para el abonado que para un $\cos \varphi$ bajo. En tales casos tanto la compañía productora como el usuario tienen interés en el control del $\cos \varphi$.

Midiendo la energía activa A_P y la energía reactiva A_Q durante el mismo periodo, mediante un simple cálculo se obtiene el valor promedio del desfase:

Ejemplo: En una instalación, el medidor de energía activa registró durante un mes 860 kWh y el medidor de energía reactiva, 500 kVArh.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{500}{860} = 0,58$$

lo que corresponde al $\cos \varphi = 0,86$:

El valor de la energía aparente A_S durante este periodo se calcula por:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{500^2 + 860^2} = 994 \text{ kVAh}$$

Medidor monofásico de energía reactiva, (A1, B2)

En la construcción del medidor de energía reactiva se utiliza el mismo sistema motor que en los medidores de energía activa. Esto es factible debido a que $\sin \psi = \cos(90^\circ - \varphi)$. En los medidores de energía activa los flujos Φ_i y Φ_u producidos por la intensidad de la red en la bobina de intensidad y por la intensidad I_u en la bobina de tensión respectivamente, están desfasados entre sí casi 90° (ver "condición de 90° " en el Capítulo IV). Según lo expuesto anteriormente, las máximas revoluciones del rotor de un medidor de energía activa deben producirse cuando el ángulo de desfase φ es igual a cero

($\cos \varphi = 1$). Contrariamente, en el medidor de energía reactiva, las máximas revoluciones del rotor deben producirse cuando el desfase φ es igual a 90° , ($\cos \varphi = 0$). Este efecto se puede obtener desfasando el flujo Φ_u en otros 90° más, o sea hasta 180° (fig. V-13 a) o también colocando el vector I_u de la bobina de tensión en fase con el vector de la tensión U . En este último caso el ángulo Ψ entre ambos flujos es igual a cero (fig. V-13 b).

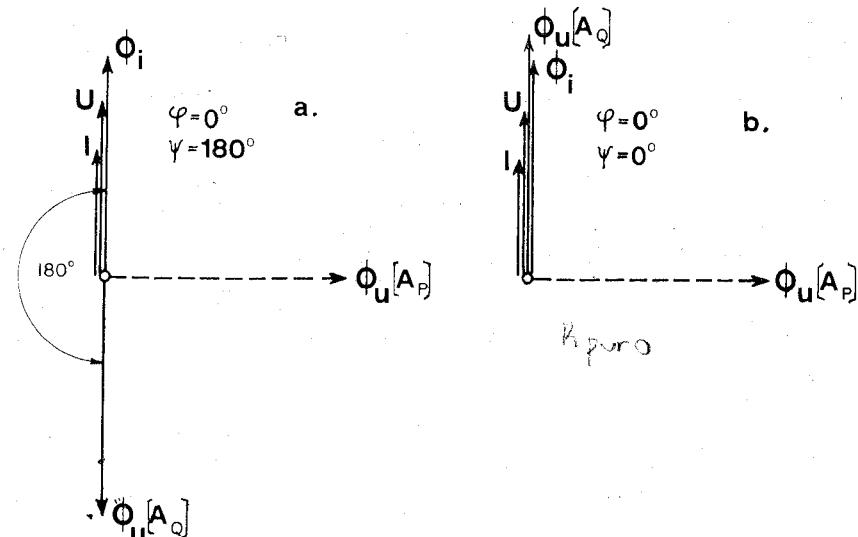


Figura V-13.

La rotación de los flujos magnéticos Φ_u y Φ_i se puede realizar conectando una resistencia pura R_1 delante de la bobina de tensión (fig. V-14 a) y otra resistencia pura R_2 en paralelo con la bobina de intensidad. La figura V-14 b muestra el símbolo normalizado del medidor monofásico de energía reactiva.

Los medidores monofásicos de energía reactiva tienen poco uso; por lo general, los usuarios interesados en tarifas especiales utilizan las redes trifásicas.

Medidores trifásicos de energía reactiva, (A2, B2)

El mismo sistema aplicado en la construcción de los medidores trifásicos de energía activa se utiliza en la confección de los medi-

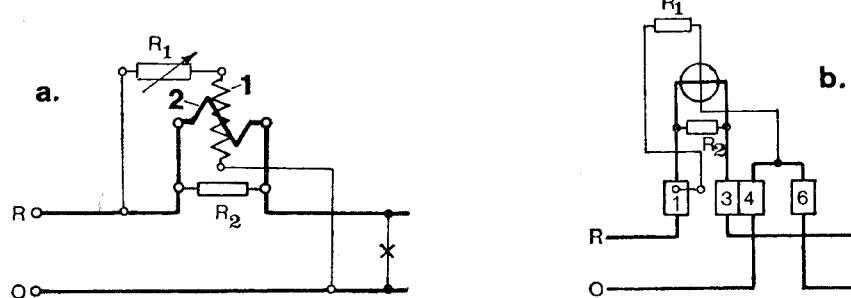


Figura V-14.

dores trifásicos de energía reactiva, es decir, utilizando dos o tres, según el caso, sistemas motor monofásicos (reactivos) que actúan sobre el mismo eje. Sin embargo, en medidores trifásicos de energía reactiva se puede evitar las dificultades que se presentan al realizar el desplazamiento o la rotación de flujos magnéticos (de 90° a 180° o de 90° a 0°), indispensable en el medidor monofásico de energía reactiva (fig. V-13 a).

La simplificación se consigue a base de las características propias de la red trifásica, o sea del desfase cíclico entre las tensiones de las tres fases (fig. V-15). La manera más simple de realizar el des-

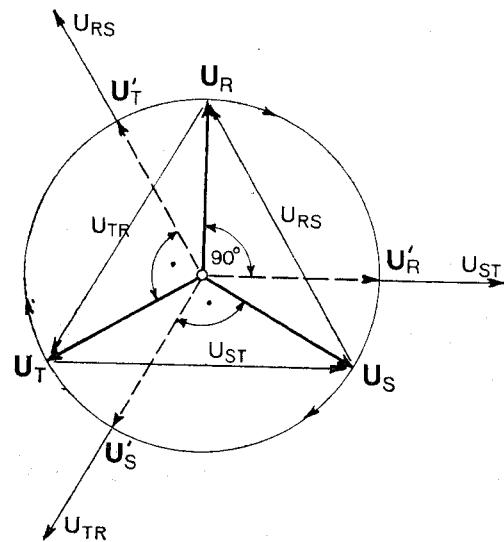


Figura V-15.

fase apropiado entre los dos flujos ($\Phi_w \Phi_i$) consiste en la conexión de la bobina de tensión perteneciente, por ejemplo, al sistema motor n.º 1, a la tensión compuesta existente en el sistema trifásico cuyo vector está desfasado 90° con respecto al vector de la tensión del sistema motor n.º 1. Lo mismo se hace con los sistemas motor n.º 2 y n.º 3 respectivamente. Del diagrama vectorial de la figura V-15 se deduce este principio y en él se puede apreciar que la tensión desfasada 90° con respecto a la tensión U_R de la fase R es la tensión compuesta U_{ST} . De la misma manera se puede encontrar para cada sistema motor una tensión desfasada 90° , condición requerida para el sistema motor de un medidor de energía reactiva:

Sistema motor	n.º 1	n.º 2	n.º 3
Intensidad de fase	I_R	I_S	I_T
Tensión aplicada	U_{ST}	U_{TR}	U_{RS}

En este sistema no se necesitan resistencias activas conectadas delante de las bobinas de tensión para la rotación del flujo Φ_u con respecto al flujo Φ_i , y la única diferencia constructiva consiste en un mayor número de espiras de las bobinas de tensión debido a que la tensión compuesta es $\sqrt{3}$ veces mayor que la tensión de fase. El conductor neutro no se usa para las conexiones de las bobinas de tensión en este tipo de medidor. Cuando $\cos \varphi = 1$, $\sin \varphi = 0$, y los vectores de tensión y de intensidad están en fase. En este instante el desplazamiento entre los flujos de los electroimanes de intensidad y de tensión es de 180° (fig. V-13 a), sin necesidad de emplear las resistencias delante de las bobinas de tensión. De esto resulta que el momento motor es igual a cero cuando $\cos \varphi = 1$, y, viceversa, el momento motor tendrá el valor máximo cuando $\cos \varphi = 0$. En consecuencia el medidor registra proporcionalmente la energía reactiva (A_Q). Por lo general, este tipo de medidores está provisto de un dispositivo que impide su marcha atrás (desfase capacitivo). El medidor debe estar conectando a la red siguiendo estrictamente la secuencia de fases R-S-T (A-B-C) y la condición indispensable para el registro correcto es la simetría de las tensiones. Las conexiones exteriores siguen siendo iguales que en los medidores de energía activa (A_p). En la figura V-16 están representados esquemas básicos de los medidores de energía reactiva de tres sistemas motor.

Para registrar la energía activa (A_p) en las instalaciones de 3 conductores (sin neutro) se utilizan medidores de dos sistemas motor conectados según el principio Aron (dos vatímetros), descrito ante-

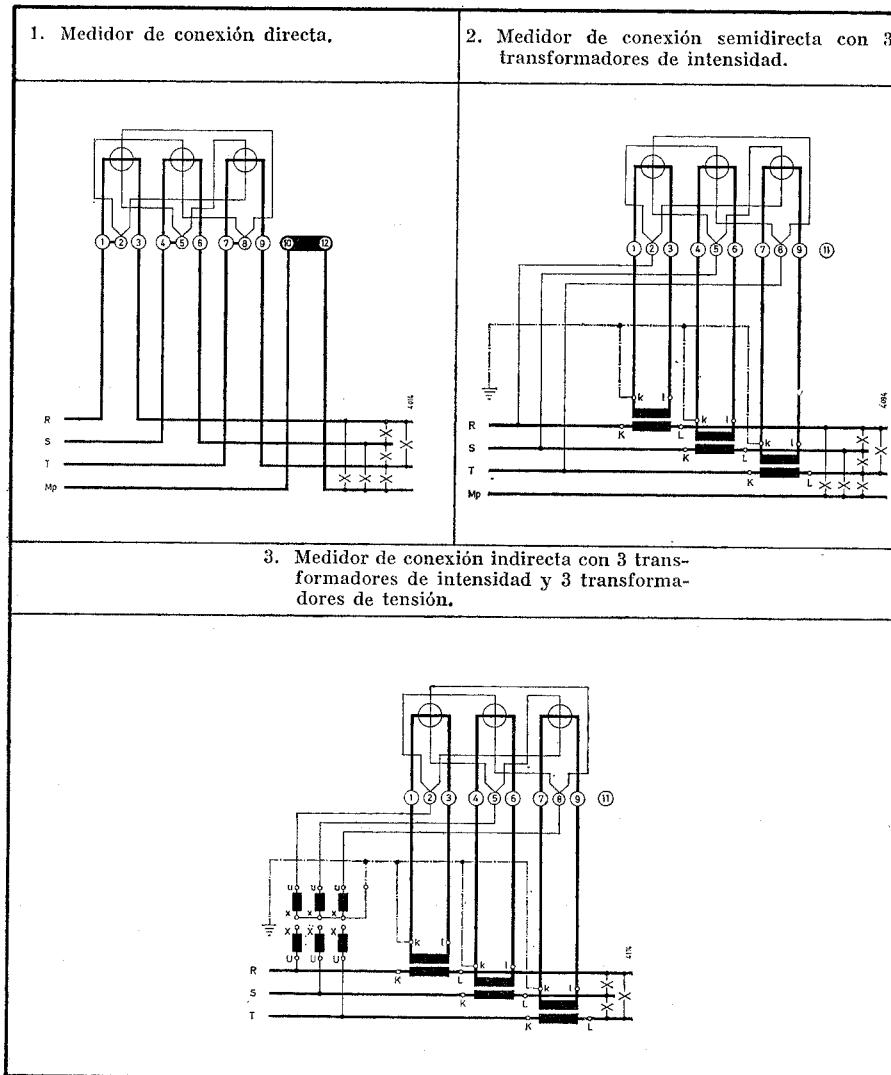


Figura V-16.

riamente. Los dos vatímetros miden la potencia total en el sistema trifásico ($P_t = P_I + P_{II}$) a base de las intensidades de fase y las tensiones compuestas. En el caso de una carga cuyo $\cos \phi = 1$, estas

tensiones están desfasadas 30° con respecto a las intensidades de fase (Capítulo III, método de 2 vatímetros). También se pueden construir los medidores de energía *reactiva* (A_Q) a base de dos sistemas motor, aunque en el sistema trifásico de tres conductores no existen tensiones que puedan originar un desplazamiento apropiado de los dos flujos magnéticos Φ_u y Φ_i en cada sistema motor. Sin embargo, se pueden utilizar las tensiones compuestas desfasadas 120° de manera parecida a la del medidor de energía activa. Utilizando esta combinación, la intensidad de corriente I_R estará asociada con la tensión compuesta U_{ST} y la intensidad I_T con la tensión U_{RT} . Los diagramas vectoriales de la figura V-17 representan en *a* el diagrama correspon-

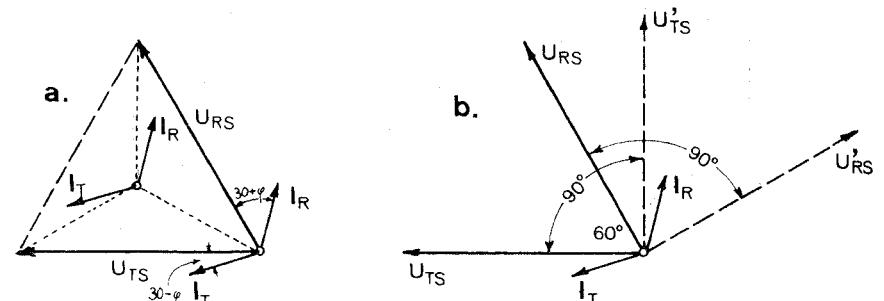


Figura V-17.

diente a las tensiones e intensidades utilizadas en un medidor de energía activa de dos sistemas y en *b* el diagrama del sistema modificado para un medidor de energía reactiva. Conectando a los principios de las bobinas de tensión las resistencias activas se consigue la rotación de 90° de los vectores de ambas tensiones y de este modo se obtienen las mismas relaciones que existen en los medidores de energía activa.

Comparando los medidores de dos sistemas motor de energía activa (A_P) y de energía reactiva (A_Q) resulta:

$$A_Q = Q \cdot t = (Q_I + Q_{II}) \cdot t = \{U'_{RS} \cdot I_R \cdot \cos[90^\circ - (\phi + 30^\circ)] + U_{TS} \cdot I_T \cdot \cos(30^\circ - \phi)\} \cdot t$$

en el medidor de energía activa y

$$\begin{aligned} A_Q &= Q \cdot t = (Q_I + Q_{II}) \cdot t = \{U'_{RS} \cdot I_R \cdot \cos[90^\circ - (\phi + 30^\circ)] + \\ &\quad + U'_{TS} \cdot I_T \cdot \cos[90^\circ - (\phi - 30^\circ)]\} \cdot t \\ &= [U_{RS} \cdot I_R \cdot \sin(\phi + 30^\circ) + U_{TS} \cdot I_T \cdot \sin(\phi - 30^\circ)] \cdot t \end{aligned}$$

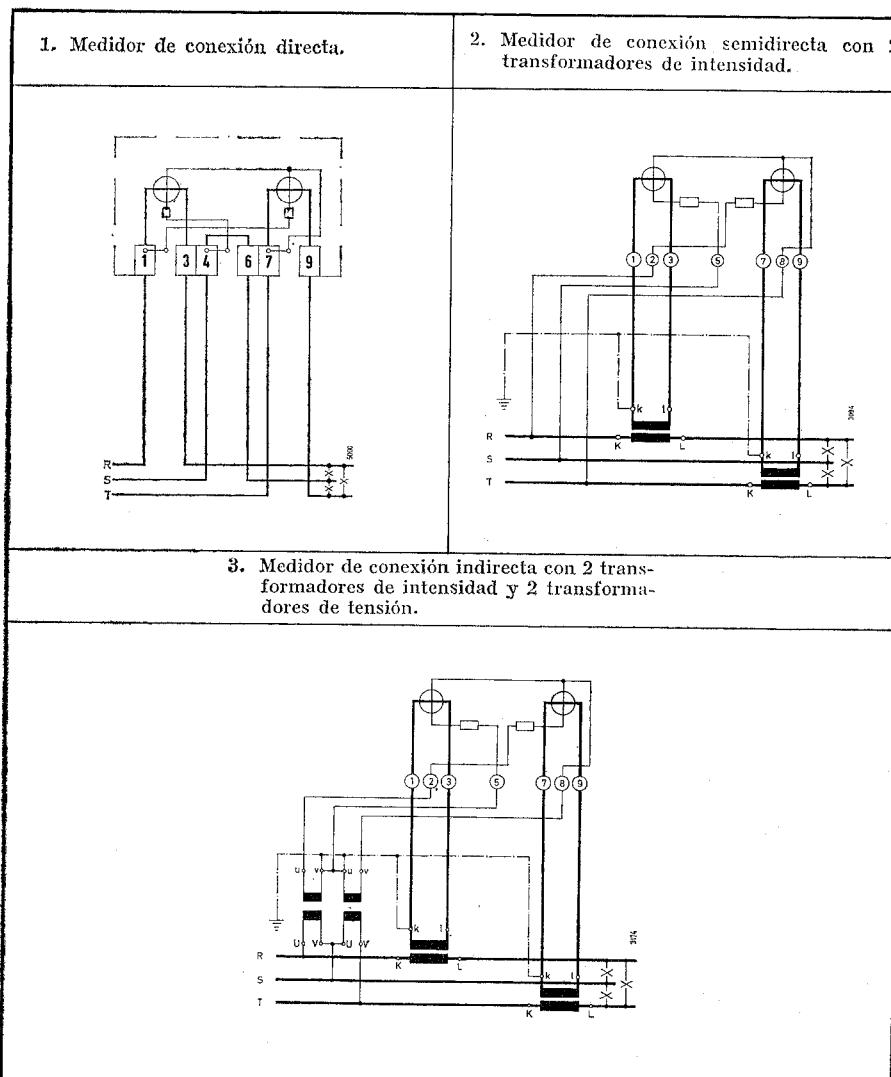


Figura V-18. Esquemas de conexiones de medidores trifásicos de energía reactiva, de 2 sistemas motor y 60° de desfase interno.

en el medidor de energía reactiva. De esto resultan las indicaciones para las conexiones internas del medidor de dos sistemas de energía reactiva:

Sistema motor	n.º 1	n.º 2
Intensidad de fase	I_R	I_T
Tensión aplicada	U_{ST}	U_{RT}
Resistencia desfasada	R_v	R_v

La figura V-19 muestra el esquema de un banco de medidores de energía utilizado en los casos de contratos con grandes usuarios. El conjunto consiste en dos transformadores de tensión en conexión "V", de dos transformadores de intensidad intercalados en las fases R y T , de un medidor de energía activa y de un medidor de energía reactiva, ambos de dos sistemas motor. A base de las lecturas periódicas de ambos medidores se determina el valor promedio mensual del factor de potencia como base de la aplicación de la tarifa correspondiente.

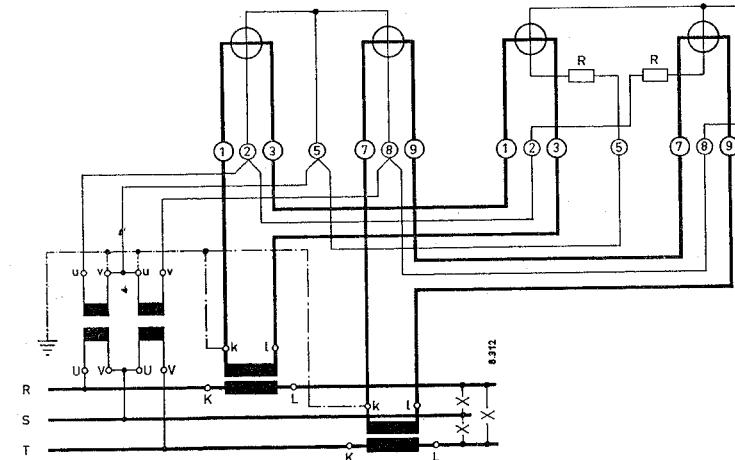


Figura V-19.

Medidores de energía aparente

La potencia y la energía aparentes no representan magnitudes físicas sino puramente numéricas. Sin embargo, se utilizan estos conceptos para la estimación y el cálculo de la carga de los generadores y de los transformadores, limitada por su máxima intensidad de corriente. En vista de ello, se incita al usuario, por medio de las ta-

rifas especiales, para que sus receptores funcionen con un factor de potencia, ($\cos \varphi$) del máximo valor posible (0,8 a 1). Para la aplicación de estas tarifas especiales, aparte de los medidores de energía activa (A_p) y de los medidores de energía reactiva (A_q) ya descritos, se utilizan también los medidores de energía aparente (A_s), por lo general, en combinación con un elemento "de demanda".

Medidores trifásicos de energía aparente (A2, B3)

DE FACTOR DE POTENCIA RESTRINGIDO

Para registrar la energía aparente ($A_s = U \cdot I \cdot t$) en kVAh o MVAh, se pueden emplear medidores iguales a los de la energía activa, siempre y cuando el factor de potencia ($\cos \varphi$) se mantenga dentro de ciertos límites preestablecidos. El diseño de este tipo de medidor se basa en el hecho de que es posible establecer previamente un factor de potencia de valor promedio para las condiciones de servicio correspondientes. En este caso se puede ajustar el desfase interno (ángulo Ψ) entre los flujos magnéticos Φ_u y Φ_i de tal modo que el máximo momento motor del disco del medidor se obtiene con el ángulo φ de valor promedio. Este ajuste tendría validez si el ángulo de desfase φ oscilara dentro de los límites relativamente pequeños. En resumen, el funcionamiento de un medidor de energía aparente se basa en que el coseno del ángulo que tiende a cero se puede considerar que es casi igual a 1 y cuando el valor del ángulo varía dentro de un margen relativamente pequeño tampoco varía mucho el valor del correspondiente coseno. Esta relación se puede apreciar en la tabla siguiente.

ángulo	0°	5°	10°	15°	20°	25°
coseno	1	0,996	0,985	0,966	0,940	0,906

De esto resulta que un medidor de energía activa cuyas lecturas son proporcionales a $A_p = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ registrará también la energía aparente cuando el ángulo de desfase φ se aproxima a cero. Un medidor de energía activa calibrado a error $\delta = 0\%$, empleado como medidor de energía aparente, registrará ésta con un error de -6% cuando el ángulo de desfase $\varphi = 20^\circ$ ($\cos 20^\circ = 0,940$). Al ajustar el medidor de energía activa con un error $\delta = +3\%$ para $\cos \varphi = 1$, este medidor registrará la energía aparente con un error $\delta = -3\%$ cuando $\cos \varphi$ sea 0,94 ($\varphi = 20^\circ$). El medidor ajustado y contrastado de este modo

registrará la energía aparente entre el $\cos \varphi = 0,94$ inductivo hasta $\cos \varphi = 0,94$ capacitivo con un error $\pm 3\%$, o sea dentro de los límites admisibles. Siguiendo este principio se puede convertir un medidor de energía activa en un medidor de energía aparente para los casos en que el $\cos \varphi$ de la carga varía dentro de ciertos límites. La figura V-20 a

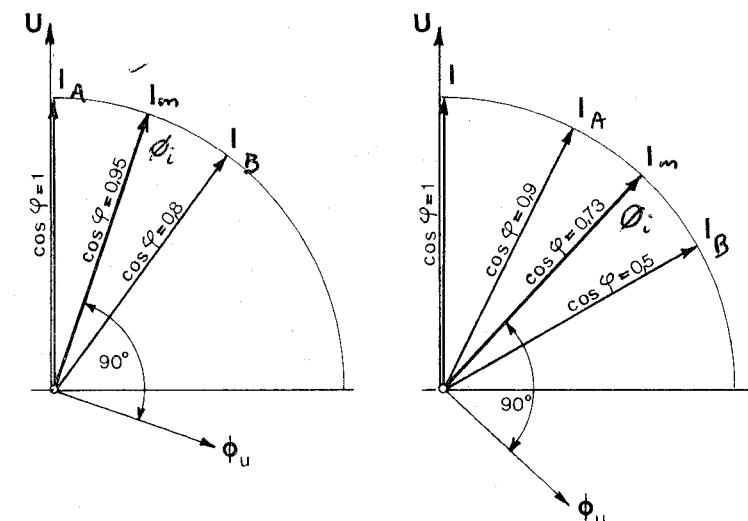


Figura V-20.

muestra el diagrama vectorial de un medidor de energía aparente, que es en realidad un medidor de energía activa en el cual el ángulo $\Psi = 90^\circ$ comprendido entre los flujos Φ_u y Φ_i aparece cuando el vector I_m de la corriente esté en la posición media entre la correspondiente al $\cos \varphi = 1$ (I_A) y $\cos \varphi = 0,8$ (I_B). Este medidor de energía aparente funciona con el factor de potencia *restringido* entre 0,8 y 1. El otro ejemplo muestra el diagrama vectorial de la figura V-20 b del medidor de energía aparente con el $\cos \varphi$ restringido entre 0,5 y 0,9. La figura V-21, muestra la curva de errores de un medidor de energía aparente (AEG Mod. SCV11), el cual está ajustado para un error positivo de 3 % con un ángulo de desfase $\varphi = 30^\circ$ ($\cos \varphi = 0,866$). El error adicional al error de calibración se mantendrá dentro de los límites entre $\cos \varphi = 0,643$ y $\cos \varphi = 0,985$, o sea, $\pm 3\%$.

