

M E D I D A S E L É C T R I C A S

Guía de estudios

Capítulo 6

Ing. Jorge L. Dampé
Ing. Carlos D. Arrojo
Ing. Ricardo Dias
Cátedra de Medidas Eléctricas

Capítulo 6

Instrumentos electrodinámicos y medición de Potencia

6.1. Instrumentos electrodinámicos (generalidades)

Antes de comenzar con el análisis de este tipo de instrumento recordaremos un principio general ya establecido cuando analizamos los instrumentos de imán permanente y bobina móvil: la deflexión media de un instrumento, en el supuesto que el período propio del aparato sea mucho menor que el de la señal periódica que se le aplica, vale:

$$\delta_m = k * \frac{1}{T} \int_0^T c_m(t) * dt \quad (6.1)$$

la (6.1) nos dice simplemente que la deflexión media es proporcional, a través de k (cte. del resorte), al valor medio del par aplicado.

Si el sistema electromagnético en estudio es relativamente complejo, como sucede en los aparatos que veremos, el cálculo del par a partir de las fuerzas (como se hizo en el I.P.B.M) es difícil. Como los sistemas móviles de los aparatos convencionales pueden considerarse, casi sin excepción, como sólidos con un solo grado de libertad (rotación en torno de un eje), puede encontrarse el par instantáneo en ellos a partir de:

$$c_m(t) = \frac{\partial W}{\partial \theta} \quad (6.2)$$

que nos dice que el par que actúa sobre el sistema móvil es directamente igual al cambio que produce, en la energía almacenada en el sistema, una rotación $d\theta$.

Hecha esta aclaración pasaremos directamente al aparato electrodinámico, cuya disposición básica es la siguiente:

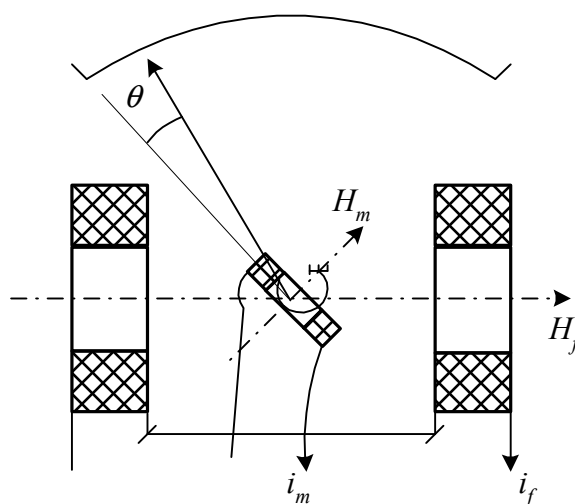


Figura 6.1: Esquema circuital básico de un instrumento electrodinámico.

Posee dos bobinas: una fija, dividida casi siempre en dos mitades, y una móvil, ubicada en la zona del espacio donde existe el campo H_f de la bobina fija.

Supongamos que i_m e i_f , en valores instantáneos, son las corrientes que circulan por las bobinas móvil y fija respectivamente.

El par lo calculamos con la ecuación (6.2), a partir de la energía almacenada en el campo magnético, la cual viene dada por:

$$W = \frac{1}{2} * L_m * i_m^2 + \frac{1}{2} * L_f * i_f^2 + M * i_m * i_f \quad (6.3)$$

y la deflexión media, con ayuda de la (6.1), nos queda:

$$\delta = k \frac{1}{T} \frac{\partial M}{\partial \theta} \int_0^T i_f i_m dt \quad (6.4)$$

que es la ley del aparato electrodinámico, y nos dice que la deflexión es proporcional al **valor medio del producto de las corrientes instantáneas que circulan por sus dos bobinas**.

Según cómo se conecten éstas se tendrán distintos comportamientos. Adoptaremos los siguientes símbolos para cada bobina:



Figura 6.2: Representación esquemática de las bobinas de un instrumento electrodinámico.

6.1.1. Obtención de distintas funciones

Si se conectan las dos bobinas de un instrumento electrodinámico en serie se tendrá, aplicando la (6.4):

$$\delta = k \frac{\partial M}{\partial \theta} \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt \quad (6.5)$$

la cual, por definición de valor eficaz, puede ponerse:

$$\delta = k \frac{\partial M}{\partial \theta} i_{ef}^2 \quad (6.6)$$

La anterior merece una consideración: el instrumento mide corriente, como ya habíamos anticipado que hacían todos los aparatos convencionales con la única excepción del electrostático, por lo que todos los comentarios que oportunamente hiciéramos respecto de los valores característicos, como cifra en Ω/V y forma de modificar los alcances conservan plena validez aquí. La diferencia sustancial es que la cupla media es proporcional al valor eficaz al cuadrado de la señal de corriente, lo que permite caracterizar a este instrumento como de **valor eficaz verdadero**, ya que indica esta característica de la señal aplicada sin necesidad de dispositivos extras como los rectificadores. El nombre alude al hecho de que la indicación de valor eficaz se obtendrá para cualquier forma de onda, (dentro de las frecuencias a las que el instrumento es capaz de responder, que se sitúan en el orden de los centenares de ciclos, por lo

que se comporta correctamente para cualquier onda deformada de las que se encuentran en las frecuencias de red).

Conectando de diferentes formas a las bobinas se consiguen tanto voltímetros como amperímetros. Un detalle constructivo interesante es que, en la configuración de amperímetro, frecuentemente se hace a la bobina fija en dos mitades idénticas, las que al conectarse en serie o en paralelo, permiten variar los alcances en relación 1:2.

Estos aparatos tuvieron su auge hasta la década del sesenta como instrumentos de exactitud de alterna, o eventualmente **de transferencia**, esto es, son calibrados en continua con un método de alta exactitud, y aprovechando su repetibilidad de corto término se los emplea como patrones en C.A. (de ahí el nombre de “de transferencia”: transfieren la exactitud del compensador).

Como aparatos de continua nunca pudieron competir con el de IPBM, más robusto, menos sensible a influencias perturbadoras externas y de menos consumo. Hoy en día su uso ha decaído notoriamente, aún en las mediciones de C.A. de alta exactitud. Como único campo aún considerable podemos citar su empleo como amperímetros de alterna de clases 0,1 o 0,2. Sin duda la aplicación más usual de estos aparatos, y la que constituye su razón de ser a la fecha, es la de vatímetros, en la que se excitan ambas bobinas por separado.

6.1.2. Vatímetros

Supongamos que nos interesa calcular la potencia activa en un circuito como el de la figura 6.3., excitado con alterna, y cuyo fasorial se puede apreciar en la misma figura:

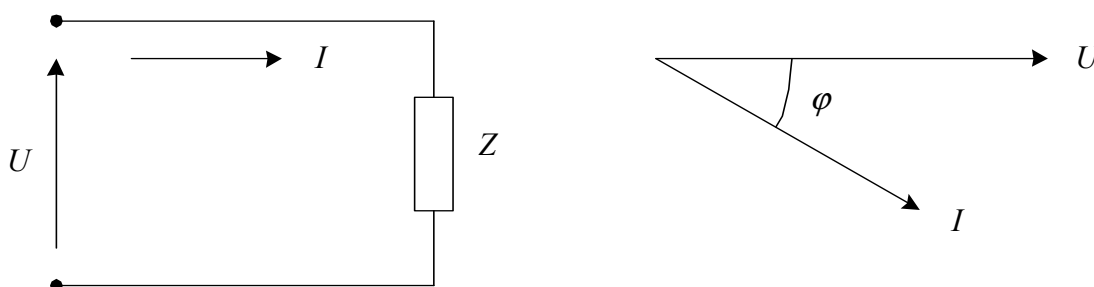


Figura 6.3: Circuito elemental con su correspondiente diagrama fasorial.

La expresión a considerar sería la siguiente:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u * i * dt \quad (6.7)$$

Si relacionamos la ecuación (6.7) con la (6.5) que nos da la indicación media de un instrumento electrodinámico, vemos que son formalmente semejantes, lo que sugiere la forma de conexión: hacemos que por una bobina (la fija) circule la corriente que nos interesa, y a la otra, que inicialmente supondremos resistiva pura, le aplicaremos la tensión del circuito cuya \$P\$ se quiere medir. Se tendrá una conexión como la mostrada en las figuras. 6.4.a) o b), según la posición relativa de circuitos de corriente y tensión:

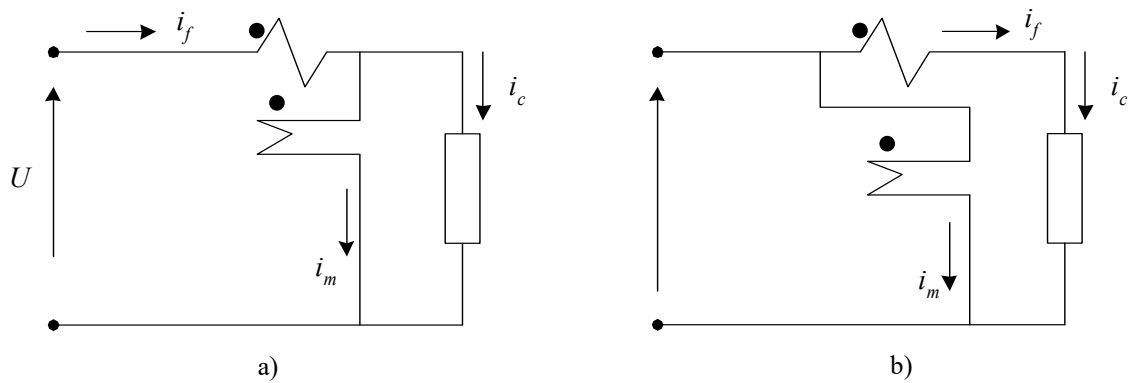


Figura 6.4: Esquemas de conexión de un instrumento electrodinámico para medir la potencia activa en un circuito elemental.

En el caso particular en que las magnitudes tengan variación sinusoidal, podremos escribir:

$$i_f = \sqrt{2} * I_{ef} * \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (6.8)$$

e

$$i_m = \frac{U}{R} = \frac{\sqrt{2} * U_{ef}}{R} * \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (6.9)$$

Con lo cual, reemplazando en la expresión (6.4), resulta:

$$\delta = \frac{1}{k_w} * U_{ef} * I_{ef} * \cos \varphi = \frac{1}{k_w} * P \quad (6.10)$$

que nos dice que la deflexión del aparato es proporcional a la potencia activa.

6.1.2.1. Polaridad relativa

Se denominan puntos homólogos de las bobinas de tensión y corriente a aquéllos en los que corrientes entrantes producen una deflexión en el sentido correcto. Se los indica generalmente con un punto, como se muestra en las figuras 6.4.a) y b). Su correcta individualización es fundamental, pues, como veremos, en algunas aplicaciones que requieren la lectura de más de un vatímetro, en circuitos multifilares, alguno de ellos puede indicar negativo, por lo que se hace imprescindible determinar si tal situación se da porque el circuito así lo establece o por errónea conexión.

6.2. Caracterización de los vatímetros electrodinámicos

6.2.1. Datos característicos principales

Para caracterizar un vatímetro se dan, generalmente, los siguientes datos:

- clase,
- I_n ,
- U_n ,
- $\cos \varphi_n$ (más adelante veremos su significado).

A partir de los valores U_n , I_n y $\cos \varphi_n$ se puede calcular la potencia fiduciaria, P_f , que suele a veces darse como uno de los valores característicos del vatímetro. Resulta claro que, conocidas P_f y la clase, los errores se determinarán como en cualquier aparato analógico.

6.2.2. Error por consumo propio

En una conexión como la de la figura 6.4.a) el instrumento marcará la potencia consumida por la carga más un factor U^2/R_w , que es la potencia disipada en el circuito voltimétrico, por lo que resultará afectada la indicación por un error sistemático de inserción, que se trata en forma análoga a lo ya visto para otros aparatos. Los vatímetros de buena calidad suelen poseer la denominada “compensación del consumo propio”, con la cual la medición se puede realizar sin error sistemático.

La forma con que se logra esta compensación es bobinando sobre la devanado de corriente, una segunda bobina de igual número de espiras, y conectándola en serie con la bobina de tensión, pero de forma que sus flujos se resten. De esta forma el campo creado por la bobina de corriente será proporcional sólo a la corriente de la carga. Este tipo de compensación se denomina **Compensación Weston**.

Si en cambio la conexión se realizara como lo indica la figura 6.4.b), la potencia medida sería la suma de la de la carga más la de la bobina de corriente.

6.2.3. Error de fase

Nos abocaremos ahora a otra de las posibles causas de error en el empleo de estos aparatos: el desfase entre U_m e I_m . Aceptamos en el punto 6.1.2. que la corriente en la bobina de tensión se encuentra en fase con la misma. No obstante, siempre existe una inductancia que hace que la I_m retrase respecto de la tensión un ángulo ε , con lo que aparecerá un nuevo error que se llama “error de fase”.

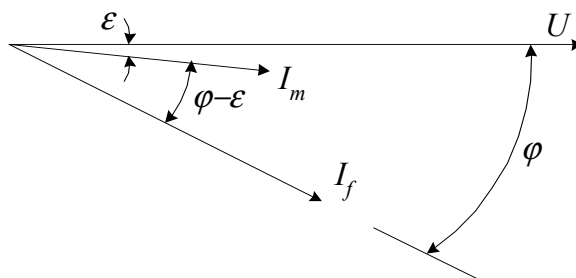


Figura 6.5: Diagrama fasorial real de un circuito como el mostrado en la figura 6.3.a).

Con referencia a la figura. 6.5, se puede encontrar, para el caso de excitación sinusoidal, la siguiente expresión para el error de fase:

$$e_f = \varepsilon[\text{rad}] * \text{tg } \varphi \quad (6.11)$$

que nos dice que el e_f depende, como es lógico, de ε , pero se ve influenciado también por el ángulo de la impedancia del sistema. Tiene signo que coincide con el de φ , si $\varphi > 0$ (inductivo), $e_f > 0$, lo contrario si la carga es capacitiva. El error de fase es de capital importancia cuando la carga que se desea medir es muy reactiva, y es irrelevante si el factor de potencia tiende a 1.

Existen diferentes técnicas para compensar el error de fase, todas coinciden en la colocación de algún elemento reactivo que fuerce a la corriente por la bobina móvil a estar en fase con la tensión.