El ajuste del ángulo $\Psi = 90^\circ$ para los valores previstos de $\cos \varphi$ se obtiene mediante resistencias delante de las bobinas de tensión, espiras en cortocircuito sobre los núcleos de electroimanes de intensidad, o

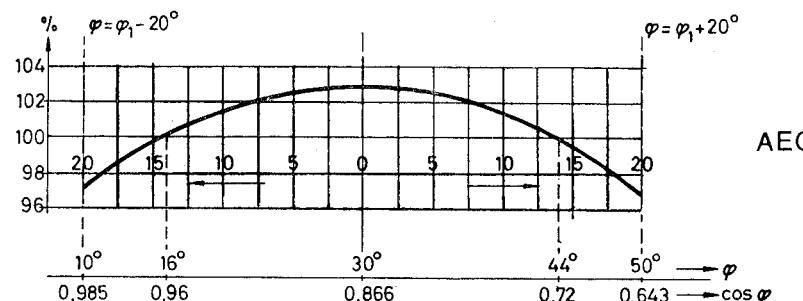


Figura V-21.

también por el intercambio cíclico en las conexiones de las bobinas de tensión. Este último ejemplo se puede apreciar en el esquema del medidor SCV11 en la figura V-22. En la conexión a la red de este tipo de medidores se debe seguir la correcta secuencia de fases R-S-T (A-B-C), siendo la simetría de las tensiones la condición indispensable para el registro correcto. Las conexiones exteriores son similares a las de los medidores de energía activa.

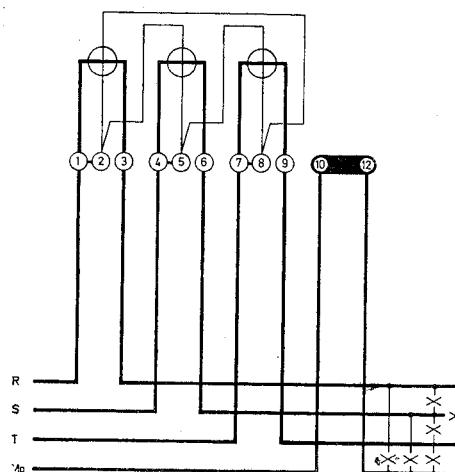


Figura V-22.

MEDICIÓN DE ENERGÍA APARENTE CON FACTOR DE POTENCIA DE CUALQUIER VALOR

La construcción de un medidor de energía aparente (A_S) que indica correctamente en sistema trifásico todos los valores de $\cos \varphi$ pre-

senta dificultades. La potencia aparente puede ser definida de varias maneras.

Partiendo de la representación vectorial de potencias en corriente alterna monofásica (fig. V-12), se tiene:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(U \cdot I \cdot \cos \varphi)^2 + (U \cdot I \cdot \sin \varphi)^2}$$

Mediante esta ecuación se obtiene el valor de la potencia aparente denominado *valor geométrico*. La otra expresión equivalente a la expuesta es $S = U \cdot I$, de modo que la potencia aparente S es el producto de la tensión por la corriente. En ciertas condiciones se puede aplicar ambas expresiones para la corriente trifásica de modo que la suma geométrica de las potencias aparentes de fases será la *potencia geométrica aparente* S_g de la corriente trifásica:

$$S_g = \sqrt{(P_R + P_S + P_T)^2 + (Q_R + Q_S + Q_T)^2}$$

o también:

$$S_g = \sqrt{(U_R I_R \cos \varphi_R + U_S I_S \cos \varphi_S + U_T I_T \cos \varphi_T)^2 + (U_R I_R \sin \varphi_R + U_S I_S \sin \varphi_S + U_T I_T \sin \varphi_T)^2}$$

$P_R + P_S + P_T$ es la suma de todas las potencias activas de las tres fases y $Q_R + Q_S + Q_T$ la suma de las potencias reactivas. La potencia aparente geométrica S_g total del sistema trifásico se representa gráficamente en la figura V-23 a.

Por otra parte, se puede definir la potencia aparente del sistema trifásico como la *suma aritmética* de las potencias aparentes de fases:

$$S_a = S_R + S_S + S_T = U_R I_R + U_S I_S + U_T I_T \quad (\text{fig. V-23 b})$$

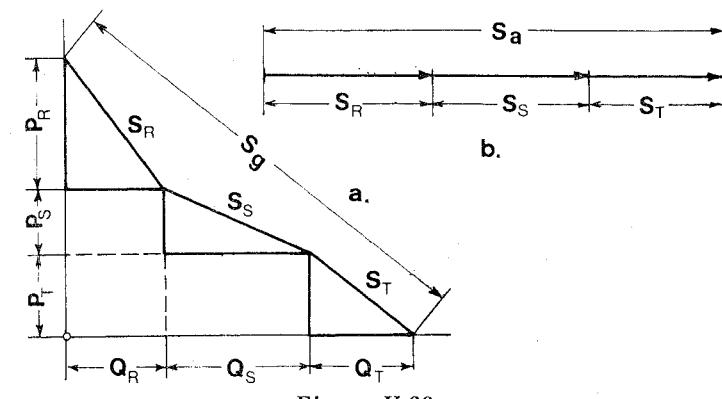


Figura V-23.

En el sistema trifásico, el valor de la potencia aparente geométrica (S_g) será igual al valor de la potencia aparente aritmética (S_a), únicamente cuando los ángulos de desfase en cada una de las fases son iguales:

$$S_g = S_a$$

cuando

$$\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T$$

y

$$S_g < S_a$$

cuando los ángulos de desfase son desiguales.

MEDIDOR DE VALOR ARITMÉTICO DE POTENCIA APARENTE EN SISTEMA TRIFÁSICO

Partiendo de la ecuación que expresa el valor aritmético de potencia aparente del sistema trifásico, se puede construir un medidor que registra el producto de U por I a base de los rectificadores en los circuitos de intensidad y de tensión en las salidas de los respectivos transformadores de medición y luego medir el producto $U \cdot I$ mediante un medidor de energía de corriente continua. Sin embargo, debido a que los medidores de corriente continua presentan serios inconvenientes, algunas firmas lograron construir medidores de energía aparente partiendo de un medidor trifásico común, volviendo a convertir las magnitudes rectificadas en magnitudes alternas mediante onduladores. De esta forma las indicaciones del medidor no dependen de los ángulos de fase del sistema trifásico. (En actual desarrollo en la firma AEG).

Medidores para fines específicos

Los medidores de registro simple de energía activa o reactiva están provistos de un solo numerador, de modo que éste registra el consumo total efectuado durante las 24 horas del día. En consecuencia, el usuario paga siempre el mismo precio por kWh de la energía consumida durante cualquier hora del día.

Sin embargo, la máxima economía en la producción y la distribución de la energía eléctrica depende en gran escala de que la carga total fuera aproximadamente constante. Esto no es posible debido a que las centrales suministran energía durante ciertas horas del día para la industria y durante una parte de la noche para la iluminación. Existen sin embargo períodos denominados "ociosos" durante los cuales la planta funciona casi en vacío, o sea durante las avanzadas horas

de la noche. Ofreciendo al abonado la energía a precio mucho más bajo durante estas horas "ociosas", se le puede incitar que utilice la energía durante estas horas en los receptores cuyo funcionamiento no depende del horario. Por lo general este tipo de receptores son los calentadores de agua construidos con aislamiento térmico, bombeadores para llenar los tanques, etc. Estos fines se consiguen aplicando los medidores de tarifa múltiple y especialmente de doble tarifa.

Medidores monofásicos y trifásicos de doble tarifa

La figura V-24 muestra el cuadrante del medidor de doble tarifa (marca English Electric). La flecha indica cuál de los numeradores de tarifa alta (*normal rate*) o de tarifa baja (*low rate*) está funcionando. La conmutación de las tarifas se efectúa con un relé (A), fijado al soporte

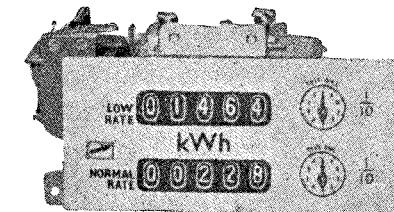


Figura V-24.

de ambos numeradores (fig. V-25), energizando su electroimán mediante un reloj exterior de contacto. Para mantener constantes los momentos de fricción que se originan en los engranajes de los numeradores, el mismo está accionado mediante un diferencial con ruedas

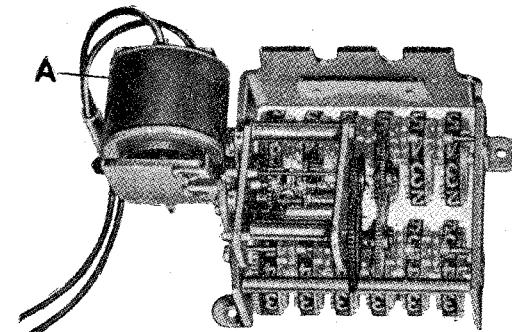


Figura V-25.

planetarias de modo que funciona un lado o el otro. La figura V-26 muestra el mecanismo de doble tarifa utilizado en los medidores de marca AEG.

El reloj que acciona el relé de numeradores, exterior al medidor, funciona por lo general a cuerda para evitar los efectos de interrupciones en el suministro de energía. El mecanismo de accionamiento del reloj tiene una reserva de cuerda que se le proporciona eléctricamente.

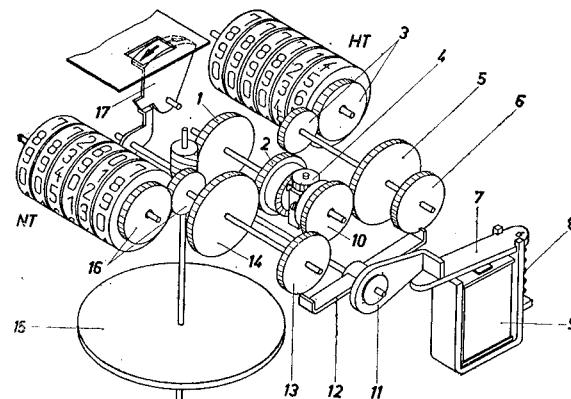


Figura V-26.

Esquema de funcionamiento del mecanismo contador de doble tarifa para contadores AEG.

Tarifa baja (NT) conectada.

1, rueda helicoidal; 2, rueda principal izquierda; 3, transmisión del mecanismo contador de tarifa alta (HT); 4, rueda planetaria; 5, rueda de transmisión al mecanismo contador de tarifa alta (HT); 6, rueda de trinquete del mecanismo contador de tarifa alta (HT); 7, armadura del conmutador de tarifa; 8, resorte de tracción; 9, disparador de tarifa; 10, rueda principal derecha; 11, palanca de trinquete; 12, resorte de la palanca de trinquete; 13, rueda de trinquete del mecanismo contador de tarifa baja (NT); 14, rueda de transmisión al mecanismo contador de tarifa baja (NT); 15, rotor del contador; 16, transmisión del mecanismo contador de tarifa baja (NT); 17, colisa.

La figura V-27 muestra un reloj de contacto marca AEG. El reloj está provisto de un dial de programación de conexiones y desconexiones del numerador de la tarifa baja mediante el desplazamiento de los contactos corredizos sobre la circunferencia del disco. Los discos de programación diaria (fig. V-28) realizan una vuelta completa en 24 horas. Cuando se trata de la programación semanal (tarifas bajas los sábados y domingos) se utiliza la modificación con la cual el disco de programación realiza la vuelta completa en 7 días (fig. V-29).

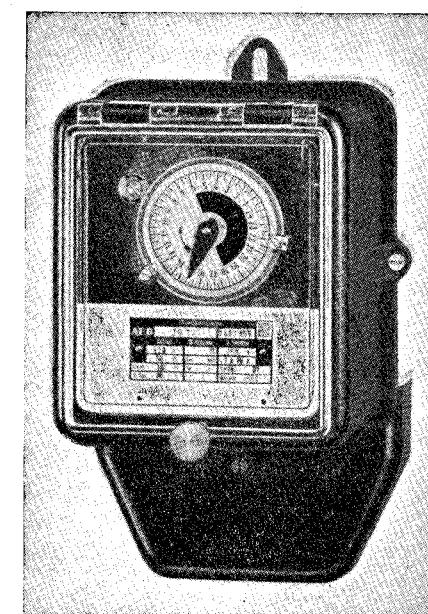


Figura V-27.

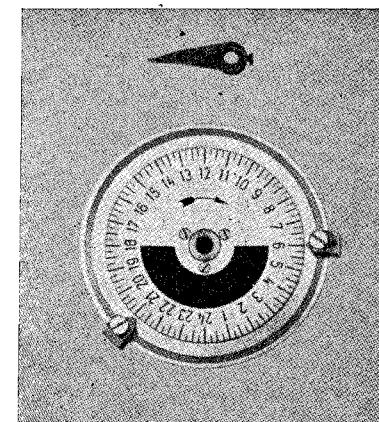


Figura V-28.

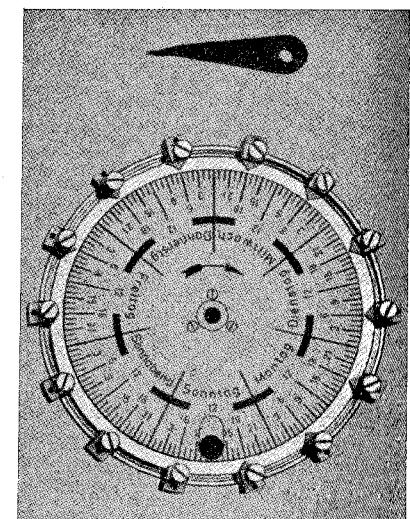


Figura V-29.

Los medidores de doble tarifa de construcción americana funcionan aproximadamente en la misma forma que los descritos, con la diferencia que el reloj de control está colocado dentro de la misma caja del medidor, de modo que el conjunto ocupa menos espacio.

Las figuras V-30 y V-31 muestran dos medidores de doble tarifa (fabricación polaca marca METRONEX), monofásico y trifásico respec-

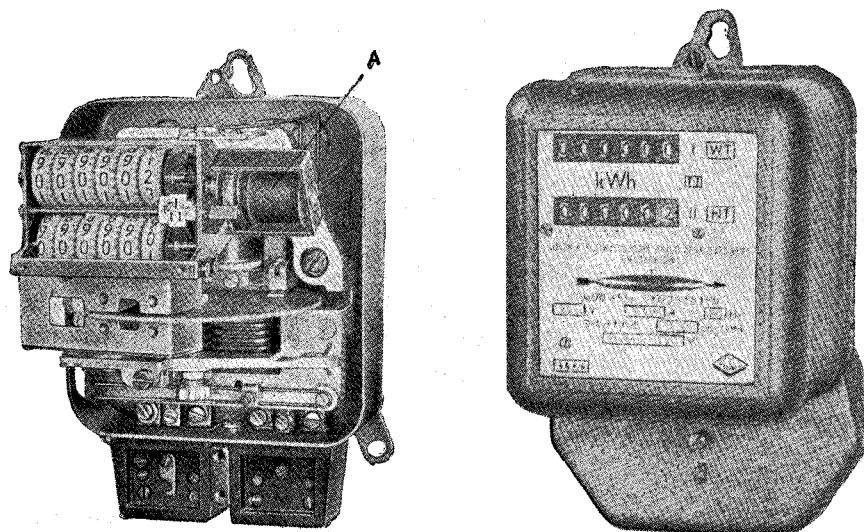


Figura V-30.

tivamente. En la figura V-32 se pueden apreciar los esquemas de conexión de medidores de doble tarifa con los relojes de conmutación. Los esquemas de conexiones de medidores de doble tarifa con los transformadores de intensidad y de tensión son similares a las conexiones de los medidores de energía activa.

Para las tarifas especiales se utilizan medidores de tres, cuatro y más numeradores (fig. V-33) cuyo funcionamiento y construcción están basados en la aplicación de mayor número de diferenciales en los mecanismos y relés múltiples.

Para el control de la potencia máxima requerida por el usuario durante ciertas horas del día, se utilizan los medidores especiales denominados "medidores de demanda máxima". Este control o la limitación de la potencia, y no de la energía, tiene por objeto evitar la necesidad de instalar muy altas potencias en plantas generadoras, potencias que implicarían una alta demanda de potencia durante ciertas horas

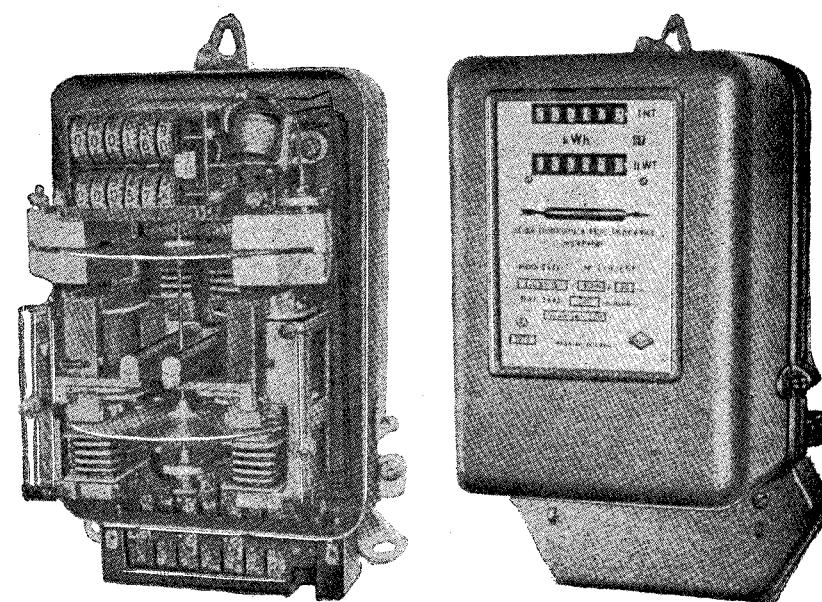


Figura V-31.

del día para luego funcionar a poca carga y, en consecuencia, con bajo rendimiento. Para aclarar estos conceptos se puede tomar el ejemplo siguiente:

A una red de energía eléctrica están conectados dos abonados: el abonado "A" cuya potencia instalada de recepción es de 1000 kVA y el abonado "B" con la potencia instalada de 100 kVA. El usuario "A" utiliza los 1000 kVA durante dos horas del día y durante las horas restantes 100 kVA solamente, mientras que el abonado "B" utiliza los 100 kVA en forma continua. Para la compañía generadora es más conveniente el abonado "B" de 100 kVA de potencia instalada pues para satisfacer su demanda es suficiente que la potencia de generación sea del orden de 100 kVA. En el caso del abonado "A", cuya demanda máxima es de 1000 kVA, la planta debe preverse para esta potencia la cual se utilizará durante ciertas horas del día solamente.

De este ejemplo se deduce que el abonado "B" debe pagar la energía consumida con una tarifa más económica que el abonado "A", ya que él no influye en los gastos fijos de instalación no aprovechable en la planta, en 100 %.

Lógicamente la carga que aparece momentáneamente en las instalaciones de usuarios grandes puede oscilar mucho; pueden aparecer

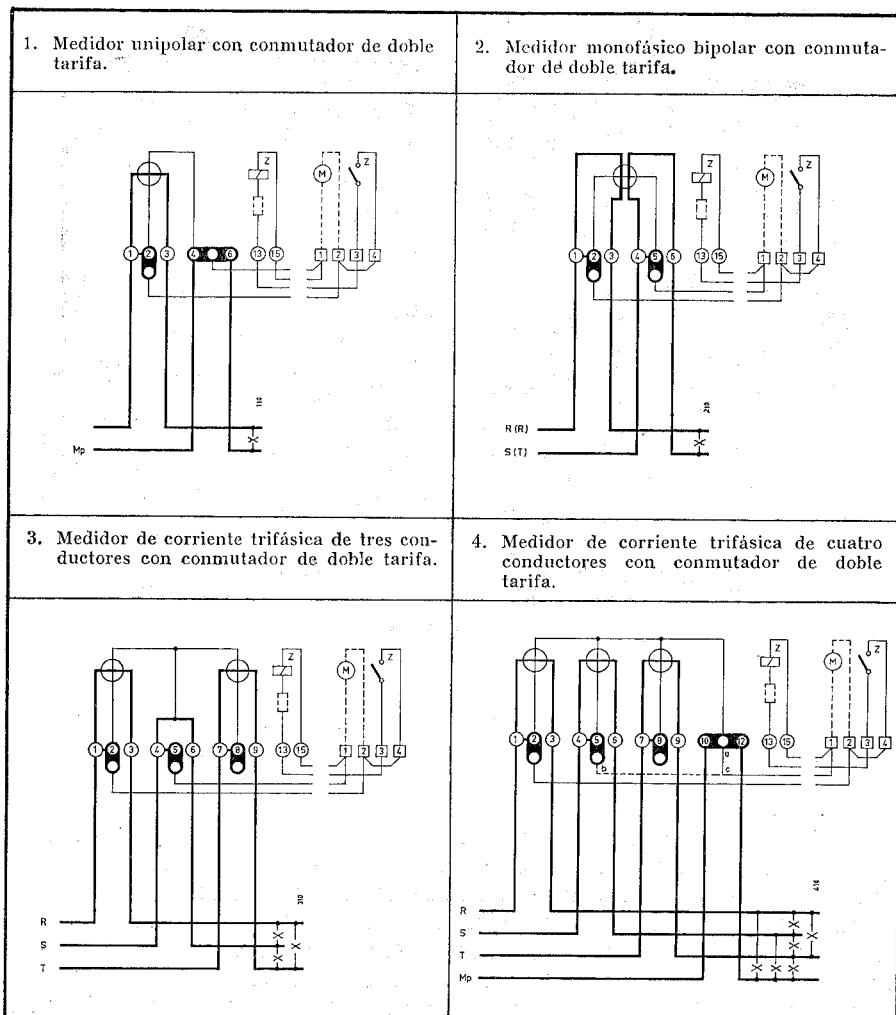


Figura V-32.

picos de poca duración (segundos o pocos minutos), los cuales pueden ser soportados sin dificultades por las plantas generadoras, pero que harían subir el precio unitario de la energía para el consumidor en forma desproporcional. Para obtener los valores medios de la potencia máxima requerida se utilizan los medidores de demanda máxima, me-



Figura V-33.

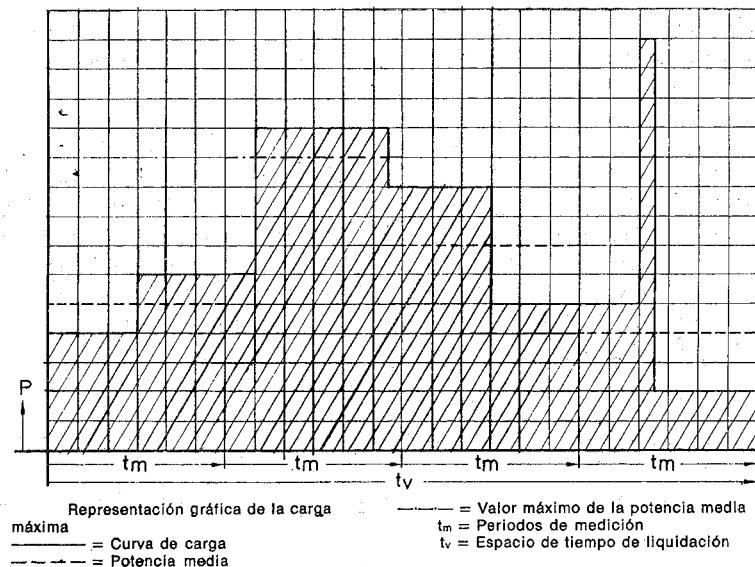


Figura V-34.

diente los cuales se obtiene el valor medio de la potencia máxima requerida durante un período de tiempo determinado con anterioridad, por ejemplo durante 15 o 30 minutos. Para tal interpretación se considera la potencia máxima (de demanda), o la carga máxima pedida, a un valor medio de la potencia máxima durante un período de medición considerado como período básico de cálculo. Este concepto ilustra la representación gráfica de la carga máxima en la figura V-34.

En los medidores de demanda máxima, la indicación de los kW requeridos es el resultado del cálculo del consumo en kWh dividido por el tiempo durante el cual este consumo ha sido registrado.