6.2.4. Vatímetros para bajo $\cos\varphi$

Cuando se desea medir una carga muy reactiva surgen problemas no sólo por el error de fase (se lo debe compensar), sino porque la deflexión se hace cada vez menor, con lo que el error de indicación aumenta. Una solución la proveen los vatímetros para bajo $\cos\varphi$, en los que se ha debilitado la cupla antagonista de modo de lograr deflexión de fondo de escala para U_n , I_n y $\cos\varphi$ de la carga menor que 1. Obviamente con la U_n de continua deflestrarán a fondo de escala para $I < I_n$.

Se los construye para diferentes $\cos\varphi$: 0,1 ; 0,5 ; 0,8 ; etc..

6.2.5. Precauciones de uso

Debido a que se pueden dar combinaciones de U , I y $\cos\varphi$ que hacen $P_m < P_f$, aún con $U > U_n$, $I > I_n$, o ambas, el vatímetro es un aparato que es muy fácilmente quemable, a menos que se controlen U e I .

En el uso normal se colocan un amperímetro y un voltímetro de control.

6.3. Medición de potencia en sistemas de n hilos

Hasta ahora nos hemos ocupado de mediciones en sistemas de dos hilos, en particular monofásicos. Iniciaremos el estudio de los de más de dos hilos. Si bien éstos son casi siempre trifásicos, el análisis se hará en forma general, contemplando a los sistemas de corriente alterna trifásica como un caso particular [3].

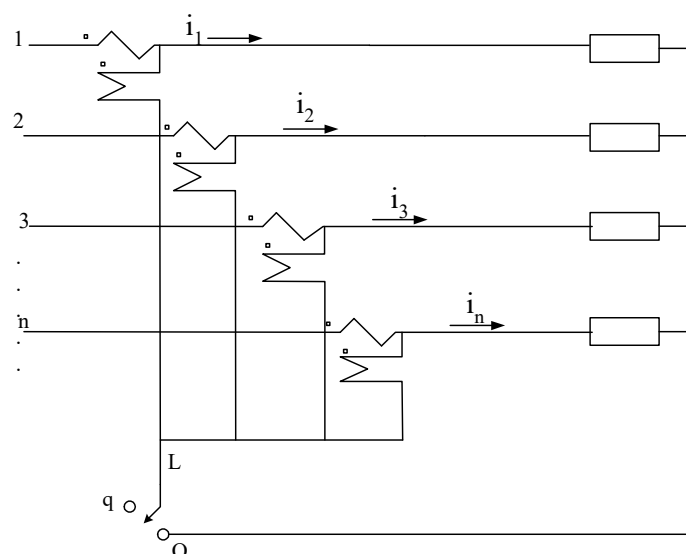


Figura 6.6: Esquema circuitual de un sistema de n hilos.

Determinaremos ahora cuál es el número de vatímetros que se necesita para hacer una medición en un sistema de n hilos:

En la figura 6.6 hemos conectado n cargas con un punto común, **O**.

Sean $u_{10}, u_{20}, \dots, u_{n0}$, las tensiones instantáneas en cada uno de los hilos, e i_1, i_2, \dots, i_n , las corrientes instantáneas. La potencia total instantánea será:

$$p = u_{10} \cdot i_1 + u_{20} \cdot i_2 + \dots + u_{n0} \cdot i_n \quad (6.12)$$

Supongamos que ahora ponemos el punto común de los vatímetros a un potencial cualquiera, p. La suma de las indicaciones instantáneas será:

$$p' = u_{1q} \cdot i_1 + u_{2q} \cdot i_2 + \dots + u_{nq} \cdot i_n \quad (6.13)$$

Se demuestra que la potencia media en un tiempo T es la misma ya sea que integremos p ó p'. Expresando esto en forma matemática queda:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T p' dt \quad (6.14)$$

La conclusión es extremadamente importante: **la suma de las indicaciones de los n aparatos es siempre la potencia total, sea cual fuere el potencial del punto común de los circuitos de tensión.** Obviamente, si las tensiones aplicadas a cada vatímetro son las que aparecen en bornes de la carga a ese hilo conectada (cosa que no siempre es posible), la indicación será la potencia en dicha impedancia.

Surge una idea en forma inmediata: si el punto común de los circuitos de tensión puede estar a cualquier potencial, llevémoslo al de un hilo, con lo cual el vatímetro cuyo circuito de corriente esté en dicho hilo no indicará, y **la potencia resultará de la sumatoria de las indicaciones de los n-1 vatímetros**, cada una de los cuales, no tendrá por qué ser una que físicamente exista en alguna parte del circuito.

Es importante remarcar la absoluta generalidad del método, resultante de las hipótesis de partida totalmente generales:

“En cualquier sistema de n hilos, la potencia total puede obtenerse a partir de las indicaciones de n-1 vatímetros”.

El sistema puede ser de alterna o continua, n-fásico o no, las tensiones y las corrientes pueden o no ser sinusoidales, mientras sea de n hilos, los n-1 vatímetros darán la potencia total (supuesto que los vatímetros sean capaces de responder a las excitaciones que se aplican).

A la demostración del problema tratado se le suele denominar teorema de Blondel.

6.4. Medición de potencia en sistemas trifásicos

La validez general del teorema de Blondel permite su aplicación a sistemas trifásicos, que son, sin duda, los más difundidos de los sistemas de más de dos hilos. Las ventajas de la generación y transmisión trifásica no serán mencionadas aquí, sólo diremos que desde el punto de vista de la

potencia presentan la característica que instantáneamente la misma es constante, cosa que no sucede en el régimen monofásico.

Sistemas trifásicos los hay de tres y cuatro hilos, denominados respectivamente, trifilar y tetrafilar. El primero se emplea casi exclusivamente en transmisión de cantidades importantes de energía, en media o alta tensión, donde con precauciones adecuadas puede evitarse el cuarto hilo, y en baja tensión, en los casos de cargas equilibradas (casi sin excepción, motores).

El tetrafilar, en cambio, se reserva para la distribución en baja tensión; presenta dos ventajas fundamentales:

- posee dos niveles de tensión;
- permite alimentar cargas desbalanceadas, sin que esta condición modifique el nivel de tensión que se aplica a cada una de las fases, cosa que sucedería si dicha carga es conectada en forma distinta de triángulo con tres hilos.

6.5. Medición de potencia en sistemas trifásicos trifilares

6.5.1. Notación empleada

Utilizaremos para la indicación de un vatímetro una nomenclatura con tres subíndices:

$$P_{a(bc)}$$

donde el primero, a , indica el hilo al que va conectado el sistema de corriente, y el par restante (bc) los hilos a los que se conecta el sistema de tensión, con su orden correspondiente.

6.5.2. El método de los dos vatímetros

En la figura 6.7 se ha esquematizado un sistema trifásico de tres hilos; además se han dibujado las conexiones de los vatímetros para la medición de la potencia total, quedando la misma expresada de la siguiente forma:

$$P = P_{R(RT)} + P_{S(ST)} \quad (6.15)$$

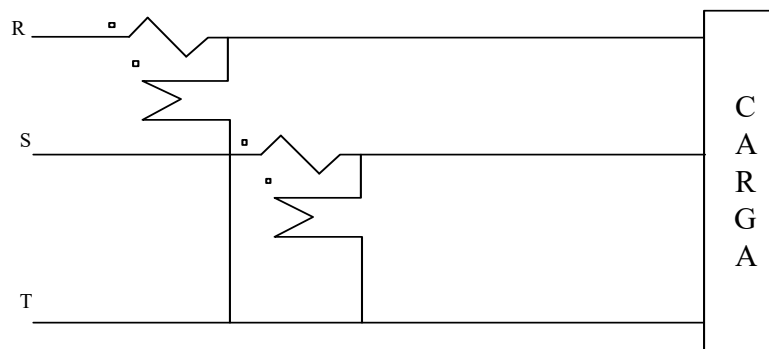


Figura 6.7: Esquema circuitual para la medición de potencia activa en un circuito trifásico de tres hilos, empleando dos vatímetros.

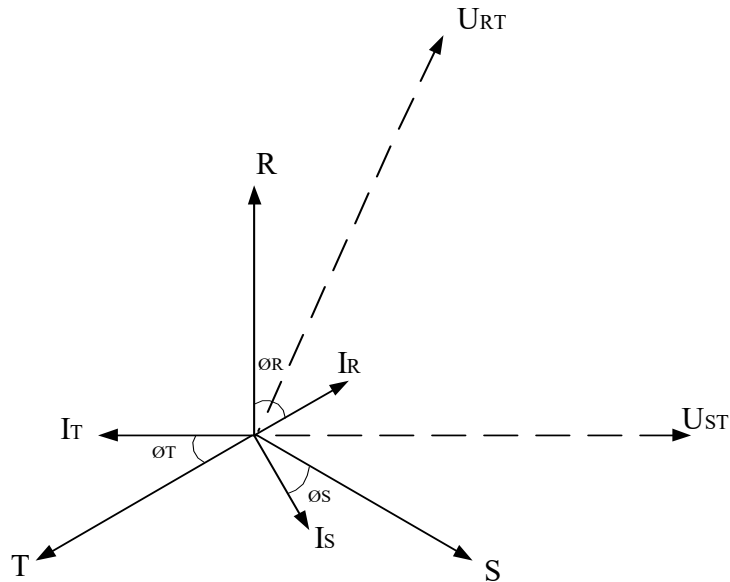


Figura 6.8: Diagrama fasorial correspondiente al circuito de la figura 6.7.

La figura 6.8 corresponde al diagrama fasorial del circuito de la figura 6.7, del que se desprende que la indicación de uno de los vatímetros será:

$$P_{R(RT)} = I_R * U_{RT} * \cos(\varphi_R - 30^\circ) \quad (6.16)$$

en tanto que el otro:

$$P_{R(RT)} = I_S * U_{ST} * \cos(30^\circ + \varphi_S) \quad (6.17)$$

Si uno de los ángulos es tal que la suma dé mayor de 90° , el correspondiente vatímetro marcará negativo, cosa que se dará en el esquema de conexiones dibujado si $\varphi_R > 60^\circ$ capacitivo o $\varphi_S > 60^\circ$ inductivo .

En tal caso se debe invertir uno de los circuitos del vatímetro que marca negativo (el de tensión, obviamente), y su lectura restarse de la del otro. Sin duda la potencia total debe ser > 0 . La indicación negativa no posee ningún significado físico, simplemente nos dice que el desfase entre tensión y corriente supera los 90° , cosa que ocurre por tratarse de tensiones y corrientes no aplicadas a la misma impedancia.

La absoluta generalidad del método de los dos vatímetros nos ha permitido considerar directamente su aplicación al caso de un sistema de tres hilos sin restricción alguna en cuanto a su naturaleza. Lo analizaremos ahora para el caso de sistemas perfectos, que son los más comunes de los trifilares (si incluimos en ellos a los casi perfectos, que son aquéllos en los que el apartamiento de las condiciones que corresponden a uno perfecto es despreciable).

En un tal sistema un generador perfecto alimenta a un sistema de cargas simétrico y equilibrado, lo que resulta en un sistema de corrientes también simétrico y equilibrado. El esquema circuital es el mismo dibujado en la figura 6.6.

Es interesante analizar en este caso cómo varían las indicaciones de los vatímetros si, manteniendo constantes la tensión y el módulo de la carga, se varía el ángulo. En la figura 6.8 se presenta el resultado de dicho análisis, del cual se puede extraer una regla de carácter general: **en un sistema con generador y carga perfectos, si la misma es inductiva el vatímetro que**

indica menos (o negativo) es aquél cuya bobina de tensión está conectada entre la fase de la de corriente y la que le sigue en orden cíclico. Al revés en el caso de carga capacitiva.

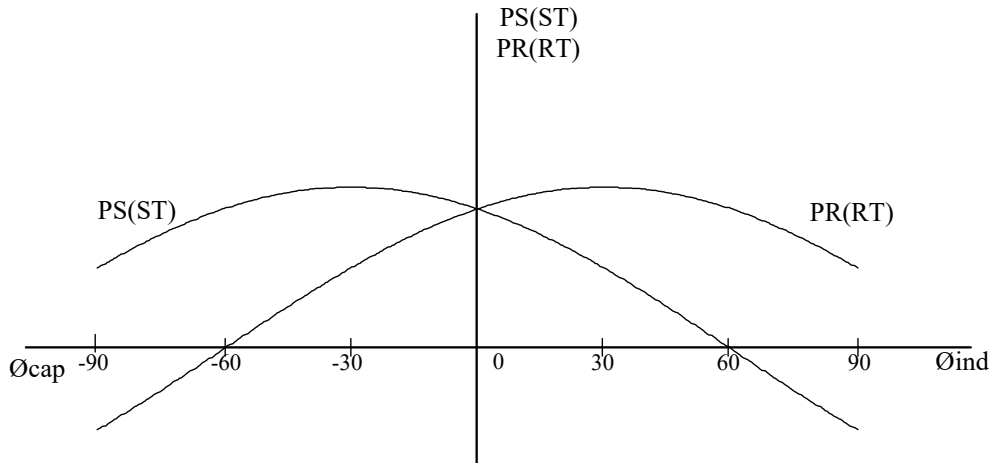


Figura 6.9: Variación de la indicación de los vatímetros del circuito de la figura 6.7, para distintos valores de φ .

Del mismo análisis se puede extraer que, si se conoce la secuencia de fases del sistema, será posible determinar a partir de las indicaciones de los aparatos si se trata de una carga capacitiva o inductiva, y viceversa, dado el carácter de la misma se puede encontrar la secuencia del sistema.

6.5.3. Limitaciones del método de los dos vatímetros

Hemos ya visto que el método es absolutamente general y no reconoce ninguna limitación de tipo teórico en cuanto a su idoneidad para medir la potencia en un sistema de tres hilos. Aparece sí, una limitación de naturaleza instrumental, cuando la carga es muy reactiva, y proviene del hecho de que uno de los vatímetros indicará negativo. La solución, ante un caso como el considerado, radica en la aplicación del método de los tres vatímetros, con una conexión como por ejemplo la de la figura 6.10.

Si las tres bobinas voltimétricas son iguales, O' coincidirá aproximadamente con 0 y cada uno de los vatímetros medirá una potencia similar a la de cada hilo, con lo que el error baja drásticamente, por cuanto el error relativo coincide aproximadamente con el de una sola lectura. (supuesto el sistema perfecto e idénticos los vatímetros).