Ejemplo: Se tiene un medidor de demanda ajustado para indicar la demanda máxima durante 15 minutos y ésta resultará de la ecuación:

$$\text{Potencia máxima} = \frac{\text{Energía consumida durante } 15 \text{ min en kWmin}}{15 \text{ minutos}}$$

Si durante los 15 minutos se han utilizado los 150 kWh, la demanda máxima durante este lapso de tiempo es:

$$P_{dm} = \frac{150 \text{ kWh} \cdot 60 \text{ min}}{15} = 600 \text{ kW}$$

En conclusión, la demanda máxima de potencia que indican estos instrumentos es la carga media durante un predeterminado período de tiempo (15, 30 ó 60 min). Existen varios tipos de medidores de demanda máxima. Por lo general son los medidores de energía comunes cuyo numerador suma la energía consumida en kWh, pero adicionalmente su mecanismo está acoplado a un dispositivo que convierte los kWh en los kW de valor medido. En consecuencia, los medidores de demanda máxima están provistos, además del numerador que registra la energía consumida en kWh (kVArh o kVAh), de una escala graduada en kW o MW con una aguja indicadora. Según el ajuste previo del medidor, la aguja indica la carga media máxima durante un lapso de tiempo t_m predeterminado.

Medidores de demanda máxima (A1, B1, C2; A2, B1, C2; A2, B3, C2)

Existen básicamente dos sistemas diferentes de medidores de demanda máxima:

1. Medidores en los cuales el indicador de la demanda está mecánicamente acoplado al mecanismo propulsor del medidor de energía.

2. Medidores en los cuales el indicador de demanda funciona en base al calor y es independiente del mecanismo del medidor de energía.

El funcionamiento del medidor basado en el primer sistema se explica con el diagrama de bloques de la figura V-35. El disco rotor (1) del medidor impulsa a través del tornillo sin fin (2) al mecanismo del numerador que registra los kWh (MWh), representado por el bloque (4). El mismo rotor del medidor impulsa también, por intermedio del

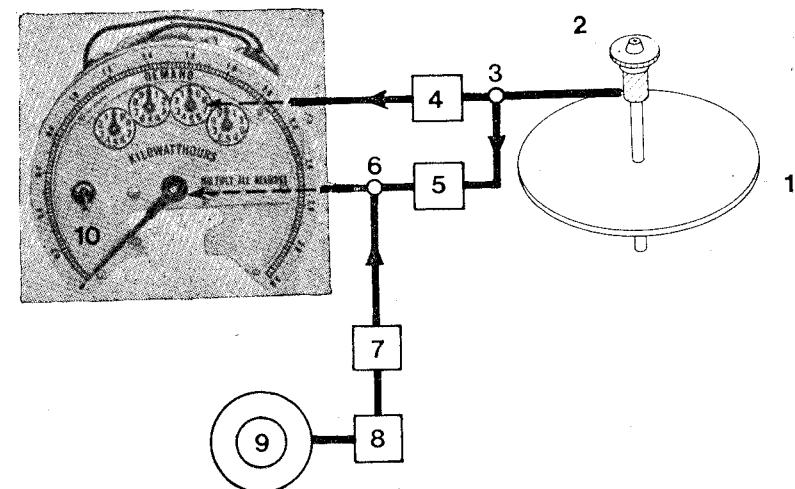


Figura V-35.

1, rotor del medidor; 2, sin fin del medidor; 3, acoplamiento del indicador de demanda; 4, engranaje del registro de kWh; 5, mecanismo que acciona la aguja de demanda máxima; 6, acoplamiento del mecanismo de reposición; 7, mecanismo reposición del impulsor; 8, temporizador; 9, motor sincrónico; 10, cuadrante del medidor.

acoplamiento (3), al mecanismo (5) que acciona al indicador de la demanda. Debido a que el mecanismo (5) está acoplado al tren de engranajes del numerador de kWh, no se podrá efectuar la reposición a cero de la aguja indicadora en los predeterminados períodos de tiempo. La aguja indicadora de los kW se mueve debido al impulso producido por el mecanismo (5). Al llegar la aguja a su desviación máxima, correspondiente al valor medio de la potencia máxima, un mecanismo temporizado (8), accionado por un motor sincrónico del reloj eléctrico, efectúa el desacoplamiento del impulsor de la aguja indicadora, volviendo éste a su posición inicial mientras que la aguja indicadora queda en la posición a la cual fue desplazada. Los intervalos de las reposi-

ciones pueden ser variados cambiando la relación de engranajes en el mecanismo temporizado.

Los pasos que tienen lugar en el indicador mecánico de demanda máxima se explican claramente mediante el gráfico de carga en el ejemplo de la figura V-36. En este ejemplo se consideran 7 intervalos (periodos de medición t_m), durante los cuales se observan los movimientos de la aguja principal propulsora y las posiciones de la aguja indicadora de la demanda máxima, debidas a las variaciones de carga:

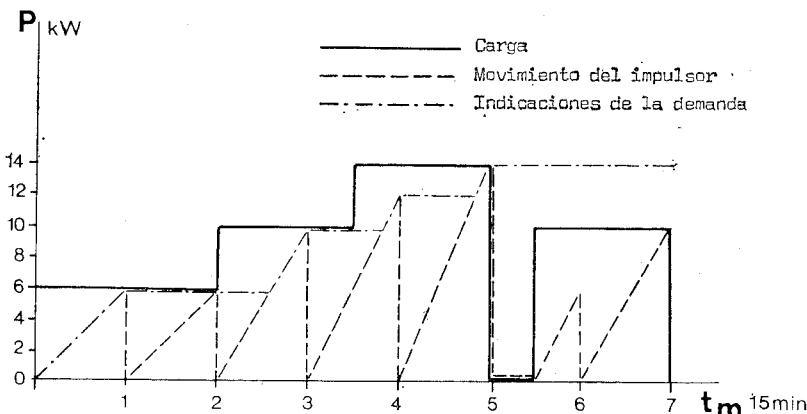


Figura V-36.

Ejemplo: Intervalos de la demanda.

1.^{er} intervalo: La carga $P = 6 \text{ kW}$.

La aguja principal impulsora se desplaza desde 0 hasta indicar 6 kW sobre la escala y vuelve a la posición 0. La aguja de la demanda máxima desplazada por la aguja impulsora se mueve desde 0 hasta 6 kW y queda en esta posición.

2.^o intervalo: La carga permanece constante $P = 6 \text{ kW}$.

La aguja impulsora se mueve desde 0 hasta 6 kW y vuelve a 0. La aguja de demanda permanece en la posición que indica 6 kW.

3.^{er} intervalo: La carga aumenta desde 6 a 10 kW ($P = 10 \text{ kW}$).

La aguja impulsora se mueve desde 0 hasta 10 kW, arrastrando la aguja de demanda hasta su nueva posición que indica 10 kW.

4.^o intervalo: En medio del intervalo la carga aumenta de 10 kW a 14 kW. El impulsor se desplaza desde 0 hasta 12 kW desplazando la aguja de la demanda hasta la posición 12 kW y vuelve a 0. La aguja de demanda permanece en la posición 12 kW.

5.^o intervalo: La carga permanece constante en $P = 14 \text{ kW}$. El impulsor se desplaza hasta 14 kW arrastrando la aguja de demanda desde 12 hasta 14 kW.

6.^o y 7.^o intervalos: Durante estos intervalos la carga baja a valores inferiores de modo que el impulsor sigue moviéndose sin llegar al valor de 14 kW y el indicador de la demanda permanece en su posición de 14 kW.

Las características de los medidores de energía con indicadores mecánicos de la demanda acoplados al sistema propulsor del medidor se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La respuesta es función lineal del tiempo.
- Después de cada ciclo de operación, la aguja impulsora se repone automáticamente en la posición cero.
- La indicación de la demanda en cada intervalo es directamente proporcional a la indicación del numerador de energía.
- El costo del medidor es más elevado debido a la alta precisión del mecanismo requerida.
- En el medidor de energía pueden aparecer errores adicionales debidos al acoplamiento y fricciones de los engranajes adicionales.
- Requieren un mantenimiento periódico frecuente.

La figura V-37 muestra un mecanismo completo de un medidor de energía con el indicador de demanda mecánico, de un medidor marca AEG, en el que, en lugar de una aguja se mueve un rodillo indicador.

A diferencia del indicador de la demanda mecánico, el cual recibe su impulsión del eje del rotor del sistema de medición de energía, el indicador de demanda térmico funciona con la potencia que se deriva del calor producido por la corriente de consumo. En consecuencia el indicador de la demanda puede ser construido como una unidad separada e independiente del medidor de energía (fig. V-38 a) o puede ser ubicado dentro de la caja del medidor de energía (fig. V-38 b). En el indicador de demanda térmico, el impulso mecánico requerido para el movimiento de la aguja indicadora se obtiene de la energía que convertida en calor produce la dilatación de la espiral bimetalica (primer tomo, Capítulo IX). El principio de la espiral bimetalica (1) (fig. V-39) está fijado al eje (2) de la aguja indicadora (4), y el extremo (3) al armazón. Al aplicar el calor a la espiral bimetalica ésta se expande ori-

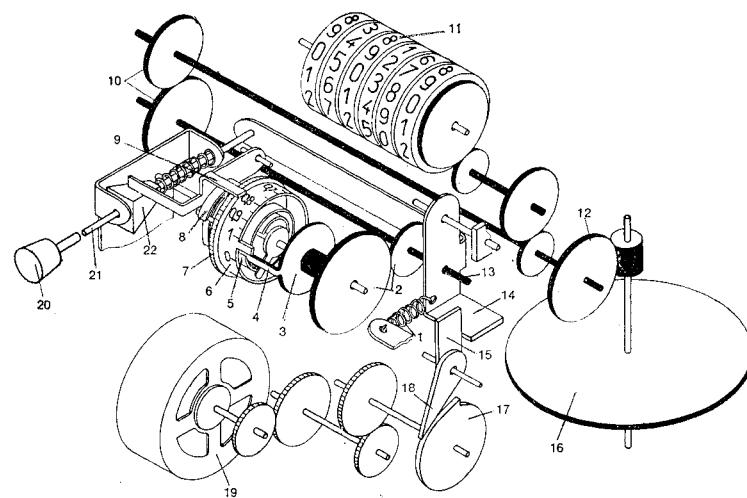


Figura V-37.

1, resorte de acoplamiento; 2, transmisión de acoplamiento; 3, dispositivo de arrastre; 4, pestaña de arrastre; 5, resorte antagonista del dispositivo de arrastre; 6, rodillo indicador de máxima; 7, rueda de trinquete; 8, resorte de reposición de máxima; 9, trinquete de bloqueo; 10, transmisión intermedia; 11, mecanismo contador de kWh; 12, rueda helicoidal; 13, eje giratorio; 14, palanca de acoplamiento; 15, palanca exploradora; 16, rotor del contador; 17, disco de tiempo; 18, trinquete de maniobra; 19, motor sincrónico; 20, botón de reposición; 21, clavija de reposición; 22, prisma de reposición.

ginando la rotación del eje (2) y el desplazamiento de la aguja (4) sobre la escala.

A base de este principio ya se han construido vatímetros electro térmicos, pero debido a la respuesta retardada de este tipo de instrumentos el sistema no tuvo mucha aceptación. En los últimos años, al aparecer la necesidad de aplicaciones de varias tarifas en función de la potencia máxima requerida durante cortos períodos de tiempo, este retardo en indicaciones del vatímetro bimetálico-térmico resultó ser un factor favorable en la construcción de los indicadores de demanda máxima.

El funcionamiento del indicador de demanda térmico se basa en el calentamiento diferencial de dos espirales bimétálicas (1) (fig. V-41) fijadas en oposición sobre el eje común (2), de modo que al calentarse

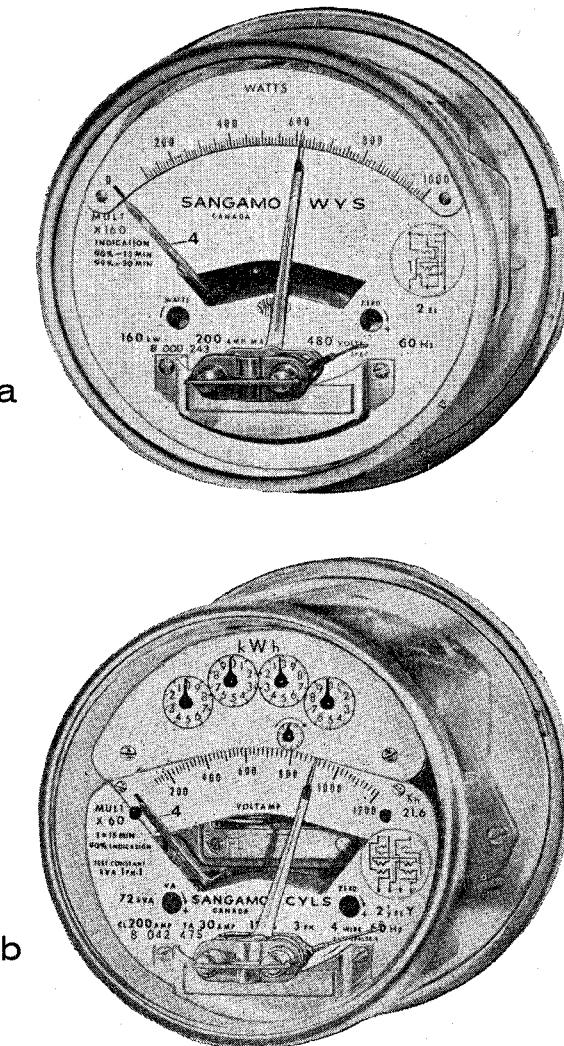


Figura V-38.

las dos espirales a la misma temperatura las fuerzas F de las espirales bimétálicas se compensan y el eje (2) con su aguja indicadora (4) permanece inmóvil. Para obtener mayor sensibilidad y uniformidad de las deflexiones, cada una de las espirales está encapsulada en cobre

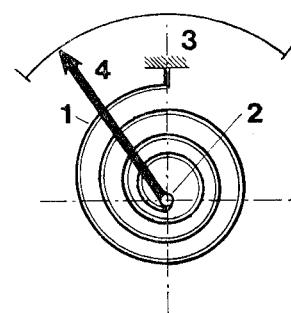


Figura V-39.

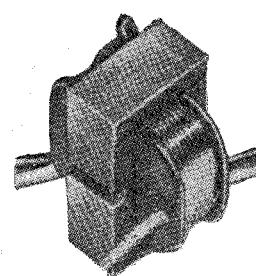


Figura V-40.

o en aluminio (5). Las cápsulas de cobre o de aluminio (5) sirven como acumuladores de calor. Cada una de las espirales bimetálicas está asociada con una resistencia calentadora (R), confeccionada con alambre de manganina, elemento que se caracteriza por muy bajo coeficiente resistivo de temperatura. El funcionamiento está basado, como en cualquier otro tipo de vatímetro, en la aplicación de la tensión y de la intensidad. El indicador no debe efectuar desviación alguna cuando falte cualquiera de los dos parámetros. Como fuente de una tensión proporcional a la de la red se utiliza un pequeño transformador (fig. V-40) cuyo secundario tiene la derivación en el punto medio del arrollamiento. La fig. V-41 a muestra el esquema de conexiones del indicador de demanda en el estado sin carga, o sea cuando actúa la tensión solamente.

Las dos resistencias calentadoras iguales ($R + R$) están conectadas en serie a la tensión secundaria del transformador que es proporcional a la tensión de la red U . En consecuencia, por el circuito circula la intensidad de corriente $I_u = \frac{U_s}{2R}$ proporcional a la tensión U , originando en ambos calentadores iguales cantidades de calor ($I_u^2 \cdot R$).

$$Q_A = P_A = I_u^2 \cdot R = \frac{U_s^2}{4 \cdot R}$$

$$Q_A = Q_B$$

$$Q_B = P_B = I_u^2 \cdot R = \frac{U_s^2}{4 \cdot R}$$

Las dos espirales bimetálicas están fijadas al eje en oposición, de modo que las fuerzas que se deben a la expansión de las espirales por

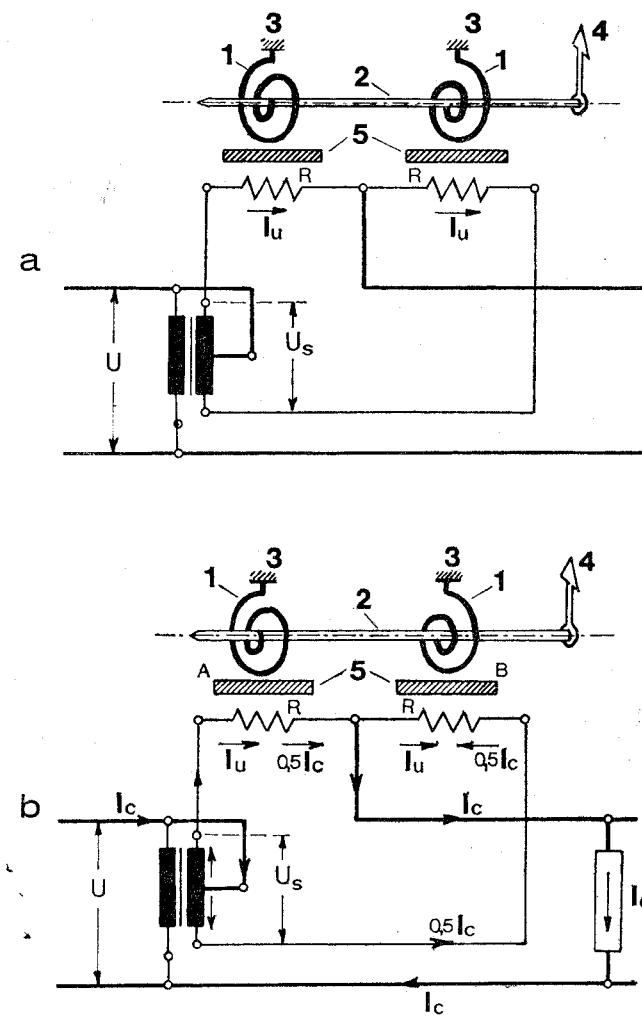


Figura V-41.

1, espiral bimetálica; 2, eje; 3, extremo fijo de la espiral; 4, aguja indicadora; 5, acumulador de calor; R , resistencia de manganina del calentador.

el calentamiento son iguales ($F_A = F_B$) y no producirán desviación de la aguja cuando por el circuito no circula corriente de carga.

En la figura V-41 b se puede apreciar el estado del circuito cuan-

do, debido a que el receptor está conectado, circula la corriente de carga I_c :

a. Por las dos resistencias en serie $2R$ circula la intensidad I_u originada y proporcional a la tensión U_s , $(I_u = \frac{U_s}{2R})$.

b. Debido a la carga aplicada circula la corriente I_c y en la derivación del arrollamiento secundario del transformador se bifurca en $2 \times 0,5 I_c$. En consecuencia, por la resistencia del calentador "A" circula la suma de las corrientes $I_u + 0,5 I_c$ y por la resistencia del calentador "B" circula la diferencia $I_u - 0,5 I_c$. Sustituyendo:

$$I_u = \frac{U_s}{2R} \quad \text{y} \quad 0,5 \cdot I_c = \frac{1}{2} I_c$$

$$Q_A \text{ o } P_A = \left(\frac{U_s}{2R} + \frac{I_c}{2} \right)^2 \cdot R \quad \text{y} \quad Q_B \text{ o } P_B = \left(\frac{U_s}{2R} - \frac{I_c}{2} \right)^2 \cdot R$$

$$Q_A - Q_B = P_A - P_B = U_s \cdot I_c$$

De esto resulta que la diferencia de calor originada por la diferencia de las potencias en los calentadores A y B origina un momento motor proporcional al producto $U \cdot I$. Siendo la componente activa de la intensidad que produce el calor $I \cos \phi$, las indicaciones de la aguja (4) son proporcionales a $U \cdot I \cdot \cos \phi$ [W, kW, MW]. Igual que en los medidores de demanda mecánicos, la aguja (4) (fig. V-38) solidaria del eje (2) es el impulsor de la aguja indicadora de la demanda, la cual queda en su posición hasta su reposición efectuada desde el exterior del instrumento.

La figura V-42 muestra el despiece de un indicador de demanda térmico fabricado por SANGAMO (Canadá). Las indicaciones cifradas tienen el mismo significado que las de la figura V-41.

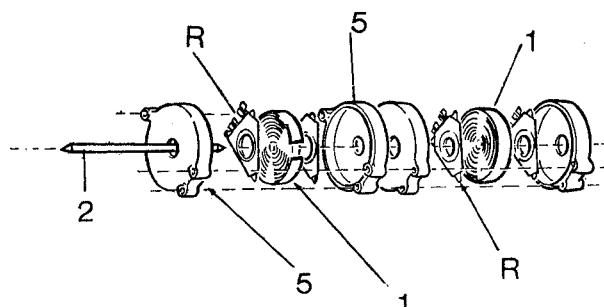


Figura V-42.

Debido a la capacidad acumulativa de calor del elemento, la indicación del instrumento no da una respuesta inmediata a los cambios de la carga. Este retardo se debe a que al aplicar calor a un cuerpo, al principio una porción de este calor es absorbido por él hasta que desaparezca la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el ambiente; luego se establece el equilibrio y las indicaciones de las variaciones de la carga siguen la curva exponencial de calor (fig. V-43).

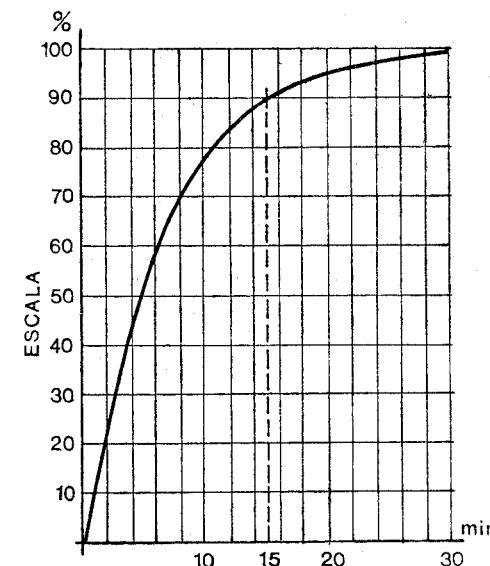


Figura V-43.

Cuando la carga se aplica a un instrumento calibrado, por ejemplo, al ciclo de operación de 15 min. de duración, se requieren 15 minutos para que el instrumento indique 90 % de la variación de la carga y hasta 30 minutos para que llegue a 99 %. Se fabrican indicadores de demanda con otras características, 30 min. para 90 % y 60 min. hasta 99 %. Los efectos del calentamiento por el sol u otras fuentes de radiación de calor son despreciables ya que los instrumentos de este tipo están provistos de un aislante térmico especial; además existen varios dispositivos compensadores (espirales bimetálicas adicionales, etc.) particulares para productos de cada fabricante.

El sistema térmico descrito se puede utilizar introduciendo ciertas modificaciones en la construcción de los indicadores de demanda

de potencia aparente y de potencia reactiva. El sistema térmico de indicadores de demanda máxima está muy divulgado en el continente americano y especialmente en Canadá (SANGAMO) y U.S.A. (GENERAL ELECTRIC) donde se obtienen resultados excelentes en este tipo de mediciones para la aplicación de varios tipos de tarifas, sin necesidad de recurrir a los complicados mecanismos de los indicadores mecánicos, ya descritos.

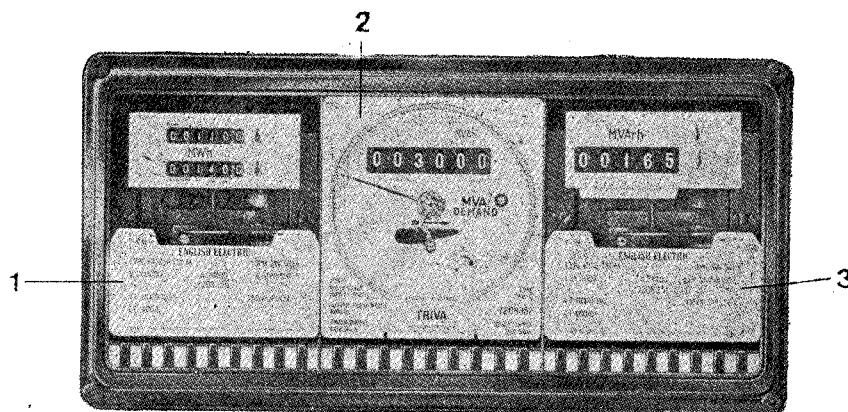


Figura V-44.

Finalizando este capítulo que introduce al lector en la variedad de tipos de medidores de energía eléctrica, la figura V-44 muestra un ejemplo de un tipo muy perfeccionado, marca TRIVA de ENGLISH ELECTRIC Co. LTD. (Inglaterra). El equipo consiste en las siguientes unidades montadas como conjunto:

1. El medidor de energía activa A_p (en MWh);
2. El medidor de energía aparente A_s (en MVArh), con el indicador de demanda máxima de potencia aparente S (en MVA), y
3. El medidor de energía reactiva A_q (en MVArh).