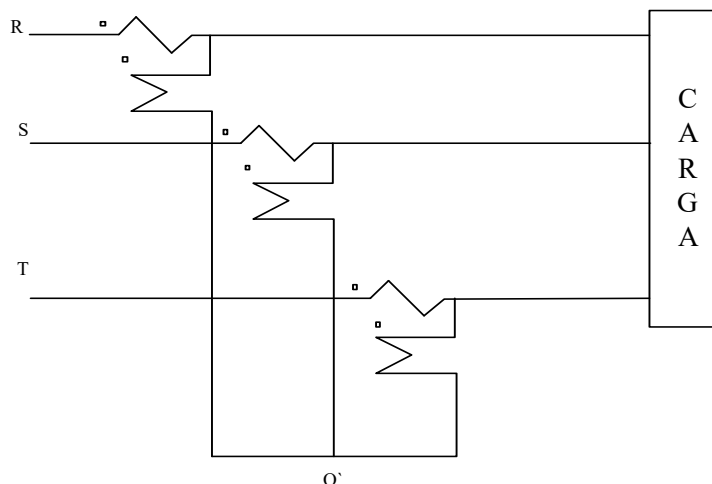


Figura 6.10: Esquema de conexión posible para el caso de una carga muy reactiva.

6.6. Medición de potencia en sistemas trifásicos tetrafilares

Aplicando nuevamente el teorema de Blondel se ve que serán necesarios tres vatímetros para poder medir la potencia total sea cual fuere la característica de la carga.

En cuanto a la forma de estudio de un sistema como éste, vale todo lo dicho hasta el momento con la sola inclusión de un hilo más. El esquema de conexiones se presenta en la fig. 611. Resulta claro que cada aparato marcará la potencia activa en el hilo al que está conectada la bobina de corriente, por lo que no cabe esperar indicaciones < 0 .

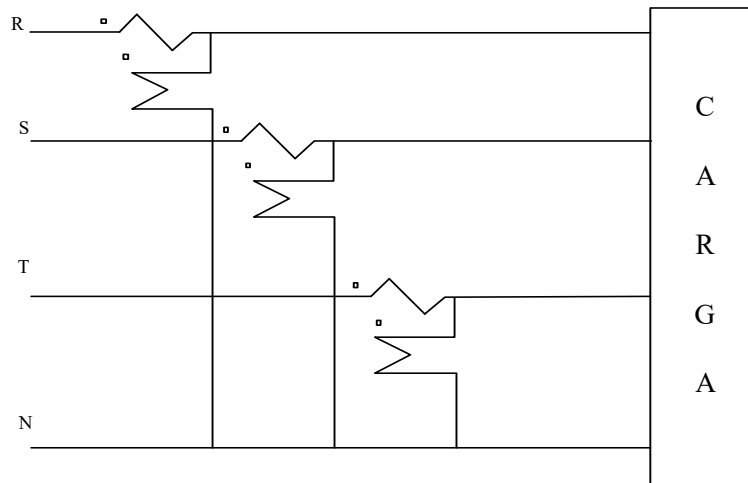


Figura 6.11: Esquema de conexión para el caso de una sistema tetrafilar.

6.7. Medición de potencia reactiva con vatímetros

Analizando nuevamente la expresión (6.10) para el caso en que el ángulo de desfase entre las corrientes de las dos bobinas sea $90^\circ - \varphi$, en lugar de φ como fue en su momento, la indicación del instrumento será proporcional al seno del ángulo φ , por lo que estará midiendo la potencia reactiva del circuito, si se cumple que I_m sea proporcional al módulo de la tensión e I_f lo sea a la corriente.

En el caso de un varímetro, aparato que mide directamente Q , se hace que la corriente en la bobina móvil retrase 90° respecto de la tensión a ella aplicada, con lo que la cupla media resultará proporcional a $U.I.\text{sen}\varphi$

El logro de ese retraso obliga a emplear elementos reactivos en el circuito de tensión, que hacen que la indicación dependa de la frecuencia, y que la exactitud lograda no sea apreciable. En el caso en que el sistema en donde se efectúe la medida presente tensiones que naturalmente estén desfasadas 90° unas de otras, y que guarden relaciones de módulos conocidas, la medición de potencia reactiva se puede hacer con vatímetros.

Esto se da en los sistemas de generador perfecto, en los que se pueden encontrar tensiones a 90° , como se muestra en la figura 6.12.

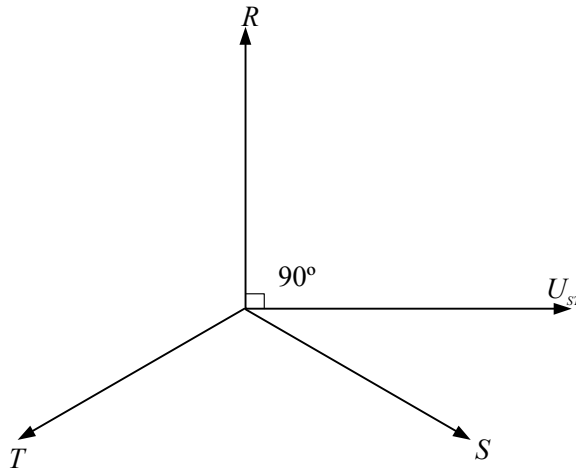


Figura 6.12: Esquema fasorial para la medición de potencia reactiva con vatímetros en sistemas trifásicos.

La tensión U_{ST} , por ejemplo, está 90° retrasada respecto de U_{R0} y su módulo es $\sqrt{3}$ veces mayor. En general, dada una tensión simple, la compuesta cuyos subíndices siguen en orden cíclico es la que está retrasada 90° de la simple. Luego, si en un sistema con generador perfecto queremos por ejemplo medir la potencia reactiva en el hilo R , tomaremos la lectura $P_{R(ST)}$: señal de corriente, la que interesa, I_R , señal de tensión, la de ST , a 90° (en retraso) de U_{R0} .

La figura 6.13 muestra el esquema de conexiones para la medición aludida.

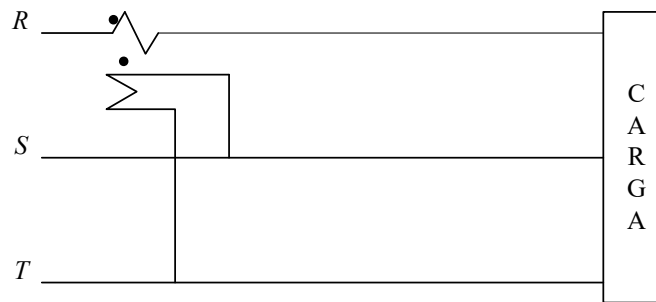


Figura 6.13: Esquema de conexiones para la medición de potencia reactiva con vatímetros en sistemas trifásicos.

La expresión de la potencia medida por el vatímetro, para un circuito como el anterior sería:

$$P_{R(ST)} = I_R * U_{ST} * \cos(90^\circ - \varphi_R) = \sqrt{3} * U * I_R * \sen \varphi_R = \sqrt{3} * Q_R \quad (6.18)$$

Es de destacar que esta conexión da Q_R con su signo convencional: (+) si es inductiva y (-) si es capacitiva. En este último caso, para efectuar la lectura, se deberán invertir las conexiones de la bobina de tensión.

Por último se remarca que el método es válido tanto para sistemas de tres como de cuatro hilos.

6.8. Medición de energía

En los puntos que preceden nos hemos ocupado de la medición de potencia en los casos que podemos considerar más representativos. Si consideramos que la energía en un sistema puede

calcularse a partir de la integración de la potencia en el tiempo, llegaremos a la conclusión evidente que un medidor de energía no será más que un vatímetro integrador. A continuación se presenta una breve descripción de los medidores de energía del tipo convencional, y en capítulos posteriores se hará lo mismo con los del tipo electrónico.

En el Anexo 6.I se reproducen, con autorización del fabricante, características de medidores de energía monofásicos, extensamente usados en los sistemas eléctricos de distribución de tipo domiciliario.

6.8.1. Principio de funcionamiento

La energía puesta en juego en un sistema eléctrico puede expresarse como:

$$A = \int_0^t p \cdot dt \quad (6.19)$$

De (6.19) se desprende que el instrumento que mida energía eléctrica deber realizar la integración de la potencia puesta en juego en el sistema. Dicha integración podrá efectuarse en forma electrónica o mecánica, siendo esta última la usada por el medidor de energía de inducción. Su principio de funcionamiento es el siguiente: se hace girar un disco con una velocidad angular (ω) proporcional a la potencia a integrar. El disco posee un sistema mecánico encargado de contar el número de revoluciones (N) que realiza en un intervalo de tiempo dado. De esta forma tendremos:

$$\omega = \frac{dN}{dt}, \text{ o bien: } N = \int_0^t \omega \cdot dt \quad (6.20)$$

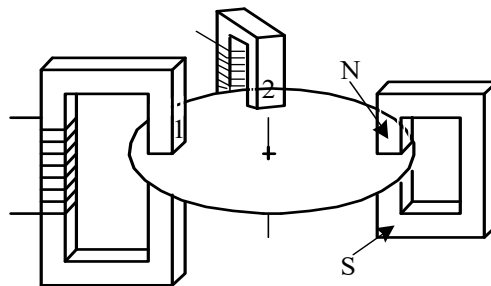


Figura 6.14: Esquema elemental de un medidor de energía eléctrica de inducción.

Considerando las ecuaciones (6.19) y (6.20), y el hecho de que la potencia es proporcional a la velocidad del disco, surge que el número de giros contados es equivalente (a través de una constante adecuada) a la energía que se pretendía medir.

Veamos más en detalle el funcionamiento del aparato:

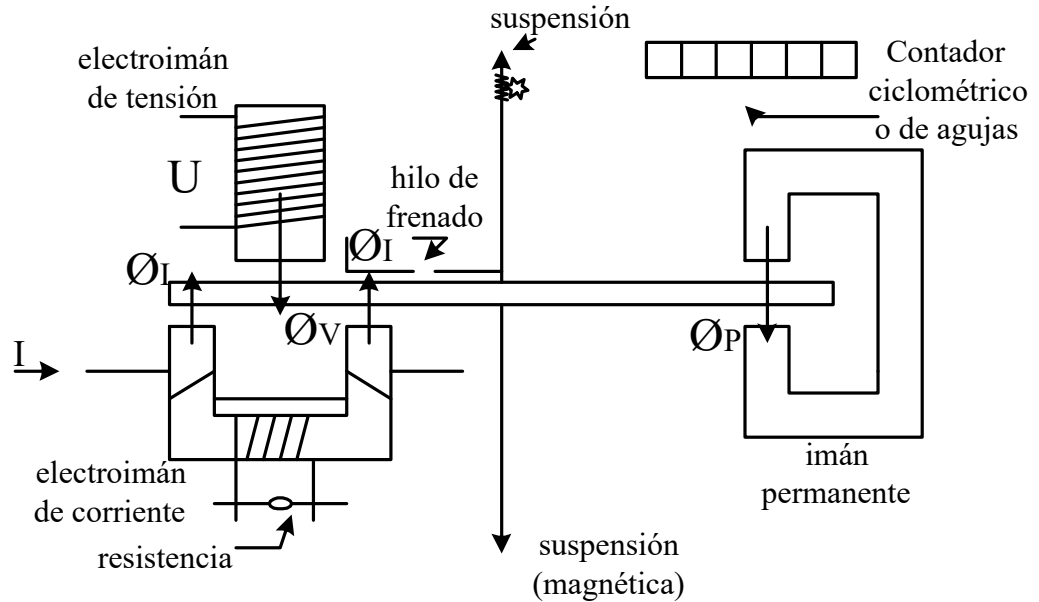


Figura 6.15: Esquema simplificado de un medidor de energía eléctrica de inducción.

Posee un disco liviano de material conductor (aluminio) suspendido en el entrehierro de un circuito magnético formado por los electroimanes de corriente y tensión. El flujo ϕ_I producido por el electroimán de intensidad origina corrientes inducidas en el disco, las que reaccionan con el flujo ϕ_U del electroimán de tensión, produciendo la cupla motora que hace girar al disco.

El valor de esta cupla puede expresarse como:

$$C_m \propto \phi_I * \phi_U * \text{sen } \sigma \quad (6.21)$$

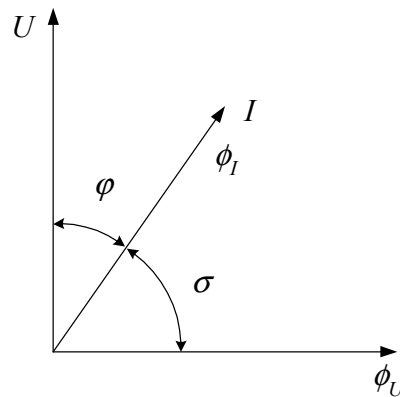


Figura 6.16: Fasorial de flujos magnéticos de un medidor de energía eléctrica de inducción

Siendo σ el ángulo de fase entre los flujos de tensión y corriente.

Considerando un medidor ideal, la relación entre ϕ_I , ϕ_U , U e I es la mostrada en la figura 6.16, por lo que la cupla motora resulta:

$$C_m \propto \phi_I * \phi_U * \text{sen}(90^\circ - \phi) \propto P \quad (6.22)$$

Para conseguir que el disco gire a velocidad constante (si P también lo es) se coloca un imán permanente, el cual produce una cupla opuesta a la motora (cupla directriz) directamente

proporcional a la velocidad del disco.

$$C_d = k * \omega \quad (6.23)$$

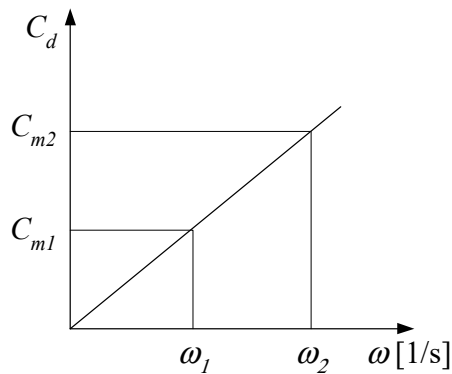


Figura 6.17: Relación cupla ($\propto P$)- velocidad de giro para un medidor ideal de energía eléctrica de inducción.