Capítulo VI

VERIFICACIÓN Y CONTRASTE DE MEDIDORES DE ENERGÍA

Como se ha mencionado anteriormente, el contraste del medidor de energía consiste en la determinación del grado de exactitud con el cual el medidor registra la energía y, en caso necesario, ajustarlo para que el error quede dentro de los límites establecidos por las normas correspondientes. Todos los medidores deben ser contrastados antes de instalarlos. El primer contraste se efectúa en la fábrica que los produce, luego, el comprador, que por lo general es el productor de la energía, contrasta los medidores en sus propios laboratorios o los hace contrastar en los laboratorios encargados de la fiscalización de medidores.

Durante la verificación o el contraste se compara la energía indicada por el medidor con una cantidad normalizada de energía, que se podría denominar "patrón de energía".

Se utilizan dos métodos de obtención del denominado "patrón de energía", uno basado en el producto Potencia \times Tiempo, y el otro acusado por un medidor de energía patrón. Cuál de los dos métodos es más conveniente depende de la cantidad de medidores a contrastar y de la exactitud del ajuste requerida.

Contraste por medio de POTENCIA \times TIEMPO

MÉTODO DE ROTOR

Al emplear el método de rotor se mide el tiempo que tarda en girar un determinado número de vueltas del disco al aplicar al medidor una determinada potencia. Conociendo la constante C_N del medidor ex-

presada en rev./1 kWh y la potencia P medida con el vatímetro en W, se calcula el tiempo nominal t_N que debe tardar el disco en efectuar n vueltas:

$$t_N = \frac{n \cdot 3600 \cdot 1000}{C_N \cdot P} \quad (\text{s})$$

Midiendo el tiempo t_m (tiempo medido) realmente transcurrido se obtiene el error relativo:

$$\delta \% = \frac{t_N - t_m}{t_N} \cdot 100 \quad (\%)$$

El error absoluto sería $\Delta = t_N - t_m$, concepto que no se utiliza en medidores de energía (ver primer tomo, Capítulo III).

El error se determina con varios valores de potencia aplicada, que difieren según las normas vigentes en cada país. Por lo general las normas exigen las siguientes condiciones:

1. $P = 100\%$; $U_{\text{Nom}} = 100\%$; $I_{\text{Nom}} = 100\%$; $\cos \varphi = 1$; $\delta \% < A$
2. $P = 10\%$; $U_{\text{Nom}} = 100\%$; $I_{\text{Nom}} = 10\%$; $\cos \varphi = 1$; $\delta \% < B$
3. $P = 50\%$; $U_{\text{Nom}} = 100\%$; $I_{\text{Nom}} = 100\%$; $\cos \varphi = 0,5$; $\delta \% < C$

A , B y C significan los valores permitidos por las normas pertinentes. Además de la determinación del error porcentual que aparece con las cargas determinadas en los puntos 1, 2 y 3, el medidor debe cumplir las siguientes condiciones:

4. Al aplicar 120 % de la tensión nominal (U_N) y sin carga ($I = 0$), el disco debe permanecer parado (giro en vacío).
5. Al aplicar 100 % de U_N y 100 % de I_N con $\cos \varphi = 0$, ($\varphi = 90^\circ$), el disco debe permanecer parado.
6. El medidor debe arrancar y seguir girando al aplicar 100 % U_N y 0,5 % I_N con $\cos \varphi = 1$.

Al utilizar el método de rotor en el laboratorio se emplean dos fuentes separadas, una para el circuito de tensión y la otra para el circuito de intensidad (ver tomo I, Capítulo XI, "método de carga ficticia"). Los medidores trifásicos se contrastan en las mismas condiciones que los monofásicos ajustando cada sistema por separado. Sin embargo, los procedimientos de ajuste de medidores trifásicos están recomendados por los fabricantes debido a la variedad constructiva de los mismos. En los ejemplos que siguen a continuación se seguirá el procedimiento convencional ya que el ajuste del medidor trifásico requiere algunas operaciones previas al contraste final.

El método "de rotor" es clásico y de la mayor exactitud. Su inconveniente es la aplicación individual a cada medidor por separado

de modo que se puede comprobar un solo medidor a la vez. Siendo este método de alta precisión, la cual depende de la precisión de los instrumentos utilizados (voltímetro, amperímetro, vatímetro y cronómetro), se presta para el contraste y verificación de los medidores patrón y en casos excepcionales (consumidores grandes). La exactitud de ajuste que se obtiene con este método oscila entre 0,02 y 0,08 %.

MÉTODO DEL NUMERADOR

Una variante del método de verificación por medio de Potencia \times Tiempo es el método del numerador. Este método permite la verificación (no contraste ni ajuste) de varios medidores (5 a 10) a la vez. Los medidores en prueba se conectan a la carga constante de valor nominal. Antes de iniciar la medición se anotan los numeradores de todos los medidores en prueba y luego, al conectar la carga, se deja que funcionen los medidores durante un tiempo nominal previamente calculado. El tiempo nominal se calcula por:

$$t_N = \frac{n \cdot 3600 \cdot 1000}{P \cdot 10^{x-1}}$$

donde: t_N es el tiempo nominal,

n es el número de vueltas que debe dar el último tambor del numerador (2 o 3 como mínimo) centesimal,

P es la potencia aplicada,

x es el número de cifras después de la coma (en el numerador).

Después de transcurrido el tiempo calculado (t_N) se desconecta la carga y se anota el registro de los numeradores. El error se calcula:

$$\% = \frac{A_m - A_N}{A_N} \cdot 100$$

donde: A_m es el valor de energía obtenido por la diferencia de las lecturas del numerador después y antes de conectar la carga,

A_N es el valor nominal de la energía ($P \cdot t$).

Para el contraste es de máxima importancia la regulación, afinación y la estabilidad de la potencia con la cual se carga el medidor en prueba y, a la vez la determinación de su valor exacto. En las operaciones de contraste que se efectúan en los laboratorios se utiliza el método denominado "de carga ficticia". En la verificación del medidor en el lugar de su instalación, que se hace con menor precisión, se

utiliza la carga real de valor apropiado. La carga real no permite la regulación independiente de la tensión y de la intensidad y además origina grandes gastos de energía.

El método de carga ficticia consiste en la alimentación del circuito de tensión y del circuito de intensidad, por separado. Por lo tanto, la tensión de valores nominales se aplica a las bobinas de tensión solamente (del vatímetro y de los medidores). Para las bobinas de intensidad, conectadas en serie (del vatímetro y de los medidores), las cuales tienen muy baja impedancia, se utiliza una tensión de alimentación muy reducida. Para esta alimentación de los circuitos de tensión y de intensidad por separado se puede utilizar:

a. Dos alternadores acoplados axialmente y accionados por el mismo motor de velocidad regulable y, en consecuencia, de la misma frecuencia. En este caso se consigue el factor de potencia requerido en el circuito vatímetro-medidor, haciendo girar el estator de uno de los alternadores con respecto al otro en el número de grados requeridos.

b. Dos transformadores de arrollamientos primarios conectados a la misma red. En este caso el desfase requerido se obtiene mediante un desfasador intercalado en el circuito de tensión.

En el medidor que se prueba con la carga ficticia se deben separar los dos circuitos, el de tensión y el de intensidad, quitando el puente entre los bornes 1 y 2 (ver figuras).

Las figuras VI-1, VI-2, VI-3, VI-4, VI-5 y VI-6 muestran los es-

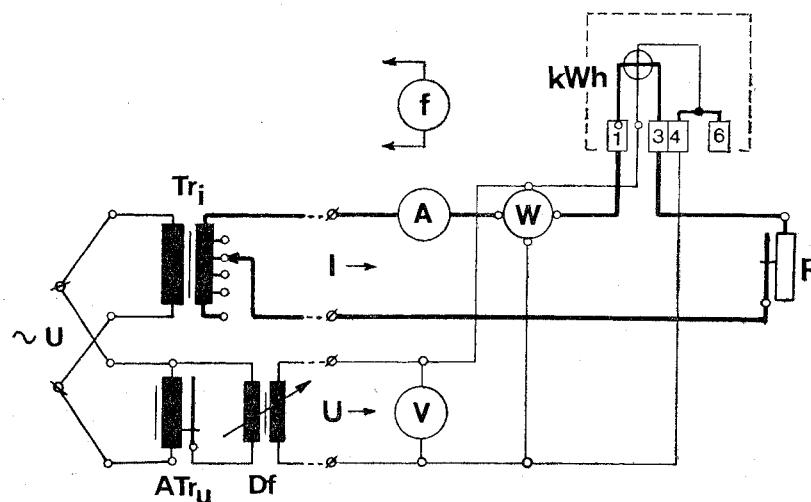


Figura VI-1.

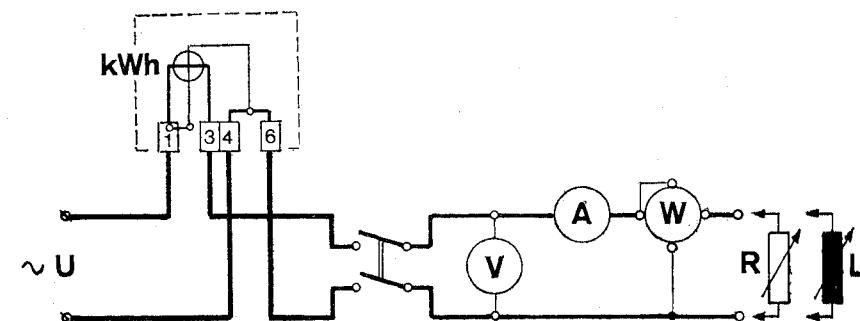


Figura VI-2.

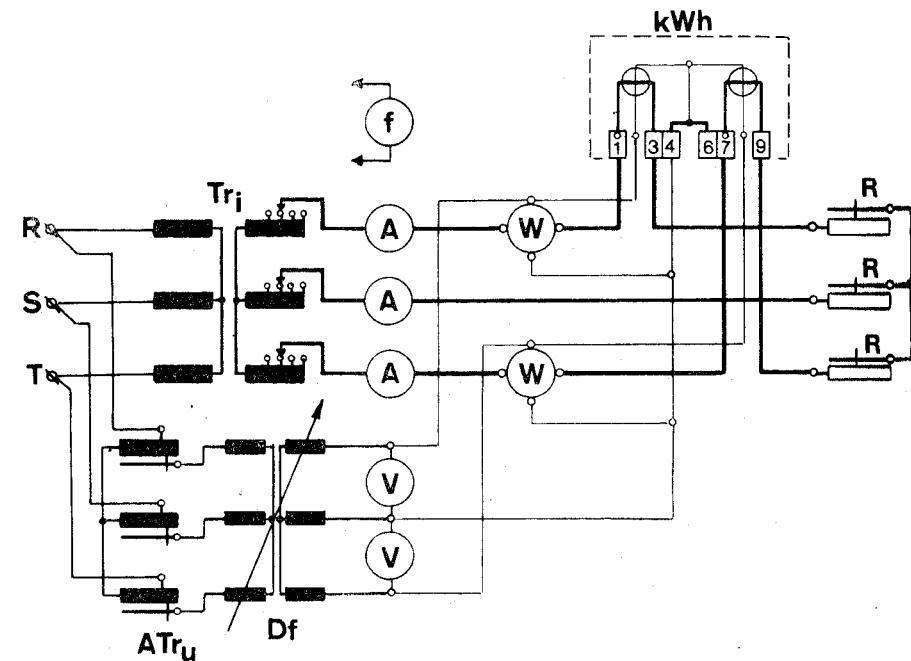


Figura VI-3.

quemas de conexiones que se utilizan para el contraste con carga ficticia y la verificación con carga, respectivamente, de medidas mono y polifásicos. Los bancos de prueba y de contraste para los laboratorios de fiscalización de medidores están construidos sobre el principio de las

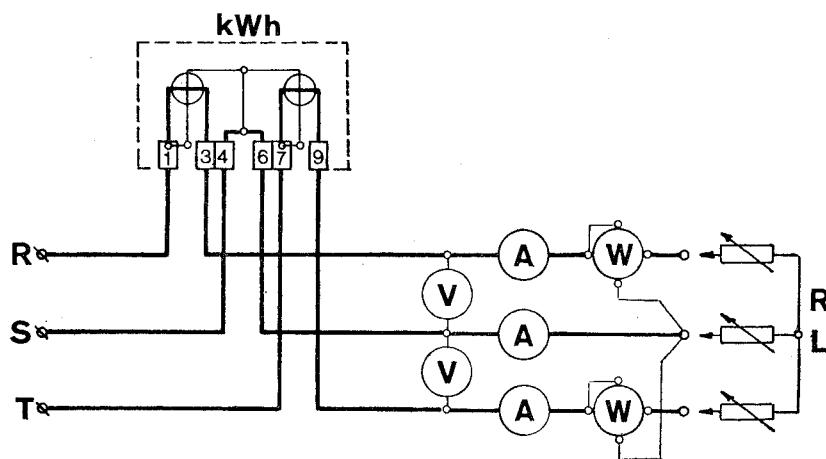


Figura VI-4.

figuras VI-1, VI-3 y VI-5. Como se puede apreciar en estos esquemas, el circuito de intensidad está alimentado por un transformador (Tr_i) cuyo secundario tiene varias tomas que permiten seleccionar la tensión de alimentación del circuito de intensidad. El valor de la tensión a utilizar depende de la impedancia total del circuito de intensidad constituida por la suma de las impedancias de la bobina de intensidad del vatímetro, de la bobina (o las bobinas) del medidor y de la resistencia de regulación R (1 a 2 Ω), y oscila entre 2 y 20 V aproximadamente. Seleccionando la tensión de alimentación y afinando con la resistencia R se obtiene la intensidad de corriente requerida para el contraste.

El circuito de tensión está alimentado por un autotransformador de relación variable (ATr_u) con el cual se puede obtener hasta 120 % de la tensión nominal, como mínimo, requerida para algunas condiciones de contraste. Además está intercalado un desfasador (Df) con el cual se puede desfasar el vector de tensión U_N con respecto al vector de intensidad I , obteniéndose de este modo cualquier valor del factor de potencia ($\cos \varphi$) entre 0 y 1. En el circuito de medición están conectados el vatímetro, el voltímetro y el amperímetro, todos ellos instrumentos de clase no inferior a 0,2. El frecuencímetro de control está conectado a la misma red que los transformadores.

El procedimiento del contraste y de la verificación de los medidores trifásicos es básicamente igual que el de los medidores monofásicos. Según el sistema del medidor se determina el valor de la potencia trifásica con dos o con tres vatímetros. Durante el contraste, el ajuste

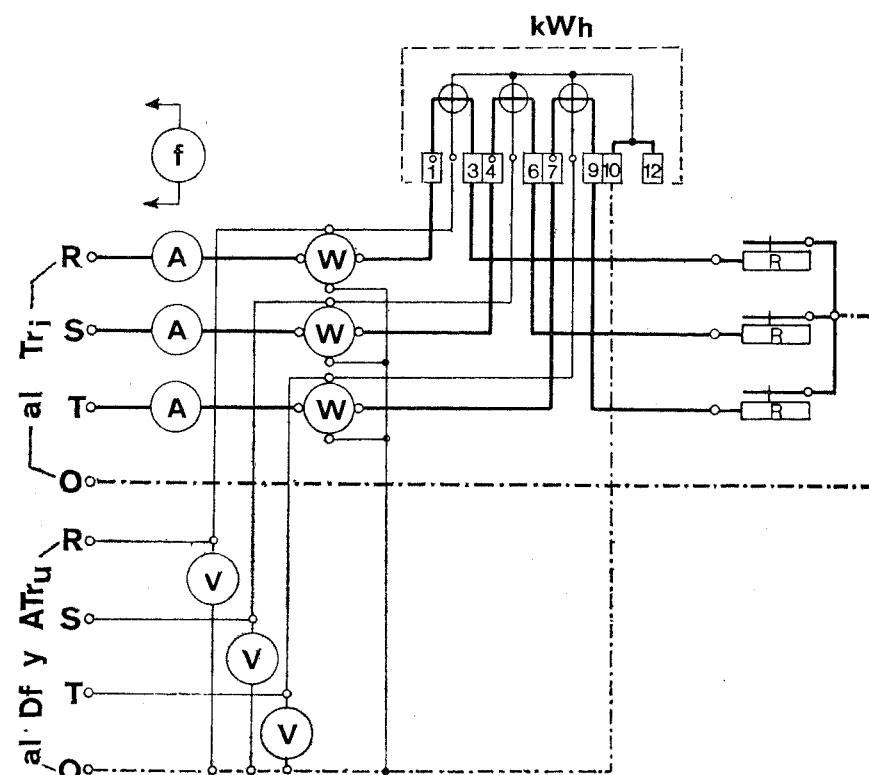


Figura VI-5.

de los medidores trifásicos resulta más complicado que el de los medidores monofásicos debido a que en el trifásico todos los sistemas motrices actúan sobre el mismo eje. El ajuste de dos o tres sistemas del medidor debe hacerse de tal manera que puedan registrar la energía equilibradamente. Cada uno de los sistemas del medidor trifásico debe ser ajustado en forma igual, para que todos tengan el mismo comportamiento con los diferentes tipos de carga: 100 %, $\cos \varphi = 1$; 10 %, $\cos \varphi = 1$; 100 %, $\cos \varphi = 0,5$. También cada uno de los sistemas debe ser ajustado por separado para que no origine la rotación en vacío al aplicar 120 % de la tensión nominal (sin carga) y cuando se le conecta una carga inductiva pura ($\cos \varphi = 0$), con 100 % de U_N y 100 % de I_N .

La figura VI-3 muestra el esquema de conexiones que se utiliza

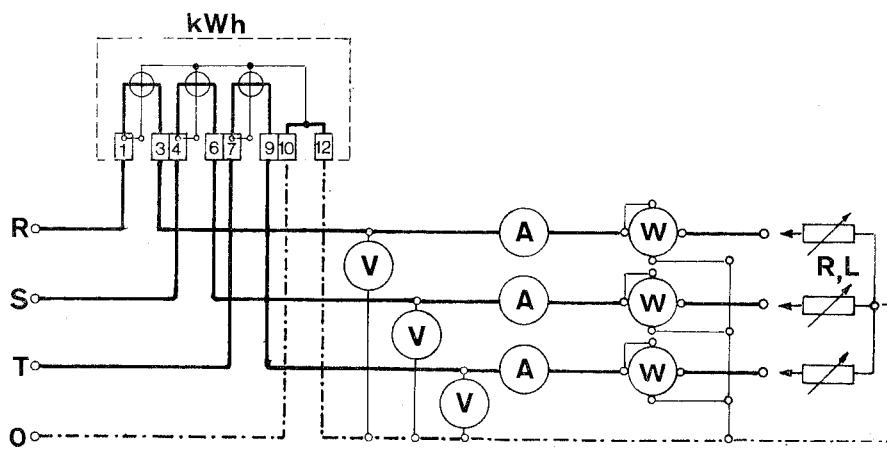


Figura VI-6.

en laboratorios de contraste. Como se puede apreciar en la figura, el sistema empleado es de "carga ficticia" originada por dos fuentes trifásicas separadas, para los circuitos de tensión y de intensidad respectivamente. En el esquema se ha representado el sistema más comúnmente utilizado, o sea de dos transformadores trifásicos regulables (Tr_i y ATr_u) conectados a la misma red trifásica.

La manera en que se efectúa el ajuste del medidor trifásico está, por lo general, indicado en las instrucciones provistas por la fábrica y puede diferir un poco según la marca y el modelo. Sin embargo, para que el lector tenga una idea de los procedimientos de ajuste del medidor trifásico, a continuación se enumeran algunas indicaciones al respecto. Los procedimientos señalados servirán como una guía para la eliminación de errores básicos de cada elemento motor por separado y para la equilibración de su funcionamiento.

Procedimientos a seguir en el contraste de medidores trifásicos

1. A la bobina de tensión de cada sistema motor por separado se aplica 120 % de la tensión nominal U_N ; en la bobina de intensidad, $I = 0$. El rotor debe permanecer parado.
2. La bobina de tensión de cada sistema motor por separado se conecta a la tensión nominal (U_N) y por la bobina de intensidad se hace circular la intensidad nominal (I_N). Luego, utilizando el desfasador (u otro medio) se produce el desfase de

90° ($\cos \varphi = 0$). El rotor debe pararse. Se repite la misma operación con cada uno de los sistemas.

3. Para equilibrar los momentos motor originados por cada uno de los sistemas se conectan las bobinas de tensión de ambos sistemas en paralelo a la tensión nominal U_N (de la bobina). Las bobinas de intensidad de ambos sistemas se conectan en serie en oposición. De esta manera, si los momentos motor de los dos sistemas son iguales, el rotor se mantiene parado.

Utilizando los dispositivos propios para cada tipo y modelo, mencionados en el Capítulo IV, se puede obtener un total equilibrio entre los sistemas motor de cada una de las fases.

4. Despues de efectuar las operaciones enumeradas en puntos 1, 2 y 3, se procede al ajuste final y al contraste de sistemas motor de cada una de las fases por separado, de igual manera que si fuera un medidor monofásico. Al contrastar el primer sistema motor se lo ajusta al error mínimo posible utilizando para la regulación el desplazamiento del imán (o de imanes) de freno. Luego, ajustando el otro elemento no se toca más este imán, utilizando para la regulación los otros dispositivos previstos tales como el cursor de la resistencia variable que cortocircuita las espiras adicionales sobre el electroimán de tensión o de intensidad (según el modelo), agregando o quitando las espiras de cortocircuito (6 en la fig. IV-7), o girando el tornillo "a" (fig. IV-9).
5. Despues del ajuste y contraste de los sistemas motor de cada fase por separado, se verifica el error del medidor con carga trifásica equilibrada ($U_R = U_S = U_T$; $I_R = I_S = I_T$; $\cos \varphi_R = \cos \varphi_S = \cos \varphi_T$), siguiendo las normas previstas para el medidor monofásico.

Durante el contraste de medidores trifásicos de dos sistemas, la potencia se verifica por el método Aron de dos vatímetros ($P_{\text{tot}} = P_I + P_{II}$) y de medidores de tres sistemas con el método de tres vatímetros ($P_{\text{tot}} = P_R + P_S + P_T$).

En U.S.A. y Canadá se utiliza un concepto de la constante del medidor diferente que en el sistema normalizado. En el sistema normalizado la constante del medidor se expresa:

$$C_N = \text{Rev}/1 \text{ kWh} \left(\frac{\text{Revoluciones del rotor}}{1 \text{ kilovatiohora}} \right)$$

En el sistema empleado en U.S.A. y Canadá la constante del medidor se expresa:

$$k_h = \text{Wh}/1 \text{ rev.} \left(\frac{\text{Vatioshora}}{1 \text{ revolución del rotor}} \right)$$

De esto surge la diferencia en la forma de calcular el error del medidor. Los ejemplos de verificación y contraste de medidores que se dan a continuación están basados en el sistema normalizado.

Ejemplo. Contrastar el medidor de energía de las siguientes características: Marca: AEG Tipo: J15H; N.^o 649470; Año fabricación 1968. Sistema monofásico. Valores nominales: $U = 110 \text{ V}$; $I = 10(30) \text{ A}$; $f = 60 \text{ Hz}$; $C_N = 1200 \frac{\text{rev.}}{1 \text{ kWh}}$.

Procedimiento. Se utiliza el método de carga ficticia según el esquema de la figura VI-1. Para el contraste se sigue los 6 pasos enumerados anteriormente.