En un medidor real, sin embargo, y debido a las pérdidas en los materiales magnéticos y a los flujos dispersos en el entrehierro, el diagrama fasorial tendrá la siguiente forma:

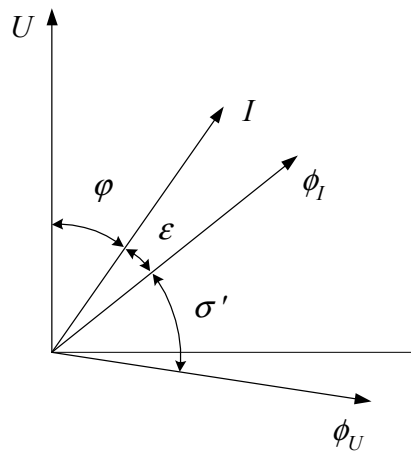


Figura 6.18: Diagrama fasorial de un medidor real de energía eléctrica de inducción.

Siendo, en general, $\sigma' \neq (90^\circ - \varphi)$ la cupla motora no será proporcional a P , introduciéndose un cierto error. Para corregir esto se intercala una resistencia a través de un bobinado secundario sobre el electroimán de corriente, con lo que se logra variar el desfase ε entre I y ϕ_I . El ajuste consiste en lograr $\sigma' + \varphi = 90^\circ$ (condición de 90°), con lo que se compensa el efecto anterior.

El aparato se completa con sistemas auxiliares de frenado (hilo de frenado, por ejemplo) encargados de impedir el giro en vacío del disco, y un dispositivo que genera una cupla motora auxiliar que contrarresta el roce del sistema móvil.

6.8.2. El medidor de energía como elemento de un circuito

Los medidores de energía, como la casi totalidad de los elementos empleados en la técnica eléctrica o electrónica, responden en su construcción a normas determinadas. En el caso de los medidores de energía cuyo principio de funcionamiento sea el de inducción, la norma internacional a aplicar es la IEC 521, del año 1988: “Class 0.5, 1 and 2 alternating-current watt-hour meters”.

Las características más importantes de este tipo de medidores, que figuran en la norma y que tendrán que formar parte de los datos solicitados por el comprador y entregados por el fabricante, se detallan a continuación:

- Corriente base (I_b): valor de corriente respecto del cual se fijan las características del medidor.
- Corriente máxima ($I_{m\acute{a}x}$): máximo valor de corriente para el cual el medidor cumple con los requisitos de exactitud de esta norma.
- Tensión de referencia: valor de tensión respecto del cual se fijan las características del medidor.
- Frecuencia de referencia: valor de frecuencia respecto del cual se fijan las características del medidor.
- Temperatura de referencia: temperatura ambiente fijada por las condiciones de referencia (en ausencia de indicación se toma $[23 \pm 2]$ °C para la clase 2).
- Constante del medidor: expresa la relación entre la energía registrada por el medidor y el correspondiente número de revoluciones del rotor, expresado en rev/kWh o en Wh/rev.
- Índice de clase: expresa el límite de error permisible para todos los valores de corriente comprendidos entre 0,1 de I_b e $I_{m\acute{a}x}$ a factor de potencia unidad (en el caso de medidores polifásicos con carga balanceada), cuando el medidor es probado en las condiciones de referencia. De esta definición no debe inferirse que el aparato no pueda funcionar en otras condiciones. En particular, se prevé el funcionamiento, con márgenes de error establecidos, para factores de potencia comprendidos entre 0,5 inductivo y 0,8 capacitivo. La Tabla A1.I, extractada de la referencia [4] muestra cuáles son los errores admisibles para los medidores de clase 2, que son los más comunes; en particular los domiciliarios pertenecen a este grupo (notar que en este caso no se dan cotas de error para cargas capacitivas).

Tabla 6.I

Corriente	cos ϕ	Error [%]
0,05. I_b	1	$\pm 2,5$
0,1. I_b a $I_{m\acute{a}x}$	1	$\pm 2,0$
0,1. I_b	0,5 (ind.)	$\pm 2,5$
	0,8 (ind.)	-----
0,2. I_b a $I_{m\acute{a}x}$	0,5 (ind.)	$\pm 2,0$
	0,8 (ind.)	-----

- Porcentaje de error: el porcentaje de error esta dado por la siguiente formula:

$$\text{error}[\%] = \left(\frac{\text{energía registrada} - \text{energía verdadera}}{\text{energía verdadera}} \right) * 100$$

Salvo el último, los restantes datos precedentes se encuentran en la placa de características de los medidores.

6.8.3. Conexión

Como se puede deducir a partir de su principio de funcionamiento, la forma de conectar medidores de energía no difiere en nada, respecto de la empleada para los vatímetros.

La validez general del Teorema de Blondel hace que el número de sistemas de medida que emplean los medidores sea siempre el número de hilos menos uno. Así, para sistemas trifásicos trifilares se emplearán medidores de **dos sistemas**, que constan de dos medidores monofásicos dispuestos de tal manera que las cuplas que produce cada uno de ellos se sumen algebraicamente sobre un eje común, que es el que mueve al dispositivo integrador. En el caso de los sistemas trifásicos tetrafilares, el número de sistemas será, como es lógico, tres.

6.9. Referencias

- [1] Harris, "Electrical Measurements", John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Bossi Coppi, "Misura Elettriche", U. Hoepli
- [3] Skilling, Hugh H., "Circuitos en Ingeniería Eléctrica", Compañía Editorial Continental S.A.
- [4] Comisión Electrotécnica Internacional, Norma IEC 521, año 1988: "Class 0.5, 1 and 2 alternating current watt-hour meters".

Anexo 6.I
Medidor de energía activa monofásico

**NUEVO
MEDIDOR**
de energía activa monofásico

F. 85



GENERAL  ELECTRIC

GENERAL ELECTRIC ARGENTINA S.A.

Suministró al mercado más de 300.000 unidades de su Modelo I-79 que sin duda poseía la más alta tecnología de General Electric en su diseño.

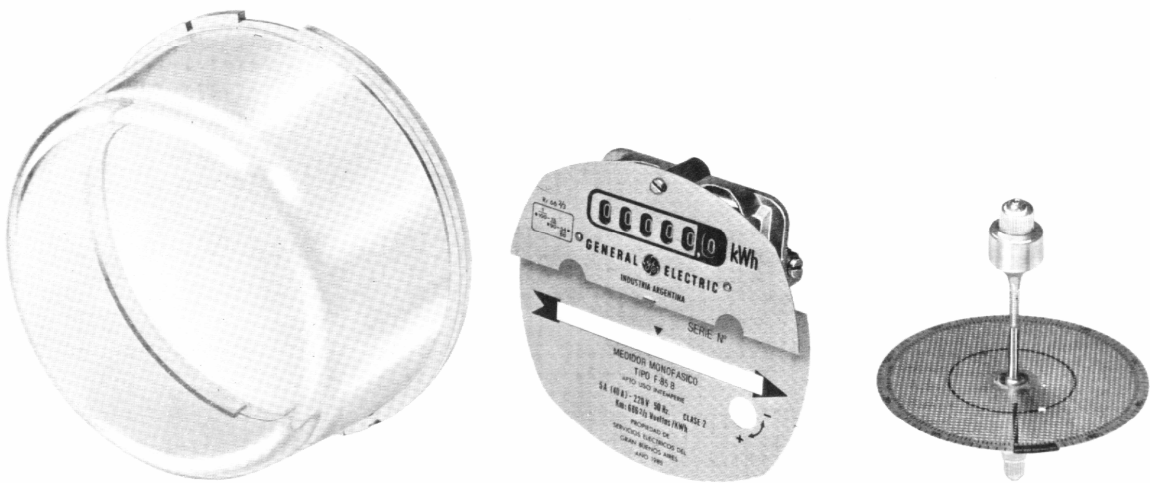
Sin embargo las condiciones particulares de nuestro mercado nos mostraron, a través de los departamentos técnicos de nuestros clientes, que una mayor adaptación al mismo podría lograrse implementando algunos cambios en el diseño.