1. A la bobina de tensión se conecta la tensión 120 % U_N : $110 \times 1,2 = 132 \text{ V}$. Se hace un pequeño ajuste de la lengüeta (3 en la figura IV-21) y se consigue que el disco quede parado.
2. A la bobina de tensión se aplica la tensión nominal $U_N = 110 \text{ V}$ y por la bobina de intensidad se hace circular la corriente nominal $I_N = 10 \text{ A}$. Se ajusta el equipo para que el vatímetro acuse el valor igual a $U \cdot I$. Se calcula el tiempo nominal que debe tardar el rotor para efectuar 10 vueltas:

$$t_N = \frac{3600 \cdot 1000 \cdot 10}{110 \cdot 10 \cdot 1200} = 27,27 \text{ segundos}$$

La primera medición del tiempo que tardó el rotor para efectuar las 10 vueltas es $t_m = 30 \text{ s}$ y da un error muy elevado:

$$\delta \% = \frac{27,27 - 30}{27,27} \cdot 100 = -10\% \text{ aprox.}$$

Se prosigue con el ajuste de la posición del imán de freno y finalmente se obtiene el tiempo $t_m = 27 \text{ segundos}$. Este valor da un error:

$$\delta \% = \frac{27,27 - 27}{27,27} \cdot 100 = +1\% \text{ (admisible)}$$

3. La tensión aplicada $U_N = 110 \text{ V}$; la intensidad $I = 1,0 \text{ A}$ (10 %); $\cos \varphi = 1$. El número de revoluciones que se cuentan $n = 5$. El tiempo nominal t_N :

$$t_N = \frac{3600 \cdot 1000 \cdot 5}{110 \cdot 1,0 \cdot 1200} = 136,4 \text{ s}$$

CUADRO DE VALORES

N. ^o	<i>f</i>	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>U · I</i>	<i>P</i>	$\cos \varphi$
	Hz	V	A	VA	W	
1	60	132	—	—	—	—
2	59,75	110	10	1100	1100	1
3	60	110	1,0	110	110	1
4	60,25	110	10	1100	550	0,5
5	60	110	10	1100	0	0
6	60	110	0,05	5,5	5,5	1

<i>n</i>	<i>t_N</i>	<i>t_m</i>	δ	Observaciones
	rev.	s	s	
—	—	—	—	120 % de U_N parado
10	27,27	27	+1	100 % U_N ; 100 % I_N $\cos \varphi = 1$
5	136,4	139	-1,9	100 % U_N ; 100 % I_N $\cos \varphi = 1$
10	54	52,5	+2,77	100 % U_N ; 100 % I_N $\cos \varphi = 0,5$
—	—	—	—	disco parado arranca

Después de efectuar el ajuste que compensa los efectos de la fricción se obtuvo el tiempo de rotación de las 5 vueltas del rotor $t_m = 139 \text{ s}$. El error correspondiente a 10 % de carga es:

$$\delta \% = \frac{136,4 - 139}{136,4} \cdot 100 = -1,9\%$$

4. Se aplica 110 V (100 %); 10 A (100 %); con $\cos \varphi = 0,5$; $n = 10$. El tiempo calculado es:

$$t_N = \frac{3600 \cdot 1000 \cdot 10}{110 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 1200} \cdot 100 = 54 \text{ s}$$

Ajustando con el cursor la resistencia "R" de la bobina 7 (fig. IV-7), se obtiene el tiempo de la rotación de 10 vueltas: $t_m = 52,5 \text{ s}$. El error correspondiente es:

$$\delta \% = \frac{54 - 52,5}{54} \cdot 100 = +2,77 \%$$

5. Se aplica 110 V; 10 A; con $\cos \varphi = 0$ (el vatímetro acusa cero). El rotor permanece parado.
 6. Prueba de arranque: con 110 V en la bobina de tensión se eleva la intensidad hasta que el medidor empieza a arrancar. Se obtuvo el arranque con $I = 0,95 \text{ A} = 0,5 \% \text{ de } I_N$. El medidor se considera contrastado.

Ejemplo. Determinar los valores reales de errores de un medidor retirado de la red cuyas características son las siguientes:

Marca: SIEMENS; Tipo W9C; N.º 30276094; Año 1965. Sistema: monofásico. Valores nominales: $U = 120 \text{ V}$; $I = 10 \text{ A}$; $f = 60 \text{ Hz}$; $C_N = 1200 \frac{\text{kWh}}{\text{kWh}}$.

Procedimiento. Se utiliza el método de carga real conectando el medidor según el esquema de la figura VI-2. La tensión de la red es $U = 115 \text{ V}$, lo que significa que se tiene a disposición 95,8 % de la tensión nominal del medidor. Se calcula el tiempo nominal que corresponde a esta tensión:

$$t_N = \frac{3600 \cdot 1000 \cdot 10}{115 \cdot 10 \cdot 1200} = 26 \text{ s} \quad (n_N = 10)$$

Por ser $U < U_N$ (95,8 %), la potencia aplicada $P < P_N$ es también inferior a la potencia nominal máxima. Sin embargo se puede considerar este valor como suficientemente aproximado para la determinación de errores. El tiempo medido de duración de 10 vueltas del disco es $t_m = 27,2 \text{ s}$ lo que significa que el error es:

$$\text{en } P \approx 100 \% : \quad \delta \% = \frac{27,2 - 26}{27,2} \cdot 100 = -4,6 \%$$

Procediendo a la verificación del error en 10 % de P_N ($I = 10 \text{ A}$) de la potencia nominal se cuentan 2 revoluciones del disco, lo que daría lugar a:

$$t_N = \frac{3600 \cdot 1000 \cdot 2}{115 \cdot 1,0 \cdot 1200} = 52,1 \text{ s}$$

El tiempo realmente transcurrido es $t_m = 55,5 \text{ s}$

$$\text{en } P \approx 10 \% : \quad \delta \% = \frac{52,1 - 55,5}{52,1} \cdot 100 = -6,52 \%$$

Por esta prueba se llega a la conclusión de que los errores del medidor están fuera de los límites establecidos por las normas y, en consecuencia, el medidor debe ser ajustado y contrastado nuevamente. Por tanto no se prosigue con la verificación con otros tipos de carga.

CUADRO DE VALORES

N.º	<i>f</i>	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>U · I</i>	<i>P</i>	$\cos \varphi$
	Hz	V	A	VA	W	
1	60	115	10	1150	1150	1
2	60	115	1	115	115	1

<i>n</i>	<i>t_N</i>	<i>t_m</i>	δ	Observaciones
	rev.	s	s	
10	26	27,2	-4,6	95,5 % de P_N (115 V — $U_N = 120 \text{ V}$)
2	51,7	54,5	-5,4	

MÉTODO SINCRÓNICO

Una variante del método de rotor es el método sincrónico. Se usa este método cuando se trata de contraste de varios medidores de la misma marca, modelo y características, en serie. El método está basado en la comparación visual simultánea de las velocidades de los discos de varios medidores con la velocidad del rotor de un medidor, de la misma marca, tipo y modelo, previamente contrastado por un método

de precisión y ajuste a un error mínimo ($\delta = 0$). El método sincrónico es muy usado en las fábricas y en los laboratorios de legalización de medidores y permite el contraste de varios medidores a la vez, por lo general hasta 16. La figura VI-7 muestra el esquema básico según el cual están construidos la mayoría de los bancos de contraste que utilizan las compañías.

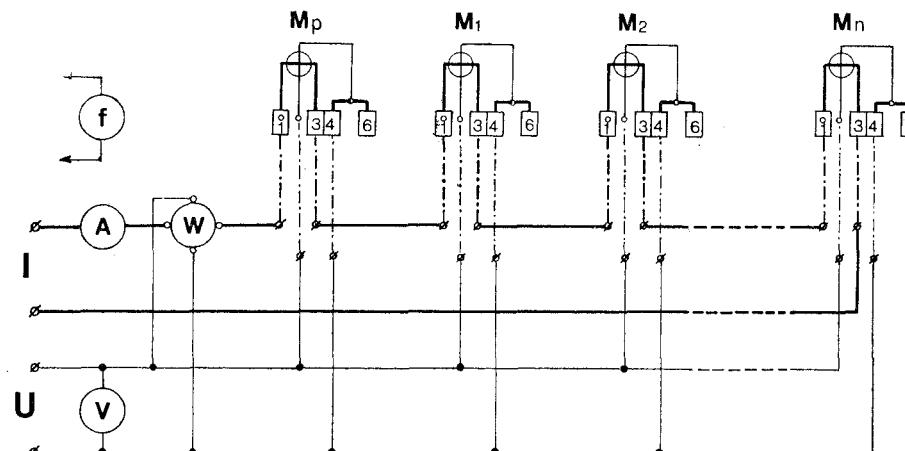


Figura VI-7.

Como se puede apreciar en la figura, están conectadas en serie todas las bobinas de intensidad, o sea la del vatímetro, la del medidor patrón y todas las de los medidores en contraste. De este modo, a través de todas las bobinas de intensidad circula la misma corriente. El circuito (de intensidad) está alimentado por una fuente de baja tensión (2 a 20 V), que puede ser un transformador (Tr_i) o un alternador especial. Las bobinas de tensión, o sea la del vatímetro, la del medidor patrón y las de los medidores contrastados, están conectadas en paralelo y alimentadas por otra fuente de tensión regulable (ATr_u o un alternador). En el caso de emplear los transformadores, ambos deben ser conectados a la misma red y en el caso de alternadores ambos deben ser accionados por el mismo motor, para que ambos circuitos de intensidad y de tensión tengan la misma frecuencia. De este modo todos los medidores están sometidos a la denominada "carga ficticia". Para control del circuito se utilizan el vatímetro, el voltímetro y el amperímetro, todos de clase no inferior a 0,2. Para obtener el efecto de varios valores de $\cos \phi$ se utiliza un desfasador para los transformadores o un movimiento axial de uno de los alternadores. Antes de

iniciar el procedimiento se colocan todos los medidores de tal manera que una sola persona pueda observar simultáneamente el movimiento de todos los discos.

Contraste:

1. Se colocan los discos de todos los medidores, del patrón inclusive, de manera que la marca sobre cada disco (10 en la fig. IV-19) quede visible. Se aplica 120 % de la tensión nominal correspondiente al medidor, con el circuito de intensidad desconectado. Todos los discos deben permanecer parados, caso contrario se efectúan los ajustes necesarios.

2. Se vuelven a colocar los discos en sus posiciones iniciales y siguiendo las normas de contraste se ajustan ambos circuitos (de tensión y de intensidad). Según las normas utilizadas se exigirán algunas o todas las condiciones siguientes:

1. 100 % de U_N , 100 % de I_N , $\cos \phi = 1$.
2. 100 % de U_N , 10 % de I_N , $\cos \phi = 1$.
3. 100 % de U_N , 100 % de I_N , $\cos \phi = 0,5$.

Siguiendo estas exigencias, en cada caso se supone un determinado número de revoluciones del disco del medidor patrón (M_p), por ejemplo, para las condiciones enumeradas en el punto 1, $n = 10$; en el punto 2, $n = 2$ ó 3 y para el punto 3, $n = 5$. Se conectan ambos circuitos (de tensión y de corriente) y observando todos los medidores se cuenta el número de vueltas del disco patrón. Al terminar la última revolución se desconecta el circuito y se observan las posiciones de los discos en los distintos medidores ($M_1, M_2 \dots M_n$) comparándolas con la posición del disco del medidor patrón (M_p). Si el disco de un determinado medidor queda adelantado con respecto al del patrón, el error es positivo o viceversa. El porcentaje del error de cada medidor se puede determinar utilizando una regla curva (1) (fig. VI-8), con la cual se mide la desviación. Colocándola en la forma señalada en la figura, en el mismo plano del disco (2) se observa la posición de la marca (3) con respecto a la escala de la regla. La mayoría de los fabricantes de medidores proveen a éstos de una escala graduada estampada sobre la circunferencia del disco (fig. IV-19 b), lo que permite la lectura directa del error. Se ajustan los medidores repitiendo la operación hasta que todos los errores queden dentro de los límites establecidos por las normas.

3. Control final. Se ajusta la tensión a su valor nominal (100 % de U_N y 100 % de I_N) y, aplicando el desfase de $\cos \phi = 0$, los medidores

deben permanecer parados. Luego se verifica la intensidad de corriente con la cual el medidor arranca y sigue girando.

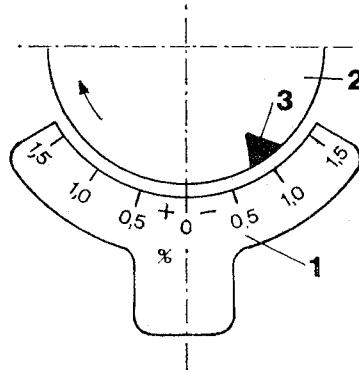


Figura VI-8.

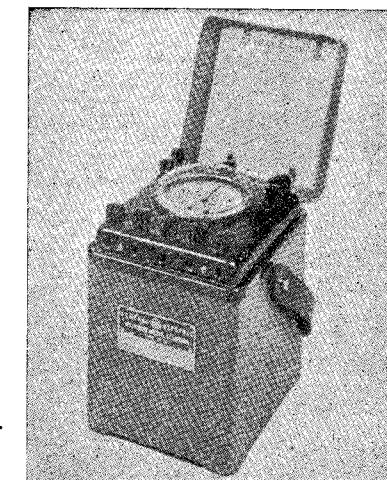
Contraste por medio de medidor patrón

MÉTODO INDIVIDUAL

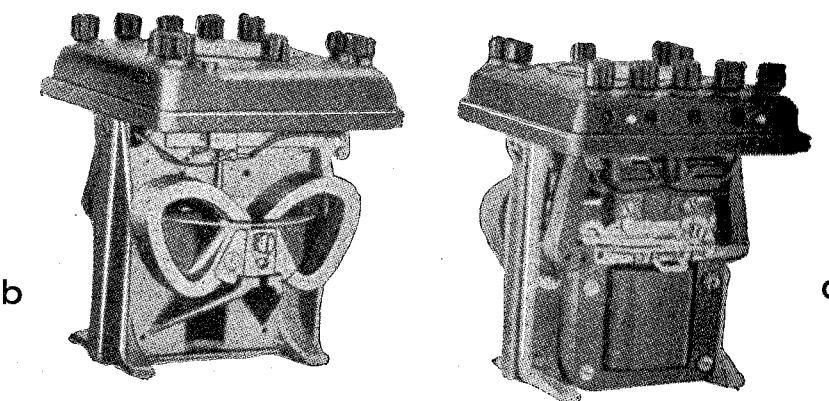
El medidor patrón es un instrumento expresamente construido para efectuar los contrastes y las verificaciones rápidas de los medidores en el lugar de su instalación. Su parte indicadora consta de varios diales relacionados en década y provistos de las agujas indicadoras. El tipo de medidor patrón más divulgado y en uso de las compañías, está provisto de tres diales, uno grande y dos pequeños. Una revolución completa de la aguja sobre el dial grande, graduado en 100 divisiones, corresponde a una revolución del disco del medidor patrón, lo que permite efectuar lecturas hasta $\frac{1}{100}$ de una revolución.

Los otros dos diales relacionados en década indican unidades y decenas de revoluciones. Por medio de un pulsador "p" se pone en funcionamiento o se para el medidor. Mediante un dispositivo especial se hace volver a las tres agujas a la posición cero. Los medidores patrón se fabrican para varios alcances de corriente y de tensión de modo que un mismo patrón se puede utilizar para la verificación de varios tipos de medidores. La figura VI-9 muestra un patrón, marca GENERAL ELECTRIC. Los alcances de este patrón son 1,0; 5,0; 12,5 y 50 A y se lo puede utilizar en 120 y 240 V.

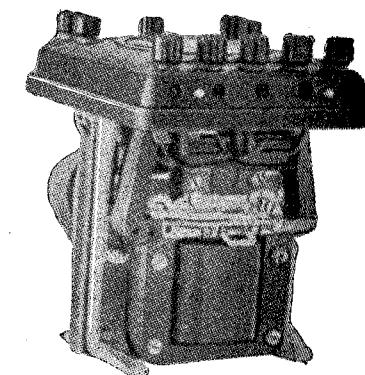
La figura VI-9 a muestra la vista exterior del instrumento y las figuras IV-9 b y VI-9 c muestran el medidor retirado de la caja. Se pueden apreciar los dos imanes de freno (b) y el equipo motor (c). La



a



b



c

Figura VI-9.

figura VI-10 muestra la conexión del medidor en prueba con el medidor patrón. Las escalas del medidor patrón pueden ser graduadas en kWh, Wh o en revoluciones.

Las figuras VI-11 y VI-12 muestran dos tipos de medidor patrón,

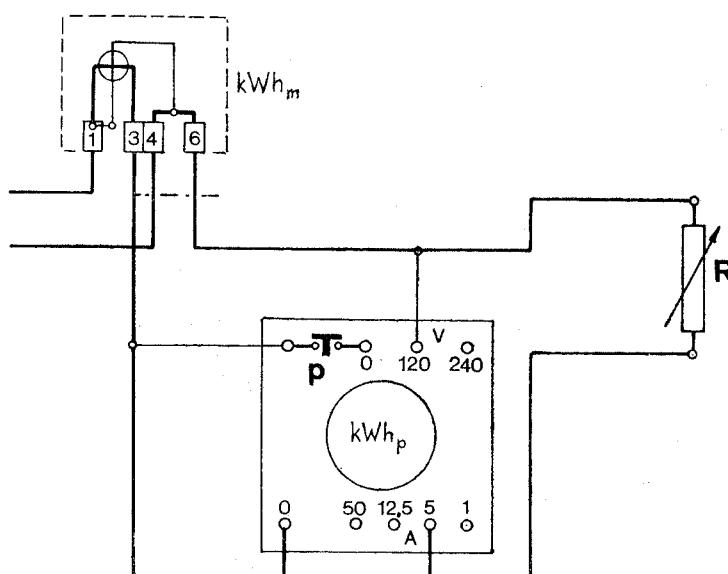


Figura VI-10.



Figura VI-11.

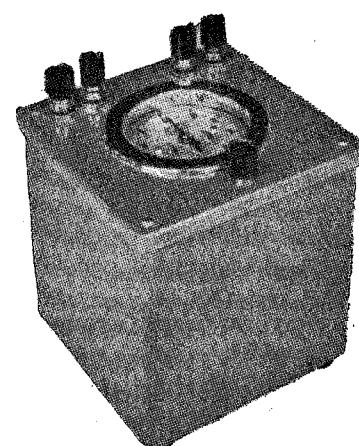


Figura VI-12.

marca COMP. DE COMPTEURS (Francia); uno es similar al patrón de la figura VI-9 y el otro es un modelo para montarlo en un tablero.

Procedimiento. Como se puede apreciar en el esquema, se aplica la misma carga a ambos medidores, el patrón y el verificado, y se cuenta un predeterminado número de vueltas del disco del medidor examinado. El disco del medidor patrón se pone en movimiento y se para mediante el interruptor, pulsador "P", intercalado en el circuito de tensión del patrón, de modo que la lectura tomada comprende el número de revoluciones del disco y sus fracciones, efectuadas durante un lapso de tiempo. Simultáneamente se cuenta un predeterminado número de revoluciones del disco del medidor a verificar y al terminar su recorrido se para el patrón. El predeterminado número de vueltas n se calcula para que el tiempo de duración del recorrido sea de 50 a 60 segundos aproximadamente.

Para determinar el valor exacto de la carga aplicada (en W o kW) hay que tomar, utilizando un cronómetro, el tiempo durante el cual el disco del patrón efectúa el predeterminado número de revoluciones:

$$P = \frac{3600 \cdot n_N}{C_N \cdot t} [\text{kW}] = \frac{3600 \cdot 1000 \cdot n_N}{C_N \cdot t} [\text{W}]$$

Para determinar el error del medidor se parte de la ecuación básica:

$$\delta \% = \frac{A_m - A_N}{A_N} \cdot 100$$

donde: A_m es la energía acusada por el medidor a verificar, y A_N es la energía registrada por el medidor patrón.

Sustituyendo: $A_m = \frac{1}{C_m} \cdot n_m$; $A_N = \frac{1}{C_N} \cdot n_N$ donde C_m y C_N son las constantes del medidor en prueba y del medidor patrón respectivamente y n_m son las revoluciones enteras del medidor a contrastar contadas durante la operación, n_N son las revoluciones registradas por los diales del patrón (con fracciones). Se obtiene:

A. Cuando el medidor patrón está graduado en revoluciones el error se calcula:

$$\delta \% = \frac{C_N \cdot n_m}{C_m \cdot n_N} \cdot 100 - 100 \quad [\%]$$

La exactitud del medidor (el término utilizado en U.S.A.):

$$\text{exactitud \%} = \frac{C_N \cdot n_m}{C_m \cdot n_N} \cdot 100 \quad [\%]$$

B. Cuando el medidor patrón está graduado en kWh (o en Wh) el error se calcula por:

$$\delta \% = \frac{A_m}{A_N} \cdot 100 - 100 \quad [\%]$$

$$\text{exactitud \%} = \frac{A_m}{A_N} \cdot 100 \quad [\%]$$

El método de verificación y de contraste por medio de medidor patrón es adecuado para las verificaciones individuales. La exactitud del método descrito no es muy alta cuando se utiliza el patrón con las cargas pequeñas (10 % y 20 %). Cuando se requiere utilizar el patrón para contrastes exactos se deben emplear transformadores de tensión y de intensidad especiales que permiten la aplicación in situ de la carga ficticia.

Ejemplo: Se verifica en el lugar de instalación el medidor de energía de las siguientes características: Marca FUJI ELECTRIC Co. LTD.; tipo 71G; n.º 929071; tensión nominal $U_N = 120$ V; intensidad nominal $I_N = 10$ A; $f = 60$ Hz; constante $C_m = 750$ rev./kWh.

Medidor patrón: Marca COMP. DE COMPTEURS. Tipo E2 \times 1A; alcances de intensidad: 0,025 — 0,05; 0,1-0,2; 0,3-0,5; 1 — 5; 10-20-30 A; alcances de tensión: 127, 220 y 380 V; constante $C_N = 500$ rev./kWh.

Procedimiento: A base de cálculo se predetermina el número de revoluciones del disco del medidor a verificar, $n_m = 15$ rev., las cuales en el caso de error $\delta = 0,0\%$, se efectuarán en 60 segundos.

Se conectan en serie ambos medidores (fig. VI-12) y se carga la línea con una potencia aproximada a 100 % de la potencia nominal. La potencia nominal del medidor examinado se calcula $P = U_n \cdot I_N = 120 \text{ V} \cdot 10 \text{ A} = 1200 \text{ W}$. Debido a las condiciones de la red, la tensión aplicada es de 115 V. En consecuencia, durante la prueba la potencia aplicada de carga será:

$$\frac{115 \text{ V} \cdot 10 \text{ A}}{120 \text{ V} \cdot 10 \text{ A}} \cdot 100 = 96 \% P_{\text{Nom}}$$

aceptable para la verificación.

Pulsando el pulsador "p" del medidor patrón en el instante en que el disco del medidor en prueba pasa por un punto fijo se cuentan las 15 revoluciones predeterminadas y se para el patrón. Durante este lapso el disco del medidor patrón efectuó $n_N = 10,25$ rev. El error y la exactitud se calculan:

$$\delta \% = \frac{C_N \cdot n_m}{C_m \cdot n_N} \cdot 100 - 100 = \frac{500 \cdot 15}{750 \cdot 10,25} \cdot 100 - 100 = -2,43 \%$$

$$\text{exactitud \%} = \frac{C_N \cdot n_m}{C_m \cdot n_N} \cdot 100 = \frac{500 \cdot 15}{750 \cdot 10,25} \cdot 100 = 97,56 \%$$

Los resultados obtenidos se resumen en el cuadro de valores.

CUADRO DE VALORES

N.º	en prueba		patrón		U
	C_m	n_m	C_N	n_N	
	rev/kWh	rev	rev/kWh	rev	
1	750	15	50	10,25	115
2					

I	P	$\cos \phi$	Exac-	δ	Observa-
			titud		
			%		
10	96	1	97,56	-2,43	

VERIFICACIÓN EN MASA

Para la verificación o para el contraste final simultáneamente de grandes cantidades de medidores, se utiliza, especialmente en las fábricas de medidores, un método similar al ya descrito método sincrónico, con la diferencia que no está basado en la comparación de los desplazamientos de los discos sino en la comparación de las lecturas de los numeradores con la energía registrada por el medidor patrón. Debido a que el indicador de la última cifra (centésimas) del numerador (tambor o aguja sobre la esfera) debe efectuar aproximadamente dos vueltas completas durante cada medición, la prueba es de una duración relativamente larga. En cambio, el método tiene la ventaja de permitir la verificación de unos cien medidores simultáneamente.

Para contrastar o verificar los medidores "en masa", o sea en grandes cantidades simultáneamente, se les conecta en serie con un patrón (fig. VI-7) y luego se les aplica varias cargas determinadas por

las normas (100 %; 10 %, etc.) durante un tiempo prolongado. Luego, se determinan los errores de los medidores a verificar a base de la comparación de los valores de la energía registrada por cada uno de ellos con el valor indicado por el medidor patrón.

Considerando que:

A_m es el valor de la energía registrada por el medidor en prueba,

A_N es el valor indicado por el patrón,

se determina el error de cada uno de los medidores mediante la fórmula:

$$\delta \% = \frac{A_m}{A_N} \cdot 100 - 100 \quad [\%] \quad \text{o} \quad \delta \% = \frac{A_m - A_N}{A_N} \cdot 100 \quad [\%]$$

La mejor manera es hacer funcionar el circuito con la carga pre-determinada hasta que el patrón acuse el valor de la energía correspondiente al valor de la carga (100 % $U_N \cdot 100 \% I_N \cdot \cos \varphi = 1$; 100 % $U_N \cdot 10 \% I_N \cdot \cos \varphi = 1$; 100 % $U_N \cdot 100 \% I_N \cdot \cos \varphi = 0,5$, etc.).

Utilizando con el método de verificación "en masa" un medidor de alta precisión y también empleando los períodos largos de las aplicaciones de las correspondientes cargas, se pueden verificar grandes cantidades de medidores con personal muy reducido.

TABLA COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS DE CONTRASTE
Y DE VERIFICACIÓN

DESIGNACIÓN DENOMINACIÓN	APLICACIONES PARA:		EMPLEADO EN:
	Por medio de: Potencia × tiempo	Método de rotor.	
	Método de numerador.	Contrastes y verificaciones individuales de alta precisión.	Laboratorios de contraste y de legalización y laboratorios de grandes empresas de venta y de distribución de energía eléctrica.
	Método sincrónico.	Verificación simultánea de varios medidores (pequeñas series).	Compañías de generación de energía eléctrica.
Con Medidor patrón	Método individual.	Ajuste y verificación simultánea de varios medidores del mismo tipo (series hasta 16).	Compañías de generación y de venta de energía eléctrica (sección medidores).
	Verificación en masa.	Verificaciones individuales en el lugar de instalación.	En compañías eléctricas. Departamentos de distribución.
		Verificaciones finales de grandes cantidades de medidores (hasta 100 simultáneamente).	En fábricas de medidores.

Apéndice

NORMAS PARA MEDIDORES DE ENERGIA

Las normas españolas UNE que a continuación se transcriben son reproducidas con autorización expresa del Instituto Nacional de Racionalización y Normalización.

UNE 21 310 h1

Contadores de energía eléctrica de corriente alterna. Activa clases 1 y 2 y reactiva clase 3

1. OBJETO

La presente norma tiene por objeto definir la terminología, los elementos constitutivos y las condiciones que deben cumplir los contadores eléctricos de inducción.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

La presente norma se aplica únicamente a los ensayos de tipo de los contadores de inducción, de nueva fabricación destinados a la medida de la energía en corriente alterna, de frecuencias comprendidas entre 40 y 60 Hz.

Se aplica a los contadores de energía eléctrica activa y reactiva, de tarifas sencillas y múltiples.

No se aplica a los contadores especiales (maxímetros, de exceso, de punta, de previo pago, etc.).

3. DEFINICIONES

3.1 Contador de inducción

Aparato en el cual los flujos magnéticos alternos producidos por los

corrientes que circulan por bobinas fijas, actúan sobre piezas conductoras móviles, generalmente discos, recorridas por corrientes inducidas por estos flujos.

3.1.1 Contador de energía activa

Aparato integrador que mide la energía activa en vatios-hora (Wh), o en múltiplos de esta unidad.

3.1.2 Contador de energía reactiva

Aparato integrador que mide la energía reactiva en var-hora (varh), o en múltiplos de esta unidad.

3.2 Contador de tarifas múltiples

Contador provisto de varios indicadores, puesto cada uno de ellos en servicio durante intervalos programados de tiempo, a los cuales pueden corresponder tarifas diferentes.

3.3 Equipo móvil de un contador

Parte móvil de un contador sobre la cual las bobinas fijas inducen corrientes.

3.4 Equipo motor de un contador

Parte activa del contador, que produce un par motor por su acción sobre el equipo móvil. Se compone generalmente de electroimanes con sus dispositivos de regulación.

3.5 Equipo de freno de un contador

Parte del contador cuya finalidad es producir un par de freno por su acción sobre el equipo móvil. Se compone de uno o varios imanes y de sus dispositivos de regulación.

3.6 Integrador de un contador

Elemento del contador que permite conocer la energía, o más generalmente, el valor de la cantidad medida por el contador.

3.7 Envoltorio de un contador

Conjunto formado por el zócalo y la tapa.

3.8 Zócalo de un contador

Parte posterior de la envoltorio sobre la cual se montan generalmente el armazón, la caja de bornes y la tapa.

3.9 Tapa de un contador

Parte anterior de la envoltorio, constituida parcial o totalmente por un material transparente, que permite la observación del movimiento del disco y las lecturas del integrador.

3.10 Armazón de un contador

Parte sobre la que se montan generalmente el equipo motor, el equipo móvil, el integrador, el equipo de freno y, a veces, los dispositivos de regulación.

3.11 Caja de bornes de un contador

Piezas de material aislante que agrupan todos, o parte, de los bornes de un contador.

3.12 Tapa de bornes de un contador

Tapa auxiliar que cubre los bornes.

3.13 Cubrehilos de un contador

Tapa auxiliar que cubre los bornes, los finales de los conductores de la instalación conectados a los mismos y, en algunos casos, los extremos de los tubos o de las protecciones de los conductores.

3.14 Circuito de intensidad

Parte del contador recorrida por la corriente del circuito al que está conectado, o por una corriente proporcional procedente de un transformador de intensidad.

3.15 Circuito de tensión

Parte del contador alimentada por la tensión del circuito al que está conectado, o por una tensión proporcional procedente de un reductor o de un transformador de tensión.

3.16 Circuitos auxiliares

Circuitos montados en el interior de la envoltorio de un contador y conectados a un dispositivo accesorio, por ejemplo: un contador de tiempo, un reloj, un relé.

3.17 Intensidad nominal (In)

Valor de la intensidad indicada en el contador y para la cual está construido. Sirve de base en la presente norma.

3.18 Intensidad máxima de precisión

Valor de la intensidad hasta la cual el contador debe cumplir con las condiciones de precisión indicadas en la presente norma.

3.19 Intensidad límite

Valor de la intensidad que puede soportar térmicamente un contador sin deteriorarse. Esta intensidad será superior a la intensidad máxima de precisión.

3.20 Intensidad de arranque

Fracción de la intensidad nominal, expresada en porcentaje, para la cual el contador arranca y sigue girando bajo la tensión y frecuencia nominales, con $\cos \phi = 1$ para contadores de activa y $\sin \phi = 1$ para contadores de reactiva.

3.21 Tensión nominal

Valor de la tensión indicada en el contador y para la cual está construido. Sirve de base en la presente norma, cuando se trata de un contador de una sola tensión.

Si el contador lleva marcado un campo de tensiones cuya relación entre el límite superior y el límite inferior no sobrepasa de 1,3, se toma la media aritmética de dichos límites como tensión nominal para todos los ensayos, excepto para aquellos a que se refieren los apartados 8.2.1 y 8.2.5,

Si el contador lleva la indicación de dos tensiones y la relación entre la mayor y la menor es superior a 1,3, estas dos tensiones se consideran como tensiones nominales y todos los ensayos se efectúan para las dos tensiones.

3.22 Frecuencia nominal

Valor de la frecuencia indicada en el contador y para la cual está construido. Sirve de base en la presente norma.

3.23 Velocidad de rotación nominal

Número de vueltas por minuto del equipo móvil, para la tensión, intensidad y frecuencias nominales, con $\cos \phi = 1$ para contadores de activa y $\sin \phi = 1$ para contadores de reactiva.

3.24 Par motor nominal

Par motor, expresado en $\text{cm} \cdot \text{g}$, ejercido sobre el equipo móvil en reposo, para la tensión, intensidad y frecuencia nominales, con $\cos \phi = 1$ para contadores de activa y $\sin \phi = 1$ para contadores de reactiva.

3.25 Constante de un contador

Relación entre la energía medida por un contador y el correspondiente desplazamiento angular del equipo móvil. Se expresa generalmente para los contadores de activa en Wh por revoluciones o en revoluciones por kWh, y para los contadores de reactiva en varh por revoluciones o en revoluciones por kvarh.

3.26 Temperatura de referencia de un contador

Temperatura del medio ambiente, que sirve de base en la presente norma.

3.27 Ensayos de tipo

Ensayos de calificación que se efectúan sobre cualquier aparato de una fabricación de un determinado tipo. A estos ensayos se refiere la presente norma.

3.28 Ensayos individuales

Ensayos que se efectúan en todos los aparatos de una serie.

3.29 Ensayos por muestreo

Ensayos efectuados en una parte del total de una serie.

3.30 Errores

3.30.1 Error absoluto

Diferencia algebraica entre el valor medido de la energía y su valor verdadero.

3.30.2 Error relativo

Cociente entre el error absoluto y el valor verdadero de la energía.

3.30.3 Error en tanto por ciento

Cien veces el error relativo.

3.31 Factor de distorsión

Factor de distorsión de una magnitud alterna no senoidal, es la relación entre el valor eficaz del residuo obtenido al restar de la misma su onda fundamental y el valor eficaz de la magnitud no senoidal. Se indicará en tanto por ciento.

3.32 Coeficiente medio de temperatura

Relación entre la variación relativa de una medida y la variación de temperatura ambiente que la produjo.

3.33 Sistema

Es el principio técnico en que está basado el funcionamiento del aparato. Por ejemplo: Sistema de inducción, electrodinámico, u otros.

3.34 Tipo

La forma particular de construcción de un contador, basado en el mismo sistema, define el tipo. El tipo se designa por un grupo de letras y cifras, según el constructor. Son del mismo tipo y llevan la misma designación, los contadores que al tener que registrar la energía de una red de tensiones e intensidades distintas a las del prototipo, no difieren de él más que en las características de las bobinas de tensión o intensidad y en las del dispositivo integrador.

- a) Los contadores con un equipo motor, un circuito de intensidad y un circuito de tensión, quedan determinados por un prototipo 5 A, 220 V, 50 Hz.
- b) Los contadores con dos equipos motores, dos circuitos de intensidad y dos circuitos de tensión, quedan determinados por un prototipo 5 A, 3 × 380 V, 50 Hz.
- c) Los contadores con tres equipos motores, tres circuitos de intensidad y tres circuitos de tensión, quedan determinados por un prototipo 5 A, 3 × 220/380 V, 50 Hz.

3.35 Modelo

Modelo es la diferente presentación y dimensionado de un mismo tipo de contador (empotrado, saliente, redondo, rectangular, etc.).

4. CLASE DE PRECISIÓN

Los contadores se clasifican según los límites admitidos del error, expresado en tanto por ciento, para la tensión, intensidad y frecuencia nominales, con $\cos \phi = 1$ para contadores de activa y $\sin \phi = 1$ para contadores de reactiva.

5. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

5.1 Generalidades

Los materiales aislantes empleados en los contadores deberán ser prácticamente no higroscópicos.

Todas las partes expuestas a la corrosión en las condiciones usuales de empleo, se protegerán de una manera eficaz contra las influencias atmosféricas.

Las capas de protección no sufrirán desgaste apreciable en las manipulaciones habituales, ni se deteriorarán en las condiciones usuales de empleo.

5.2 Envoltorio

La envoltura del contador será robusta, y su construcción permitirá que quede precintada de modo que no se pueda perturbar la marcha o las indicaciones del contador mediante la introducción de un cuerpo extraño sin alterar los precintos. Además, será prácticamente estanca al polvo.

Si la envoltura es metálica, estará provista, en contadores para tensiones superiores a 250 V con respecto a tierra, de un dispositivo que permita la conexión de un conductor de protección, de medidas apropiadas, fácilmente identificable.

5.3 Ventanas

Si la tapa del contador no es transparente, deberá estar provista de una o varias ventanas para la lectura del investigador y para la observación del movimiento del equipo móvil. Estas ventanas estarán protegidas por placas de material transparente adecuado, perfectamente sujetas e imposibles de retirar sin desprecintar la tapa.

5.4 Bornes. Caja de bornes

Los bornes se podrán agrupar sobre una pieza aislante de resistencia mecánica suficiente y permitirán la conexión de conductores rígidos o de cables.

Los bornes de tensión deberán ser fácilmente desconectables de los bornes de intensidad, sin quitar la tapa del contador.

La conexión de los conductores a los bornes se efectuará de manera que asegure un contacto eficaz y duradero. Los agujeros del material aislante, que están en la prolongación de los orificios de los bornes, deberán tener las medidas suficientes para permitir la introducción fácil de los conductores con su aislamiento.

5.5 Tapa de bornes y cubrehiros

Los bornes del contador se cubrirán con una tapa, o con un cubrehiros, que sea posible precintar independientemente de la envoltura del contador. La tapa deberá cubrir la parte correspondiente a los bornes y a los tornillos de fijación, y el cubrehiros, además, una longitud suficiente de los conductores de conexión, de su recubrimiento aislante.

y de los extremos de los tubos o de las protecciones de los conductores. En cualquier caso, cuando el contador esté instalado, sus bornes no serán accesibles sin romper los precintos.

5.6 Integrador

Generalmente, se empleará el sistema indicador de rodillos, o bien el de esferas.

La unidad usual de medida del elemento indicador es el kWh para contadores de activa y el kvarh para contadores de reactiva.

La unidad de medida se indicará cerca del conjunto de los rodillos o de las esferas de los integradores.

En la placa del integrador deberán diferenciarse claramente los guiones que representan la parte decimal, cuando exista, de los que corresponden a la parte entera.

El rodillo que gira con mayor velocidad deberá estar graduado en divisiones centésimales y su encuadre tendrá, centrada en su parte derecha, una pequeña señal horizontal para facilitar la lectura.

El integrador podrá construirse de forma que registre positivamente, con independencia del sentido de giro del equipo móvil. A este integrador se le denomina de marcha progresiva.

El integrador deberá poder totalizar, partiendo de cero y sin volver de nuevo a él, durante un mínimo de 1 500 h, la energía correspondiente a la intensidad máxima de precisión, bajo la tensión nominal y con $\cos \phi = 1$ para contadores de activa y $\sin \phi = 1$ para contadores de reactiva.

Las indicaciones colocadas sobre el integrador y su placa deberán ser indelebles y fácilmente legibles.

5.7 Sentido de rotación del equipo móvil

El sentido de rotación del equipo móvil será de izquierda a derecha para un observador colocado delante del contador y mirando a éste. Deberá indicarse por una flecha claramente visible. El disco llevará una señal de referencia, que deberá marcarse en la periferia y en su parte superior. Dicha señal será claramente visible, de forma que permita contar el número de revoluciones. El disco podrá llevar también las señales necesarias para efectuar el ajuste estroboscópico y otros. Todas estas señales deberán marcarse de manera que no perturben el empleo de la señal utilizada para el ajuste fotoeléctrico.

5.8 Dispositivo evita-retroceso

Dispositivo mecánico que impide el giro del equipo móvil en sentido contrario al normal, definido en el apartado 5.7.

5.9 Circuitos magnéticos

Los circuitos magnéticos de intensidad y de tensión no deberán servir para reforzar mecánicamente el armazón.

6. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

6.1 Intensidades nominales

Las intensidades nominales son las indicadas en la tabla siguiente.

Tipo de contador	Intensidad nominal A	
Monofásico	(5) - 10 - (15) - 20 - (30)	1-2,5-5
Polifásico	(5) - 10 - (15) - 20 - (30) - 50 (75) - (100)	Para conectar a transformadores de medida

Se evitarán, en lo posible, las medidas entre paréntesis.

6.2 Tensiones nominales

Las tensiones nominales, expresadas en voltios, serán:
63,5-110-127-220-380

6.3 Consumo propio de los circuitos

El consumo propio de cada uno de los circuitos de tensión e intensidad del contador a la tensión, intensidad y frecuencia nominales, no debe sobrepasar los valores indicados a continuación.

a) Circuito de tensión:

Contador de activa	Clase 2		Clase 1	
	W	VA	W	VA
Hasta 2 In	1	4	3	12
Superior a 2 In	2	8	—	—

Contador de reactiva: 5 W y 10 VA.

b) Circuito de intensidad: 2,5 VA para contadores de intensidades nominales inferiores a 50 A, 4 VA para contadores de intensidades no-

minales iguales o superiores a 50 A, tanto para contadores de activa como de reactiva, cualquiera que sea su clase de precisión.

6.4 Rigidez dieléctrica

Los contadores y sus accesorios, con excepción de los transformadores de medida, considerados en la norma UNE 21 088, se construirán de forma que no pierdan ninguna de sus cualidades dieléctricas con las diferentes tensiones a las cuales se han de someter sus circuitos en servicio normal y en ensayo. A un contador o a un accesorio se le reconoce como susceptible de satisfacer a la condición precitada, si cumple con éxito el ensayo dieléctrico indicado a continuación.

Por otra parte, los aislantes empleados deben ser tales, que no pierdan sus cualidades dieléctricas bajo la influencia de la humedad ambiente. El ensayo dieléctrico se efectuará sobre los contadores montados y no solamente sobre las partes sueltas. Dicho ensayo se realizará una sola vez sobre el mismo contador.

Exceptuando los circuitos de los dispositivos que funcionan a una tensión inferior a 70 V, el aislamiento entre todos los circuitos del contador, incluidas las partes metálicas en contacto con ellos, y el armazón, soportará la aplicación de una tensión alterna de 2 000 V, de valor eficaz. Durante este ensayo, se conectarán al armazón del contador los circuitos de los dispositivos auxiliares que funcionan a una tensión inferior a 70 V.

Durante el ensayo indicado anteriormente, todas las partes aparentemente metálicas se conectarán al armazón del contador. Si éste posee una envolvente de material aislante, se colocará durante el ensayo sobre una superficie metálica plana conectada al armazón, admitiéndose la realización del ensayo con el contador destapado.

El aislamiento entre dos circuitos de intensidad, bobinados sobre un mismo circuito magnético y conectados a fases diferentes cuando el contador está en funcionamiento, soportará una tensión alterna de 2 000 V de valor eficaz.

Exceptuando los circuitos auxiliares que funcionan a una tensión inferior a 70 V, el aislamiento entre cada circuito del contador, incluidas las partes metálicas en contacto con ese circuito, y todos los circuitos separables de él, soportará una tensión alterna igual a dos veces la tensión nominal, con un mínimo de 600 V. Durante este ensayo, se conectarán al armazón del contador los circuitos de los dispositivos auxiliares que funcionan a una tensión inferior a 70 V.

El aislamiento entre los circuitos auxiliares, que funcionan a una tensión inferior a 70 V, y masa, soportará una tensión alterna de 250 V, valor eficaz.

En todos los ensayos, la tensión de prueba, aplicada durante 60 s, será prácticamente senoidal y de frecuencia comprendida entre 40 y 60 Hz.

La potencia nominal de la fuente alimentadora no será inferior a 500 VA.

6.5 Calentamiento

Se someterá el contador, durante 2 h como mínimo, a la intensidad máxima de precisión y a unas tensiones iguales a 1,2 veces la nominal. En estas condiciones y con una temperatura ambiente máxima de 40°C, el régimen alcanzado será tal que no se sobrepasará un incremento de temperatura en los bobinados de intensidad de 50°C en los contadores de activa de clase 2 y en los de reactiva, y de 40°C en los de activa de clase 1. Caso de que los bobinados sean de cobre esmaltado, el incremento no sobrepasará de 60°C y 50°C, respectivamente.

Los elementos del contador deberán resistir estas temperaturas sin sufrir deformación o alteración alguna que perjudique su funcionamiento normal.

7. PLACA DE CARACTERÍSTICAS

El contador estará provisto de una placa de características situada bien en su interior o bien en su parte externa. En este último caso, no será posible efectuar su sustitución sin levantar la tapa. En dicha placa se marcarán, de forma indeleble y fácilmente visibles desde el exterior, las indicaciones siguientes:

- El nombre, o la marca de la casa constructora, la indicación de si es de activa o de reactiva y el grupo de letras y cifras que permitan distinguir el tipo.
- La clase de precisión se designará por las siglas Cl seguidas de un guion y del número correspondiente a la clase.
- El número de orden de fabricación. Si la placa está en el exterior, el número de orden se deberá marcar también en el armazón del contador.
- El número de fases y el número de conductores del circuito al que puede conectarse el contador. Por ejemplo: monofásico 2 hilos, trifásico 4 hilos.
- La tensión, o tensiones, de la red a la que está destinado el contador.

Ejemplos:

En un contador para circuito monofásico, 2 hilos, 220 V, se marcará

220 V

En un contador para circuito doble monofásico, 3 hilos, 380 V entre conductores de fase, se marcará

2 × 220/380 V

En un contador para circuito trifásico, 3 hilos, 380 V entre conductores de fase, montado según el método de los dos vatímetros, se marcará

$3 \times 380\text{ V}$

En un contador para circuito trifásico, 4 hilos, 220/380 V, montado según el método de los tres vatímetros, se marcará

$3 \times 220/380\text{ V}$

En un contador para circuito monofásico, 2 hilos, conectable indistintamente a tensiones de 127 y 220 V, se marcará

127 y 220 V

f) La intensidad nominal, seguida de la máxima de precisión entre paréntesis cuando ésta sea diferente al 200 % de la nominal, considerada como mínima.

g) La constante del contador, expresada en Wh por revoluciones o en revoluciones por kWh, en caso de contadores de activa y en varh por revoluciones o en revoluciones por kvarh, en caso de contadores de reactiva.

h) La frecuencia nominal en hercios.

i) Si el contador va provisto de dispositivo evita-retroceso, se indicará mediante el símbolo

j) Si el contador va provisto de integrador de marcha progresiva, se indicará mediante el símbolo

k) Si el contador es de tarifas múltiples, se diferenciará cada indicador mediante números romanos correlativos situados a su lado. Asimismo, se señalizará el indicador que esté en servicio.

l) Si el contador está destinado a conectarse a transformadores de medida cuya relación se tiene en cuenta en las constantes, se indicará la relación de transformación de dichos transformadores.

m) En los contadores de reactiva, cuya marcha correcta depende del orden de sucesión de fases, se indicará esta circunstancia convenientemente.

Las indicaciones de las placas deben expresarse en español, admitiéndose los símbolos y abreviaturas normalizados.

En la placa se reservará un lugar para consignar la fecha del *Boletín Oficial del Estado* en que se publique la aprobación del tipo de contador.

8. PRECISIÓN DE LOS CONTADORES

8.1 Error en tanto por ciento

El error en tanto por ciento del contador, se expresa por la fórmula:

$$\text{Error en \%} = \frac{\text{Energía medida por el contador} - \text{Energía verdadera}}{\text{Energía verdadera}} \times 100.$$

8.2 Ensayos de tipo

8.2.1 Límites de los errores

Los límites de los errores de los contadores monofásicos y polifásicos con cargas equilibradas, se indican en la Tabla I. Los límites de los errores de los contadores polifásicos cargados en una sola fase, se indican en la Tabla II.

Los límites de los errores se cumplirán en las condiciones siguientes:

- a) En la posición y en las condiciones normales de funcionamiento. (Contador cerrado y eje del equipo móvil vertical.)
- b) A la temperatura de referencia $\pm 2^\circ\text{ C}$, o en ausencia de indicaciones en este sentido para $20^\circ \pm 2^\circ\text{ C}$. Si los ensayos no pueden efectuarse a la temperatura de referencia, se realizarán a la temperatura más cercana posible y se corregirán los resultados una vez determinado el coeficiente medio de temperatura propio del contador.
- c) A la tensión nominal o a las tensiones nominales $\pm 1\%$.
- d) Si el contador lleva marcado un campo de tensiones (véase apartado 3.21), los límites de los errores se aplicarán a todas las tensiones del campo.
- e) Si el contador lleva la indicación de dos tensiones, cuya relación sea superior a 1,3, los límites de los errores se aplicarán a las dos tensiones.
- f) A la frecuencia nominal $\pm 0,5\%$ para los contadores de activa de clase 2 y de reactiva, y $\pm 0,3\%$ para los de activa de clase 1.
- g) Con intensidades y tensiones de forma prácticamente senoidal, entendiéndose por tal cuando su factor de distorsión no exceda del 5 %.
- h) Despues de aplicar las tensiones nominales durante 1 h y de haber hecho pasar las intensidades nominales durante un tiempo suficiente para alcanzar la estabilidad de la temperatura.
- i) Con el contador libre de la influencia sensible de cualquier campo magnético exterior, exceptuando el terrestre.
- j) Para los contadores polifásicos, con el orden de fases indicado en el esquema de conexión.
- k) En el caso de integradores de rodillos, si se quieren comparar varias mediciones, solamente debe estar girando el de mayor velocidad.

Tabla I

Límites de los errores, en tanto por ciento, de los contadores monofásicos y polifásicos con cargas equilibradas (Intensidades equilibradas y tensiones simétricas)

Valor de la intensidad en porcentaje de la nominal	Activa			Reactiva	
	cos φ	clase 2	clase 1	sen φ (inductivo o capacitivo)	
Desde el 10% hasta la intensidad máxima de precisión 5 %	1 1	± 2,0 ± 2,5	± 1,0 ± 1,5	— —	— —
Desde el 20% hasta la intensidad máxima de precisión 10 %	0,5 inductivo 0,8 capacitivo 0,5 inductivo 0,8 capacitivo	± 2,0 — ± 2,5 —	± 1,0 ± 1,0 ± 1,5 ± 1,5	0,5 1 1 1	± 3,0 ± 3,0 ± 3,0 ± 4,0

Tabla II

Límites de los errores, en tanto por ciento, de los contadores polifásicos cargados en una sola fase y excluidos todos los circuitos de tensión por un sistema de tensiones polifásicas simétricas

Valor de la intensidad en porcentaje de la nominal	Activa			Reactiva	
	cos φ	clase 2	clase 1	sen φ (inductivo o capacitivo)	
Desde el 20% hasta el 100% 100 %	1,0 0,5 inductivo	± 3,0 ± 3,0	± 2,0 ± 2,0	1 0,5	± 4 ± 4

La intensidad se hará pasar sucesivamente por cada una de las fases.

8.2.2 Corrección de la regulación

Si durante el ensayo de un contador, ciertos puntos caen fuera de los límites indicados en las tablas y es posible hacerlos entrar desplazan-

do paralelamente el eje de las abscisas una cantidad no superior al 0,5 %, igual en valor y signo para todas las curvas, se considerará que el contador es aceptable.

8.2.3 Coeficiente medio de temperatura

El coeficiente medio de temperatura de un contador de activa no debe exceder del 0,1 % por grado centígrado de variación de la temperatura ambiente para contadores de clase 2 y del 0,05 % por grado centígrado para contadores de clase 1 a la tensión y frecuencia nominales y una intensidad cualquiera comprendida entre el 10 % de la nominal y la máxima de precisión con $\cos \phi = 1$; o del 0,15 % por grado centígrado para contadores de clase 2 y del 0,07 % por grado centígrado para contadores de clase 1, a una intensidad cualquiera comprendida entre el 20 % de la intensidad nominal y la máxima de precisión con $\cos \phi = 0,5$ inductivo.

El coeficiente medio de temperatura de un contador de reactiva no debe exceder del 0,15 % por grado centígrado a la tensión y frecuencia nominales y una intensidad cualquiera comprendida entre el 10 % de la nominal y la máxima de precisión con $\operatorname{sen} \phi = 1$; o del 0,25 % por grado centígrado a una intensidad cualquiera comprendida entre el 20 % de la intensidad nominal y la máxima de precisión con $\operatorname{sen} \phi = 0,5$ inductivo.

Si se desea determinar dicho coeficiente para una cierta temperatura ambiente, los ensayos se efectuarán en una zona comprendida entre una temperatura 10° C aproximadamente inferior y 10° C aproximadamente superior a ésta, pero quedando entre los límites de 0° a 40° C de temperatura ambiente.

8.2.4 Influencia de la posición del contador

Con el contador inclinado 3° en cualquier dirección respecto a su posición normal y ensayado a la tensión y frecuencia nominales, a la intensidad máxima de precisión y con $\cos \phi = 1$, para los contadores de clase 2 el error no debe diferir en más del 1 % del obtenido en su posición normal en las mismas condiciones. Con el 5 % de la intensidad nominal el error no debe diferir en más del 3 % del obtenido en su posición normal.

Para los contadores de clase 1, estos errores no deben diferir en más del 0,5 %, ni en más del 2 %, respectivamente.

Para los contadores de reactiva con $\operatorname{sen} \phi = 1$, estos errores no deben diferir en más del 1 %, ni en más del 3 %, respectivamente.

8.2.5 Influencia de la tensión

a) Si el contador lleva la indicación de una sola tensión nominal, una

variación de $\pm 10\%$ con respecto a esta tensión, a la frecuencia nominal, no deberá producir una variación porcentual del error superior a los valores indicados en la Tabla III.

Tabla III

Valor de la intensidad en porcentaje de la nominal	Activa			Reactiva	
	cos φ	clase 2	clase 1	sen φ (inductivo o capacativo)	
10 %	1	1,5	1,0	1	2,0
Desde el 100 % hasta la intensidad máxima de precisión	1	1,0	—	1	1,5
Desde el 50 % hasta la intensidad máxima de precisión	1 0,5 inductivo	—	1,0 1,0	—	—

Estos valores son aplicables tanto a contadores monofásicos como a polifásicos con tensiones simétricas.

b) Si el contador lleva marcado un campo de tensiones cuya relación entre el límite superior y el límite inferior no sobrepasa de 1,3, deberá satisfacer las condiciones indicadas en la Tabla III para cada una de las tensiones extremas.

Los ensayos se realizarán a una tensión inferior en un 10 % a la tensión extrema más baja y a una tensión superior en un 10 % a la tensión extrema más elevada.

c) Si el contador lleva la indicación de dos tensiones y la relación entre la mayor y la menor es superior a 1,3, deberá satisfacer las condiciones indicadas en la Tabla III para cada una de estas tensiones, consideradas como nominales.

8.2.6 Influencia de la frecuencia

Una variación de $\pm 5\%$ de la frecuencia con respecto a la nominal, no deberá producir una variación porcentual del error superior a los valores indicados en la Tabla IV.

Tabla IV

Valor de la intensidad en porcentaje de la nominal	Activa			Reactiva	
	cos φ	clase 2	clase 1	sen φ (inductivo o capacativo)	
10 % y 100 % 100 %	1 0,5 inductivo	1,5 1,5	1,0 1,0	1,0 0,5	2,5 2,5

Estos valores son aplicables tanto a contadores monofásicos como a polifásicos con tensiones simétricas.

8.2.7 Influencia de los campos magnéticos exteriores

La variación del error en tanto por ciento de un contador bajo la influencia de una inducción magnética de 0,5 mT (5 Gauss) producida por una corriente de la misma frecuencia que la tensión aplicada al contador y en las condiciones más desfavorables de fase y de dirección, a la intensidad y tensión nominales, no debe exceder de los valores indicados en la Tabla V. Esta inducción se obtiene en el centro de una bobina circular de 1 m de diámetro medio, de sección cuadrada, de espesor radial pequeño en comparación con el diámetro y con 400 amperios vuelta.

Tabla V

	Activa		Reactiva
	Clase 2	Clase 1	
cos $\varphi = 1$ sen $\varphi = 1$	3,0 —	2,0 —	3,0

8.2.8 Efecto de sobreintensidades de corta duración

El contador podrá soportar durante 0,5 s una intensidad igual a: 30 veces la nominal cuando ésta no excede de 10 A.

20 veces la nominal cuando ésta sea superior a 10 A.

10 veces la nominal para contadores a conectar a transformadores de intensidad.

El circuito en el que se coloque el contador será prácticamente no inductivo, teniendo aplicada en los bornes su tensión nominal a su frecuencia nominal.

Manteniendo esta tensión, se dejará en reposo un tiempo suficiente (aproximadamente 1 h) para que pueda alcanzar la temperatura de régimen. Se hará seguidamente un ensayo a la tensión, intensidad y frecuencia nominales con $\cos \varphi = 1$. La variación del error en tanto por ciento no debe exceder de 1,5 para contadores de activa de clase 2 o bien de 1,0 para contadores de activa de clase 1.

Para contadores de reactiva en las mismas condiciones y con $\sin \varphi = 1$, la variación del error en tanto por ciento no debe exceder de 1,5.

8.2.9 Influencia del orden de sucesión de fases en los contadores polifásicos de activa

Conectados los contadores polifásicos a tensiones e intensidades cuyo orden de sucesión de fases sea el inverso del indicado en el esquema de conexión y con cargas equilibradas, los errores que se obtengan no diferirán en más del 1,5 % de los indicados en la Tabla I, para cualquier intensidad comprendida entre el 50 % de la nominal y la máxima de precisión.

8.2.10 Marcha en vacío

Con el circuito de intensidad desconectado y a la frecuencia nominal, el equipo móvil no deberá girar para ningún valor de la tensión comprendido entre el 80 % de la más baja y el 115 % de la más elevada marcadas en la placa de características del contador. En el caso de integradores de rodillos, el ensayo se realizará con uno solo de ellos en movimiento. El equipo móvil puede desplazarse ligeramente sin llegar a dar una vuelta completa.

8.2.11 Arranque

Un contador de activa de clase 2, recorrido por una intensidad igual al 0,5 % de la nominal, a la tensión y frecuencia nominales con $\cos \varphi = 1$, deberá arrancar y girar de manera continua.

Un contador de activa de clase 1, en las mismas condiciones, lo hará con una intensidad igual al 0,4 % de la nominal.

Un contador de reactiva, en las mismas condiciones de tensión y frecuencia con $\sin \varphi = 1$, lo hará con una intensidad igual al 1 % de la nominal.

Se comprobará que el equipo móvil efectúa como mínimo una vuelta completa.

En el caso de integradores de rodillos, el ensayo se realizará con uno o dos de ellos en movimiento.

En el caso de contadores polifásicos, las tensiones aplicadas serán simétricas.

Durante el ensayo, el contador estará exento de vibraciones externas.

8.2.12 Márgenes de regulación

Todos los dispositivos de regulación del contador serán bien accesibles y se deberán poder graduar en los contadores nuevos y ya regulados, de modo que permitan como mínimo a la tensión y frecuencia nominales los márgenes de regulación indicados en la Tabla VI.

Tabla VI

Valor de la intensidad en porcentaje de la nominal	Activa		Reactiva			Margen de regulación en porcentaje	
	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	Imán	Pequeña carga	Desfase		
100 %	1 0,5 inductivo	1 0,5 inductivo o capacitivo	—	± 7,0	—	—	± 1,0
5 %	1	1	—	—	± 4,0	—	—

9. ESQUEMA DE CONEXIÓN

Cada contador deberá estar provisto de un esquema que indique su forma correcta de conexión, con el orden de fases, y sus circuitos interiores.

Las marcas de la caja de bornes del contador deberán reproducirse en el esquema.

10. NORMAS PARA CONSULTA

Para transformadores de medida, véase la norma UNE 21 088. Transformadores de medida y protección.

11. CORRESPONDENCIA

La presente norma concuerda esencialmente con las publicaciones de la CEI 43 (1960), 145 (1963) y 170 (1964).

$$\text{Error en \%} = \frac{\text{Energía medida por el contador} - \text{Energía verdadera}}{\text{Energía verdadera}} \times 100.$$

4.2 Límites de los errores

Los límites de los errores de los contadores monofásicos y polifásicos con cargas equilibradas se indican en las Tablas I y II.

Tabla I

Límites de errores, en tanto por ciento, de los contadores monofásicos y polifásicos con cargas equilibradas de clase 0,5 (intensidades equilibradas y tensiones simétricas)

Valor de la intensidad, en porcentaje de la nominal	$\cos \varphi$	Límites de los errores %
Desde el 10 % hasta la intensidad máxima de precisión 5 %	1 1	$\pm 0,5$ $\pm 1,0$
Desde el 20 % hasta la intensidad máxima de precisión 10 %	0,5 inductivo 0,8 capacitivo 0,5 inductivo 0,8 capacitivo	$\pm 0,8$ $\pm 1,3$

El valor de cada una de las tensiones simples o compuestas no deberá diferir en más del 1 % de la media de las tensiones correspondientes. El valor de cada una de las intensidades no deberá diferir en más del 1 % de la media de las intensidades correspondientes. Los ángulos formados por cada una de las intensidades con la tensión simple correspondiente no deberán diferir en más de 2º.

Tabla II

Límites de los errores, en tanto por ciento, de los contadores polifásicos de clase 0,5 cargados en una sola fase y excitados todos los circuitos de tensión por un sistema de tensiones polifásicas simétricas

Valor de la intensidad, en porcentaje de la intensidad nominal	$\cos \varphi$	Límites de los errores %
Desde el 20 % al 100 % 50 % y 100 %	1 0,5 inductivo	$\pm 1,5$ $\pm 1,5$

UNE 21 310 h2

Contadores de energía eléctrica de corriente alterna

Activa clase 0,5

1. OBJETO

La presente norma tiene por objeto definir la terminología, los elementos constitutivos y las condiciones que deben cumplir los contadores eléctricos de inducción de energía activa y clase 0,5.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

La presente norma se aplica únicamente a los ensayos de tipo de los contadores de inducción de nueva fabricación y de clase 0,5, empleados principalmente para la medición de cantidades importantes de energía eléctrica en corriente alterna de frecuencia comprendida entre 40 y 60 Hz.

Se aplica a los contadores de energía eléctrica activa de tarifas sencillas y múltiples.

No se aplica a los contadores patrones ni a los especiales (maxímetros de exceso, de punta, de previo pago, o similares).

3. DEFINICIONES

Véanse las definiciones correspondientes en la norma UNE 21 310 h1.

4. DATOS TECNOLÓGICOS, CLASIFICACIÓN

4.1 Error en tanto por ciento

El error, en tanto por ciento, del contador se expresará por la fórmula:

El valor de cada una de las tensiones simples o compuestas no deberá diferir en más del 1 % de la media de las tensiones correspondientes.

4.3 Clase de precisión

Los contadores se clasificarán según los límites admitidos del error, expresados en tanto por ciento, para la tensión, intensidad y frecuencia nominales con $\cos \phi = 1$.

4.4 Características mecánicas

Véanse las características mecánicas correspondientes en la norma UNE 21 310 h1.

4.5 Características eléctricas

4.5.1 Intensidades nominales

Las intensidades nominales, expresadas en amperios, serán:
1 — 2,5 — 5

4.5.2 Tensiones nominales

Las tensiones nominales, expresadas en voltios, serán:
63,5 — 110 — 127 — 220 — 380

4.5.3 Consumo propio de los circuitos

4.5.3.1 Circuito de tensión

La potencia consumida por cada circuito de tensión, a la tensión y frecuencia nominales, no deberá sobrepasar de 3 W y 12 VA.

4.5.3.2 Circuito de intensidad

La potencia aparente consumida por cada circuito de intensidad de los contadores, no deberá ser mayor de 6 VA con la intensidad nominal.

4.6 Rígidez dieléctrica

Véase lo indicado en la norma UNE 21 310 h1.

4.7 Calentamiento

Véase lo indicado en la norma UNE 21 310 h1.

4.8 Placa de características

Véase lo indicado en la norma UNE 21 310 h1.

La intensidad máxima de precisión deberá consignarse entre paréntesis detrás de la intensidad nominal, siendo admisible que su valor sea inferior al 200 % de la nominal.

4.9 Esquema de conexión

Cada contador deberá estar provisto de un esquema que indique su forma correcta de conexión, con el orden de fases y sus circuitos interiores.

Las marcas de la caja de bornes del contador deberán reproducirse en el esquema.

5. MÉTODOS DE ENSAYO

Los contadores deben someterse a ensayos a la tensión de choque y ensayos de tipo, estos últimos al objeto de verificar la precisión del contador.

6. PROCEDIMIENTO OPERATORIO

6.1 Ensayo a la tensión de choque

Para la realización de este ensayo se conectan entre sí, por una parte, todos los circuitos de intensidad y de tensión, y por otra, el armazón del contador o la superficie metálica plana conectada al armazón, si el contador posee una envolvente de material aislante. En estas condiciones, el contador debe resistir diez pruebas, con la onda de choque 1,2/50 de la misma polaridad y de un valor de cresta de 6 kV (véase la norma UNE 21 308).

6.2 Ensayos de tipo

Los límites de error indicados en el apartado 4.2, deben cumplirse en las condiciones siguientes:

En la posición y en las condiciones normales de funcionamiento (contador cerrado y eje del equipo móvil vertical).

A la temperatura de referencia $\pm 1^\circ\text{C}$, o en ausencia de indicaciones en ese sentido, para $20^\circ \pm 1^\circ\text{C}$. Si los ensayos no pueden efectuarse a la temperatura de referencia, se deben realizar a la temperatura más cercana posible y se corrijen los resultados una vez determinado el coeficiente medio de temperatura propio del contador.

A la tensión nominal, $\pm 0,5\%$.

A la frecuencia nominal, $\pm 0,2\%$.

Con tensiones e intensidades de forma prácticamente senoidal, entendiéndose por tal cuando su factor de distorsión no excede del 2 %. Despues de aplicar la tensión nominal, por lo menos durante 2 h, y

de haber hecho pasar la intensidad nominal durante un tiempo suficiente para alcanzar la estabilidad de la temperatura.

Con el contador libre de la influencia sensible de cualquier campo magnético exterior, exceptuando el terrestre.

Para los contadores polifásicos, con el orden de fases indicado en el esquema de conexión.

En el caso de integradores de rodillos, si se quieren comparar varias mediciones, sólo debe estar girando el de mayor velocidad.

La calidad de los aparatos empleados para el ensayo de estos contadores, debe ser tal que el error de medida no exceda del 0,1 %, para un $\cos \varphi = 1$ y del 0,2 % para un $\cos \varphi = 0,5$.

Para realizar los ensayos correspondientes a la Tabla II se debe hacer pasar la intensidad sucesivamente por cada una de las fases.

6.2.1 Corrección de la regulación

Si durante el ensayo de un contador, ciertos puntos caen fuera de los límites indicados en las tablas y es posible hacerlos entrar desplazando paralelamente el eje de las abscisas una cantidad no superior al 0,3 %, igual en valor y signo para todas las curvas, se considera que el contador es aceptable.

6.2.2 Coeficiente medio de temperatura

El coeficiente medio de temperatura de un contador no debe exceder del 0,03 % por grado centígrado de variación de la temperatura ambiente a la tensión y frecuencia nominales y a una intensidad cualquiera comprendida entre el 10 % de la nominal y la máxima de precisión, con un $\cos \varphi = 1$, o del 0,05 % por grado centígrado entre el 20 % de la intensidad nominal y la máxima de precisión, con un $\cos \varphi = 0,5$ inductivo.

Si se desea determinar el coeficiente medio de temperatura para una cierta temperatura ambiente, los ensayos se deben hacer en una zona comprendida entre una temperatura 10°C aproximadamente inferior a la temperatura dada, y una temperatura 10°C superior a ésta, pero quedando entre los límites de 0° a 40°C de temperatura del aire ambiente.

6.2.3 Influencia de la posición del contador

Con el contador inclinado 3° en cualquier dirección respecto a su posición normal, y ensayado con un $\cos \varphi = 1$ y a la tensión e intensidad nominales, el error no debe diferir en más del 0,5 % del error obtenido en su posición normal. Con el 5 % de la intensidad nominal, el error no debe diferir en más del 2 % del error obtenido en su posición normal.

6.2.4 Influencia de la tensión

Una variación de la tensión de $\pm 10\%$ con respecto a la tensión nominal no debe producir una variación del error superior al:

- a) 1 %, con el 10 % de la intensidad nominal y $\cos \varphi = 1$.
- b) 0,8 %, con cualquier intensidad comprendida entre el 50 % de la nominal y la máxima de precisión, con un $\cos \varphi = 1$ o con un $\cos \varphi = 0,5$ inductivo.

Estos valores son aplicables tanto a contadores monofásicos como a polifásicos con tensiones simétricas.

6.2.5 Influencia de la frecuencia

Una variación de $\pm 5\%$ de la frecuencia nominal no debe producir una variación del error superior a los límites indicados en la Tabla III.

Tabla III

Valor de la intensidad, en porcentaje de la nominal	$\cos \varphi$	Variación del error %
10 % y 100 %	1	0,7
100 %	0,5 inductivo	1,0

Estos valores son aplicables tanto a contadores monofásicos como a polifásicos con tensiones simétricas.

6.2.6 Influencia de los campos magnéticos exteriores

La variación del error, en tanto por ciento, de un contador bajo la influencia de una inducción magnética de 0,5 mT (5 Gauss), producida por una corriente de la misma frecuencia que la tensión aplicada al contador y en las condiciones más desfavorables de fase y de dirección, no debe exceder del 2 % a la intensidad nominal y con el $\cos \varphi = 1$. Esta inducción se obtiene en el centro de una bobina circular de 1 m de diámetro medio, de sección cuadrada, de espesor radial pequeño en comparación con el diámetro y con 400 amperios vuelta.

6.2.7 Efecto de sobreintensidades de corta duración

El contador debe poder soportar durante 0,5 s una intensidad igual a 30 veces la nominal.

El circuito en el que se coloque el contador, debe ser prácticamente no inductivo, teniendo aplicada en los bornes su tensión nominal a su frecuencia nominal.

Manteniendo esta tensión, se deja en reposo un tiempo suficiente (aproximadamente 1 h) para que pueda alcanzar la temperatura de régimen. Se hace seguidamente el ensayo a la tensión, intensidad y frecuencia nominales con $\cos \varphi = 1$. La variación del error, en tanto por ciento, no debe exceder del 1,0 %.

6.2.8 Influencia del orden de sucesión de fases en los contadores polifásicos

Conectados los contadores polifásicos a tensiones simétricas e intensidades cuyo orden de sucesión de fases sea el inverso del indicado en el esquema de conexión y con cargas equilibradas, los errores que se obtengan no deben diferir en más del 1 % de los indicados en la Tabla I, para cualquier intensidad comprendida entre el 50 % de la nominal y la máxima de precisión.

6.2.9 Marcha en vacío

Con el circuito de intensidad desconectado y a la frecuencia nominal, el equipo móvil no debe girar para ningún valor de la tensión comprendida entre el 80 % y el 115 % de la nominal. En el caso de integradores de rodillos, el ensayo se debe realizar con uno de ellos en movimiento. El equipo móvil puede desplazarse ligeramente sin llegar a dar una vuelta completa.

6.2.10 Arranque

A la tensión y frecuencia nominales con $\cos \varphi = 1$, un contador de tarifa sencilla sin dispositivo evita-retroceso debe arrancar y continuar en movimiento con una intensidad igual al 0,3 % de la nominal; los demás contadores lo deben hacer con el 0,4 % de la intensidad nominal. Se debe comprobar que el equipo móvil efectúa, como mínimo, una vuelta completa.

En el caso de integradores de rodillos, el ensayo se debe realizar con uno o dos de ellos en movimiento.

6.2.11 Márgenes de regulación

Estando ajustado el contador de acuerdo con la presente norma, aún debe poseer, como mínimo, los márgenes de regulación siguientes:

- a) Imán: 2 % en el sentido de aumento de velocidad del equipo móvil y 3 % en el de reducción, con la intensidad, tensión y frecuencia nominales, y un $\cos \varphi = 1$.
- b) Pequeña carga: ± 4 % de la variación de la velocidad del equipo móvil, con el 5 % de la intensidad nominal, a la tensión y frecuencia nominales, con $\cos \varphi = 1$.

c) Desfase (si el contador está provisto de dispositivo correspondiente): ± 1 % de variación de la velocidad del equipo móvil con la intensidad, tensión y frecuencia nominales y con $\cos \varphi = 0,5$ inductivo.

7. NORMAS PARA CONSULTA

Véanse las normas:

UNE 21 308 — Ensayos en alta tensión.

UNE 21 310 h1 — Contadores de energía eléctrica de corriente alterna.
Activa clases 1 y 2 reactiva clase 3.

8. CORRESPONDENCIA

La presente norma se corresponde con la publicación de la CEI 280 (1968).

UNE 21 311

Indicadores de máxima de clase 1 para contadores de energía eléctrica de corriente alterna.

1. OBJETO

Esta norma tiene por objeto definir la terminología y los elementos constitutivos, así como establecer las condiciones que deben cumplir los indicadores de máxima de clase 1, para contadores de energía eléctrica de corriente alterna.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma se aplicará a los ensayos de tipo de los indicadores de máxima de clase 1, de nueva fabricación, incluidos los acumulativos, destinados a funcionar mecánicamente acoplados a los contadores de energía activa y reactiva, para indicar la máxima potencia media correspondiente a intervalos de tiempo iguales y sucesivos.

Sólo se relacionará con los contadores en lo referente a la influencia del indicador de máxima sobre el contador.

Los indicadores de máxima de clase 1 podrán acoplarse a contadores de cualquier clase de precisión.

No se aplicará a los indicadores de máxima que funcionan por efectos térmicos o por impulsos eléctricos, ni a los indicadores acumulativos destinados únicamente a control.

3. DEFINICIONES

3.1 Potencia máxima indicada

Es la mayor potencia media, referida a intervalos de tiempo iguales y sucesivos, señalada por el indicador de máxima entre dos puestas a cero consecutivas del aparato.

3.2 Potencia media

Es el cociente entre la energía activa o reactiva y el tiempo en que se ha producido o absorbido dicha energía.

3.3 Período de medición

Es la duración de los intervalos de tiempo iguales y sucesivos (por ejemplo, 15 min). Comprende el tiempo en que el órgano de arrastre del indicador de máxima está acoplado al mecanismo del contador y el tiempo de desacoplamiento.

3.4 Indicador de máxima

Es el aparato que, aplicado a un contador de energía eléctrica, permite conocer la potencia máxima indicada; se compone generalmente de los siguientes dispositivos:

- a) Dispositivo de arrastre.
- b) Dispositivo de desacoplamiento.
- c) Dispositivo de retroceso.
- d) Dispositivo indicador, compuesto por una aguja móvil con el cuadrante correspondiente o por uno o más rodillos graduados con el índice fijo.
- e) Dispositivo de puesta a cero.
- f) Eventualmente, un dispositivo de temporización.

3.5 Indicador de máxima acumulativo

Es el indicador de máxima similar al definido en el apartado 3.4, que además está provisto de un mecanismo que acciona unos rodillos graduados para poder sumar las potencias máximas indicadas en el curso de varias puestas a cero sucesivas.

3.6 Contador base

Es el contador de energía eléctrica al que está acoplado el indicador de máxima, y que acciona el dispositivo de arrastre del mismo.

3.7 Dispositivo de arrastre

Es el dispositivo que, bajo el accionamiento del contador base, desplaza la aguja o bien el o los rodillos del indicador.

3.8 Dispositivo de desacoplamiento

Es el dispositivo que interrumpe la acción del contador base sobre el dispositivo de arrastre del indicador de máxima.

3.9 Dispositivo de retroceso

Es el mecanismo que, en el tiempo de desacoplamiento, devuelve el dispositivo de arrastre a su posición inicial sin modificar la indicación de la aguja o bien del o de los rodillos.

3.10 Dispositivo de temporización

Es el dispositivo que determina el período de medición.

3.10.1 Observaciones

El dispositivo de temporización puede estar situado en el interior del contador (ejemplo, motor síncrono) o en el exterior (ejemplo, reloj de mando).

3.11 Dispositivo indicador

Es una aguja que puede moverse, delante de un cuadrante o bien un o unos rodillos graduados que pueden girar, en las proximidades de un índice fijo.

3.12 Dispositivo de puesta a cero

Es el dispositivo que permite retornar, a mano o por otro medio, la aguja o bien el o los rodillos al punto cero.

3.13 Tiempo de desacoplamiento

Es el intervalo de tiempo al final de cada período de medición, durante el cual el dispositivo de desacoplamiento interrumpe la acción del contador base sobre el indicador de máxima, permitiendo así que el dispositivo de arrastre vuelva a su posición inicial.

3.14 Graduación

Es el conjunto de trazos que permiten determinar la posición del dispositivo indicador.

3.15 División

Es la distancia que separa dos trazos consecutivos de la graduación.

3.16 Numeración

Son los números marcados en la graduación.

3.17 Escala

Es el conjunto formado por la graduación y por la numeración, que permite determinar el valor de la cantidad medida.

3.18 Cuadrante

Es la placa cuya superficie visible lleva la o las escalas, los símbolos y las inscripciones necesarias.

3.19 Campo de medida

Es la parte de la escala en la que se puede medir con la precisión requerida.

3.20 Alcance del indicador de máxima en relación con la magnitud que mide

Es el valor correspondiente al límite superior del campo de medida.

3.21 Constante K de un indicador de máxima

Es el coeficiente por el cual ha de multiplicarse la lectura en divisiones, en escalas que no tienen indicación de magnitudes, para obtener el valor de la potencia correspondiente.

3.22 Factor de lectura C de un indicador de máxima

Es el factor por el que ha de multiplicarse la lectura, en unidades de potencia, en escalas que tienen indicación de magnitudes, para obtener el valor de la potencia correspondiente, expresada en las mismas unidades.

3.22.1 Observaciones

Este factor se utiliza cuando los contadores están conectados a transformadores de medida.

3.23 Error propio del indicador de máxima

Es el error de medición, producido por los dispositivos del indicador de máxima, sin tener en cuenta el error del contador base. Se expresa en porcentaje del alcance del indicador de máxima.

4. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

4.1 Generalidades

Los materiales aislantes empleados en los indicadores de máxima, deberán ser prácticamente no higroscópicos.

Todas las partes expuestas a la corrosión en condiciones normales de empleo, se protegerán de una manera eficaz contra las influencias atmosféricas.



Las capas de protección no sufrirán desgaste apreciable en las manipulaciones habituales, ni se deteriorarán en las condiciones normales de empleo.

4.2 Envolvente

La envolvente común, para el indicador de máxima y su contador base, será robusta y su construcción permitirá que quede precintada de modo que no se pueda perturbar la marcha o las indicaciones mediante la introducción de un cuerpo extraño sin alterar los precintos. Además, será prácticamente estanca al polvo.

Si la envolvente es metálica, estará provista, en contadores para tensiones superiores a 250 V con respecto a tierra, de un dispositivo que permita la conexión de un conductor de protección, de dimensiones apropiadas, fácilmente identificable.

El botón del dispositivo de puesta a cero será preferentemente de material aislante. En el caso de emplear botones metálicos, éstos deberán estar aislados.

4.3 Ventanas

Si la tapa no es transparente, deberá estar provista de una o varias ventanas para la lectura del integrador del contador y del indicador de máxima, así como para la observación del movimiento del equipo móvil. Estas ventanas estarán protegidas por placas de material transparente adecuado, perfectamente sujetas e imposibles de retirar sin despescintar la tapa.

4.4 Dispositivo de puesta a cero

El dispositivo de puesta a cero estará construido de forma que en su posición normal no afecte a la aguja o bien al o los rodillos del indicador de máxima, y que pueda bloquearse o precintarse en esta posición. La puesta a cero del dispositivo indicador podrá efectuarse sólo después de quitar los precintos, o bien por medio de una herramienta especial.

4.5 Escala, dispositivo indicador, campo de medida y graduación

La potencia máxima indicada se observará, bien mediante una aguja que se mueva delante de un cuadrante o bien por uno o varios rodillos graduados que giren en las proximidades de un índice fijo. La escala deberá marcarse en unidades de potencia (W, kW, MW, var, kvar, Mvar) o en divisiones sin indicación de magnitudes eléctricas. En este último caso, la potencia máxima indicada se obtendrá mediante la constante K, cuyo valor deberá indicarse en el cuadrante.
Si la escala está graduada en unidades de la magnitud que se va a me-

dir, esta unidad se indicará en el cuadrante. Al emplear transformadores de medida, para obtener la potencia máxima indicada, será necesario multiplicar la lectura por el factor C, correspondiente a las relaciones de transformación.

El alcance, correspondiente al valor máximo de la graduación de la escala, vendrá determinado por el valor de la potencia del contador base, correspondiente a su intensidad nominal, redondeando el valor. El alcance del indicador de máxima estará comprendido entre 1,2 y 1,5 veces la potencia correspondiente a la intensidad nominal del contador base, pudiéndose incrementar el límite superior de dicho alcance en valores múltiples de 0,5 veces la referida potencia, sin sobrepasar la potencia correspondiente a la intensidad máxima de precisión del contador base.

El límite inferior del campo de medida deberá ser el 20 % del alcance. Si el indicador de máxima lleva varios dispositivos indicadores, por ejemplo aguja o rodillos e indicador de máxima acumulativo, las exigencias de precisión se refieren únicamente al dispositivo indicador definido anteriormente (véase el apartado 3.11).

4.6 Sentido de movimiento del dispositivo indicador

Si el dispositivo indicador es una aguja, el sentido normal de movimiento creciente será el correspondiente a las agujas de un reloj.

Si el dispositivo indicador está formado por rodillos, el sentido creciente de rotación deberá ser el mismo que el del integrador del contador base.

4.7 Bornes

En caso de necesidad, se preverán bornes para los circuitos auxiliares.

4.8 Estabilidad de la indicación de máxima

El dispositivo indicador no deberá desplazarse en condiciones normales de empleo, salvo en la puesta a cero o cuando sea accionado por el dispositivo de arrastre.

4.9 Tiempo de desacoplamiento

El tiempo de desacoplamiento no deberá exceder del mayor de los valores siguientes: 1 % del periodo de medición o 15 s. Este tiempo estará incluido en el período de medición.

4.10 Período de medición

Los valores normalizados de los períodos de medición serán 10, 15, 30 y 60 min.

5. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

5.1 Tensiones normalizadas de los circuitos auxiliares

Las tensiones a utilizar en los circuitos auxiliares podrán ser cualquiera de las indicadas en la norma UNE 21 310.

5.2 Consumo propio máximo de los circuitos

5.2.1 Dispositivo de temporización

- a) A la frecuencia nominal, hasta una tensión nominal de 250 V: 3 W o 9 VA.
- b) Para más de 250 V, un incremento de 0,02 W/V o 0,06 VA/V.

5.2.2 Cada circuito auxiliar

- a) A la frecuencia nominal, hasta una tensión nominal de 250 V: 6 W o 18 VA.
- b) Para más de 250 V, un incremento de 0,04 W/V o 0,12 VA/V.

5.3 Rígidez dieléctrica

El indicador de máxima deberá cumplir los ensayos previstos para los dispositivos auxiliares del contador base.

5.4 Calentamiento

En condiciones normales de funcionamiento, con el indicador de máxima acoplado, el contador base continuará cumpliendo lo indicado en la norma UNE 21 310.

5.4.1 Observaciones

El incremento sobre la temperatura ambiente, tanto para la bobina del dispositivo de desacoplamiento como para el dispositivo de temporización que esté incorporado, no sobrepasará de 50 °C.

5.5 Límites de tensión para el dispositivo de desacoplamiento y para el motor del dispositivo de temporización incorporado

A la frecuencia nominal, el dispositivo de desacoplamiento y el de temporización, deberán funcionar correctamente para todas las tensiones comprendidas entre 0,8 y 1,15 veces la tensión nominal.

6. INSCRIPCIONES A GRABAR EN LOS INDICADORES DE MÁXIMA

En el cuadrante del indicador de máxima se marcarán, de forma indeleble y fácilmente visibles desde el exterior, las inscripciones siguientes:

- a) La unidad de potencia o, en el caso de escala sin indicación de magnitudes, la constante K . Al conectarlo a transformadores de medida, podrá llevar inscrito el factor de lectura C .

Ejemplos:

- 1.) $K = 20 \text{ kW/división}$.

Con esta constante y una lectura, por ejemplo, de 10 divisiones, resulta una potencia de $20 \text{ kW/división} \times 10 \text{ divisiones} = 200 \text{ kW}$.

- 2.) Para un indicador de máxima de 5 A, 100 V, montado en un circuito de 100 A, 10 000 V, con un transformador de intensidad cuya relación sea $100 \text{ A}/5 \text{ A} = 20$ y con un transformador de tensión, cuya relación sea $10 000 \text{ V}/100 \text{ V} = 100$, resultará $C=20\times100=2\,000$. Si la lectura directa en la escala fuese de 20 kW, se tendría una potencia máxima indicada de $2\,000 \times 20 \text{ kW} = 40\,000 \text{ kW}$.

- b) El período de medición, en minutos.

Ejemplo: 15 min.

- c) La tensión y la frecuencia nominales de los circuitos auxiliares, en caso de que difieran de la tensión y de la frecuencia del contador base.

- d) El tiempo de desacoplamiento, expresado en segundos, si el dispositivo de temporización no está incorporado.

- e) El alcance, si el dispositivo indicador está constituido por rodillos graduados.

- f) Además, podrán marcarse en el cuadrante del indicador de máxima la totalidad de las indicaciones relativas al contador base.

7. PRECISIÓN

Los indicadores de máxima se clasificarán según los errores propios admitidos, expresados en porcentaje del alcance.

El límite del error propio de los indicadores de máxima será de $\pm 1\%$. Por tanto, estos indicadores se considerarán de clase 1.

7.1 Límites de los errores

Para tener en cuenta la influencia del indicador de máxima, todos los ensayos del contador base deberán llevarse a cabo con el indicador de máxima acoplado, pero sin que se encuentre en movimiento el dispositivo indicador.

En estas condiciones, los errores deberán hallarse dentro de los límites admitidos en la norma UNE 21 310 para los contadores que funcionan sin indicador de máxima.

7.2 Error propio del indicador de máxima

El error propio del indicador de máxima no deberá sobrepasar el $\pm 1\%$ del alcance en ningún punto del campo de medida. Además, se tendrá en cuenta el error propio del contador base. Los ensayos se efectuarán en dos puntos situados alrededor del 25 % y del 80 % del alcance, respectivamente.

7.3 Error por influencia mecánica

La variación de la indicación del contador originada por la influencia mecánica del indicador de máxima, durante un período de medición a la tensión y frecuencia nominales y con $\cos \varphi = 1$ o $\operatorname{sen} \varphi = 1$, no deberá exceder de los valores indicados en la Tabla I.

Tabla I

Tipo de contador	Valor de la intensidad en porcentaje de la nominal	Variación máxima en porcentaje		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3
Dispositivo indicador en reposo				
Monofásico	5	5	5	—
Polifásico (carga equilibrada)	5	2	3,5	—
Dispositivo indicador en movimiento				
Monofásico	20	4	4	—
Polifásico (carga equilibrada)	20	1,5	2,5	—

Los errores adicionales del contador base debidos a la influencia de magnitudes, tales como tensión, frecuencia, temperatura, etc., serán los indicados en la norma UNE 21 310.

Los ensayos correspondientes deberán efectuarse con el indicador de máxima desconectado, salvo el ensayo sobre la influencia de la posición del contador, que se realizará con el indicador de máxima acoplado, pero sin que se encuentre en movimiento el dispositivo indicador.

7.4 Arranque

Con el indicador de máxima acoplado y hallándose el dispositivo de arrastre en su posición máxima, sin que el dispositivo indicador esté en movimiento, el contador deberá arrancar y girar de manera continua de acuerdo con las condiciones especificadas para el contador base en la norma UNE 21 310, admitiéndose una tolerancia adicional del 0,5 % de la intensidad nominal, es decir, 0,9 % para contadores de clase 1 y 1 % para los de clase 2 (la carga será equilibrada cuando se trate de contadores polifásicos).

Si el dispositivo indicador está en movimiento, la intensidad de arranque podrá alcanzar el 4 % de la intensidad nominal.

Si el contador base lleva integrador de rodillos, el ensayo se realizará con uno o dos de ellos en movimiento.

8. ESQUEMA DE CONEXIÓN

Además de los esquemas indicados en la norma UNE 21 310 para los contadores base, cada indicador de máxima estará provisto de un esquema que mostrará la forma correcta de conexión del contador y del indicador de máxima.

Las marcas de la caja de bornes del contador deberán reproducirse en el esquema.

9. NORMAS PARA CONSULTA

UNE 21 310 - Contadores de energía eléctrica de corriente alterna.

10. CORRESPONDENCIA

Esta norma concuerda con la publicación 211 de la C.E.I.

**TABLA
DE COMPARACION
DE NORMAS DE
DISTINTOS PAISES**

		AUSTRALIA (S.A.A.)	ALEMANIA FEDERAL (V.D.E. 0148)	INGLATERRA (B.S.S. 37)		JAPÓN (JIS)	U.S.A. (A.S.A.)
		1 fas.	1 fas.	3 fas.	1 fas. 2 cond.	1 y 3 fas. 3 cond.	1 y 3 fas.
Intensidad nominal I_N		2,5, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 200, ... 6.000	10 (20) (30) (40) 20 (40)	5 (10) (15) 10 (20) (30) 20 (40) 30 (60) 50 (100)	10, 40, 80	5, 10, 25, 50, 100, 150, 200, ... 6.000	5, 10, 20, 30, 50, 100
Error admisible	Cos $\phi = 1,0$	5 % $\pm 1,5\%$ 10 % $\pm 1,5\%$ 20 % \uparrow \downarrow 125 % 125 ~ 200 % $\pm 1,5\%$ 200 ~ Max. corriente $\pm 2\%$	5 % $\pm 2,5\%$ 10 % $\pm 2\%$ 20 % $\pm 2\%$ \uparrow \downarrow 100% $\pm 2\%$ 100% $\pm 2\%$	1/60 \uparrow \downarrow 1/1	1/20 \uparrow \downarrow 5/4	10 % \uparrow \downarrow 100 % \uparrow \downarrow 100 %	5 % \uparrow \downarrow 10 % 20 % 50 % 100 % 150 % 200 % $\pm 2\%$
	Cos $\phi = 0,5$	10% $\pm 1,5\%$ 20% \uparrow \downarrow 125% 125 ~ 200 % $\pm 2\%$ 200 ~ Max. corriente $\pm 2,5\%$	20 % $\pm 2\%$ 100 % $\pm 2\%$ límite corriente $\pm 3\%$	20 % $\pm 2\%$ 100 % $\pm 2\%$ límite $\pm 3\%$	1/30 \uparrow \downarrow 1/1	1/10 \uparrow \downarrow 1/5 \uparrow \downarrow 5/4	100 % \uparrow \downarrow 100 %
Característica de corriente	Cos $\phi = 1,0$						10 % \uparrow \downarrow 100 % \uparrow \downarrow 100 %
	Cos $\phi = 0,5$						20 % \uparrow \downarrow 100 % \uparrow \downarrow 2,5 %

Característica de tensión	$\pm 10\%$ variación con $\cos \phi = 1$	10 % \uparrow \downarrow 125 %	1 % \uparrow \downarrow 0,5	= 1 10 % ~ límite corriente $\pm 1\%$ = 0,5 20 % ~ límite corriente $\pm 1\%$	= 1 10 % ~ límite corriente $\pm 1\%$ = 0,5 20 % ~ límite corriente $\pm 1\%$	1/10 \uparrow \downarrow 1/2	1/10 \uparrow \downarrow 1/1	10 % \uparrow \downarrow 100 %	10 % \uparrow \downarrow 100 %
Característica de frecuencia	$\frac{1}{5}$ cos $\phi = 1,0$ $\frac{1}{2}$ cos $\phi = 0,5$	0,75 % \uparrow \downarrow 2 %	10 % $\pm 1\%$ 100 % $\pm 1\%$ \uparrow \downarrow 100 % $\pm 2\%$	10 % $\pm 1\%$ 100 % $\pm 1\%$ \uparrow \downarrow 100 % $\pm 2\%$	1/10 0,75 % \uparrow \downarrow 1/2 0,75 %	1/1 0,75 % \uparrow \downarrow 1/1 2 %	100 % 1,5 % \uparrow \downarrow 100 % 2 %	10 % 1,5 % \uparrow \downarrow 100 % 1,5 %	10 % 1,5 % \uparrow \downarrow 100 % 1,5 %
Característica de temperatura	Cos $\phi = 1,0$	100 % 0,06 %/1°C (10°C ~ 40°C)	10 % 0,1 %/1°C 100 % 0,1 %/1°C 10 % 0,05 %/1°C 100 % 0,05 %/1°C (-5°C ~ +35°C)	1/30 \uparrow \downarrow 1/2 0,1 %/1°C	1/10 0,1 %/1°C 1/1 0,1 %/1°C 100 % 0,12 %/1°C (0 ~ +30°C)	100 % 0,12 %/1°C 100 % 0,12 %/1°C (0 ~ +30°C)	10 % 0,12 %/1°C 100 % 0,12 %/1°C	10 % 0,12 %/1°C 100 % 0,12 %/1°C	10 % 0,12 %/1°C 100 % 0,12 %/1°C
Corriente de arranque	Debe arrancar y continuar girando con:	0,5 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %	0,25 %	1 % carga	- 2 %	
Giro al vacío	Con 110 % U_N	No debe hacer más que una vuelta	No debe moverse entre 90 % y 110 % de U_N		No debe hacer más que una vuelta	No debe hacer más que una vuelta		No debe girar con mayor velocidad que: 1 rev./15 min.	
Pérdidas (W)	En circuito de tensión	Con valores nominales de tensión y de frecuencia	Hasta 250 V: 1,8 W más de 250 V: 1 W por 100 V	1,5 W (7,5 VA)	Hasta 240 V: 2 W 240-250: 2,2 W más de 250 V: 3 W	Hasta 240 V: 2 W más de 240V: 1 W/100 V	10 VA	3 W	
	En circuito de intensidad	Con valor nominal de frecuencia	hasta 10 A: 1,5 W 10 a 30 A: 2,5 W (3,5 VA) 30 a 50 A: 3,5 W (4,5 VA)	Hasta 10 A: 1,5 W (2,5 VA) 10 a 30 A: 2,5 W (3,5 VA) 30 a 50 A: 3,5 W (4,5 VA)	10 A: 8 W 40 A: 8 W 80 A: 8 W	5 a 10 A: 1,5 W 10 a 50 A: 2 W más de 50 A: 4 W	hasta 50 A: 3 W más de 50 A: 10 W	3 W	
	Características de la numeración		de esferas en 5 dígitos	De tambor en 5 ó 6 dígitos	De esferas en 6 dígitos	de esferas o de tambor en 5 dígitos	de esferas	de esferas	

BIBLIOGRAFIA

- AEG TELEFUNKEN, *Catálogos. Publicaciones e Instrucciones*. Western Germany (hasta 1974).
- AEG HERBERT OTTO. *Inductions-zähler, Entwicklung. Wirkungweise und Anwendung*; Der Elektriker 8, 1969, s. 59-62.
- AEG KARL WEBER, *Elektrizitätszähler*. Elitera Verlag, Berlin, 1971.
- SANGAMO Co. LTD., *Testing & Calibration Manual y Publicaciones*. Sangamo Co. Ltd., Toronto, Ont., Canadá, 1974.
- SANGAMO Co. LTD., D. C. MUCCI. *Fundamentals of Electric Revenue Metering*. Sangamo Co. Ltd., Toronto, Ont., Canadá, 1966.
- SANGAMO Co. LTD., *Catálogos y Publicaciones varias*. Sangamo Co. Ltd., Toronto, Ont., Canadá (hasta 1974).
- GENERAL ELECTRIC METER DEPT, *Electrical Metermen's Handbook, Publicaciones*. Gen. Electr. Co. Somerworth, N.H., U.S.A., 1973.
- GENERAL ELECTRIC METER DEPT, *Catálogos e Instrucciones de contraste*. Gen. Electr. Co. Somerworth, N.H., U.S.A. (hasta 1974).
- EDISON ELECTRIC INSTITUTE, *Electrical Metermen's Handbook*. Edison Electric Institute, New York, 1950.
- FUJI ELECTRIC Co., LTD., *Catálogos y Publicaciones varias*. Fuji Electric Co., Ltd., Tokyo, Japón, 1974.
- L. M. HASEKIEFF, *Medidores Eléctricos*. José Montesó, Barcelona-Buenos Aires, 1964.
- R. FERRER, *Contadores Eléctricos*. Sintes, Barcelona, 1960.
- L. BARBILLON, S. LÓPEZ TAPIAS, *Contadores Eléctricos*. Serrahima y Urpi, Barcelona.
- J. DOMENECH CAMON, *Contadores Eléctricos de Corriente Alterna*. Gustavo Gili, Barcelona, 1943.
- H. GROSSE-BRAUCKMANN und E. HUETER, *Über dei Drehfeldtheorie des Wechselstromzählers*. Elektrot. Zeitschrift, 1953.
- B. LIS, *Liczniki Energji Elektrycznej*. W.N.T. Varsovia, 1962.

Attaúdo

70001.33266 ej 3

V.3

20/8/80

- ELIMA HANDBUCH, *Elektrische Einbau Instrumente*. Elima GmbH, Frankfurt/M, 1965.
- A. PALM, *Elektrische Messgeräte und Messeinrichtungen*. Springer, Berlin, 1963.
- BUCKINGHAM & PRICE, *Electrical Measurements*. English University Press, 1970.
- ENGLISH ELECTRIC - GEC MEASUREMENTS, Catálogos varios. Stafford, Inglaterra, 1974.
- E. RAS, *Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección*. Marcombo, S. A. Ediciones Técnicas, Barcelona, 1969.
- K. SOKALSKI, *Przekladniki Napieciowe*. P.W.T. Varsovia, 1956.
- K. SOKALSKI, *Przekladniki pradowe*. P.W.T. Varsovia, 1956.
- W. STARCZAKOW, *Przekladniki*. P.W.T. Varsovia, 1958.
- S. LEBSON, *Elektryczne Przyrzady Pomiarowe*. W.N.T. Varsovia, 1971.
- JOSÉ FINOCCHIARO, *Manual de las Unidades de Medida*. Litenia S.R.L. Buenos Aires, 1967.
- H. & B., *Elektrische und Wärmetechnische Messungen*. Hartmann & Braun, Frankfurt/M, 1963.
- E. W. GOLDING and F. C. WIDDIS, *Electrical Measurements and measuring Instruments*. Sir Isaac Pitman & Sons, Londres, 1963.

OTRAS OBRAS DE INTERES

LINEAS DE TRANSPORTE DE ENERGIA, por Luis M.^a Checa
16 x 21,5 cm, 436 páginas, 60 figuras

ELECTROMETRIA DE MATERIALES MAGNETICOS, por Andrés M. Karcz
16 x 21,5 cm, 160 páginas, 81 figuras

INGENIERIA ELECTRICA EXPERIMENTAL, por Luis A. Salazar
17 x 24 cm, 344 páginas, 253 figuras

TRATAMIENTO DE LA ENERGIA ELECTRICA, por M. Poloujadoff
16 x 21,5 cm, 204 páginas, 231 figuras

CONVERSIONES ELECTROMECANICAS, por M. Poloujadoff
16 x 21,5 cm, 244 páginas, 251 figuras

EJERCICIOS Y PROBLEMAS, por M. Poloujadoff
(Máquinas eléctricas de c.c. Redes industriales. Máquinas de c.a.)
16 x 21,5 cm, 260 páginas, 213 figuras

TEORIA DE CIRCUITOS (fundamentos), por E. Ras
16 x 21,5 cm, 332 páginas, 249 figuras

TRANSFORMADORES DE POTENCIA, DE MEDIDA Y DE PROTECCION, por E. RAS
16 x 21,5 cm, 296 páginas, 128 figuras

METODOS EN TEORIA DE CIRCUITOS: temporales, frecuenciales, oportunitarios,
por E. Ras
16 x 21,5 cm, 324 páginas, 142 figuras