El F-85 pretende ser la conjunción de nuestra experiencia, de los mencionados cambios; y también incluir en este nuevo diseño la tecnología para proveer un medidor apto para uso intemperie. Esta última característica la consideramos una ventaja puesto que permitirá mantener la larga vida útil del medidor aún en aquellas instalaciones que sin ser intemperie no proveen, por diferentes motivos, suficiente

protección a los agentes climáticos para los medidores del tipo convencional.

Además la versión del F-85, con Tapa de Lexan, asegurará resistencia al mal trato mecánico.

Se ha tratado con especial énfasis de mantener la mayor intercambiabilidad de partes, que las modificaciones apuntadas permiten entre los diseños de los modelos



TAPA FRONTAL:

Puede suministrarse en 2 (dos) versiones: totalmente en vidrio tipo borosilicato o en Lexan, ambos materiales son perfectamente resistentes a los agentes climáticos y, en el caso particular del Lexan, también a tratos que puedan producir golpes.

El sistema de cierre de la tapa es sumamente simple y se produce girando la tapa un ángulo de aproximadamente 15°. No necesita ningún elemento de fijación adicional. La inviolabilidad de las partes internas del medidor se asegura con un sólo elemento de precintado.

REGISTRO CICLOMETRICO:

Su bastidor es inyectado en Silumin, lo que le confiere gran estabilidad mecánica. Para la construcción de los tambores y piñones se utiliza un material plástico de muy bajo coeficiente de fricción y gran estabilidad mecánica. Su tren de engranajes está construido en Latón. No requiere ningún tipo de lubricantes.

La placa de características incluye toda la información necesaria para el uso y control del medidor (N° de laboratorio y/o nombre del propietario si así se lo requiere), utilizando tintas de la más alta resistencia a la radiación solar.

ROTOR CONJUNTO:

El rotor gira montado sobre cojinetes de suspensión magnética, lo que le confiere el mínimo rozamiento posible, entre los cojinetes convencionales utilizados en medidores electromecánicos asegurando así más años de vida útil del medidor.

Actualmente existen más de 50.000.000 de medidores General Electric en servicio en todo el mundo que utilizan este tipo de cojinetes.

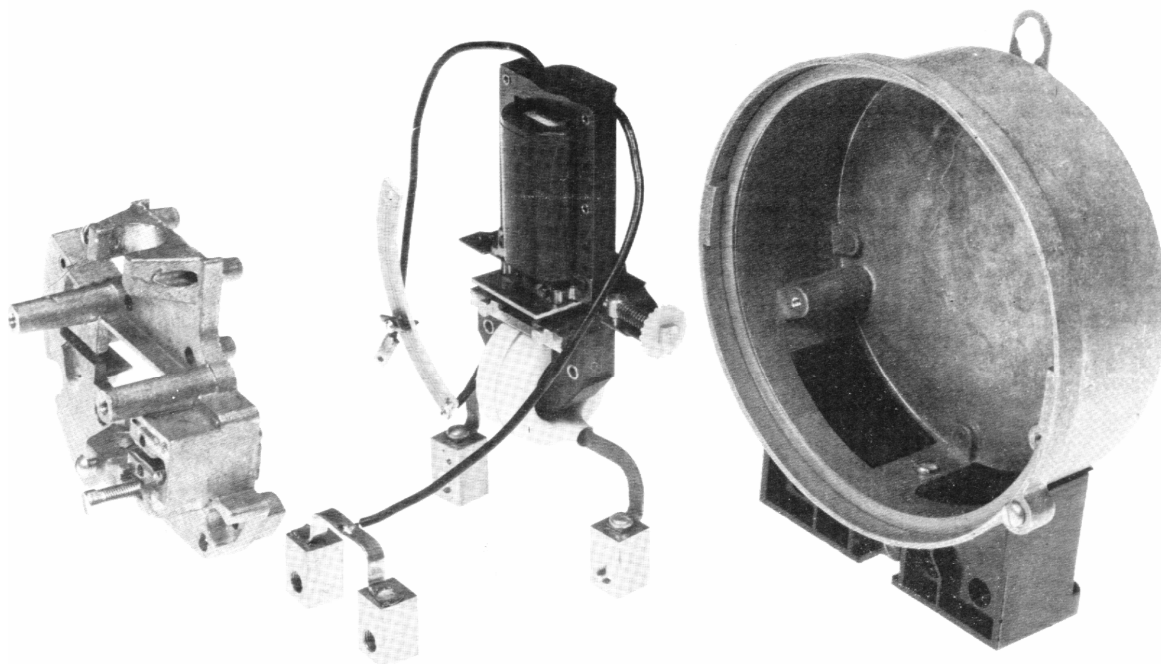
El disco está construido en aluminio de alta conductividad y posee indicaciones impresas para permitir el control del medidor a través del sistema estroboscópico, manual y fotoeléctrico automático.

El eje es de aluminio duro y el sin fin para accionar el registro ciclométrico se encuentra tallado en el mismo.

I-79 y F-85, asegurando así la disponibilidad de partes y servicio para ambos modelos.



F-85



BASTIDOR:

Inyectado en Silumín lo que garantiza la estabilidad mecánica, elemento fundamental para asegurar la "performance" de todo el medidor. Los elementos se encuentran asegurados a él a través de tornillos, lo que permitiría un fácil acceso en caso de ser necesario.

NUCLEO DE TENSION CONJUNTO:

Posee laminaciones de Hierro Silicio, de grano orientado, que reducen sus pérdidas al mínimo. Con compensación para cargas inductivas y variación de tensión. La regulación de baja carga, asociado a este conjunto, es sumamente simple e independiente del resto de los ajustes. Su bobina está encapsulada en poliamida 11. El armado de este conjunto se realiza con remaches expansibles, lo que asegura una gran solidez estructural.

NUCLEO DE CORRIENTE CONJUNTO:

La bobina está constituida por fleje de cobre y posee una cubierta completa de poliamida 11 que asegura una perfecta aislación dieléctrica aún en condiciones de muy alta humedad. Posee un sistema de Shunt de sobrecarga con eficiente compensación hasta el 800% In. El diseño permite, en caso de ser necesario, el retiro de la bobina.

CAJA Y BLOCK CONJUNTO:

CAJA:

Construida en inyección a presión de Silumín. Permite tener 2 (dos) posibilidades de sujeción superior del medidor: visible u oculta. Dispone de 1 (un) borne para el conexionado a tierra del medidor. Posee sendas juntas inyectadas en poliamida 11 que aseguran hermeticidad en los lugares que la aptitud del uso intemperie así lo requiera.

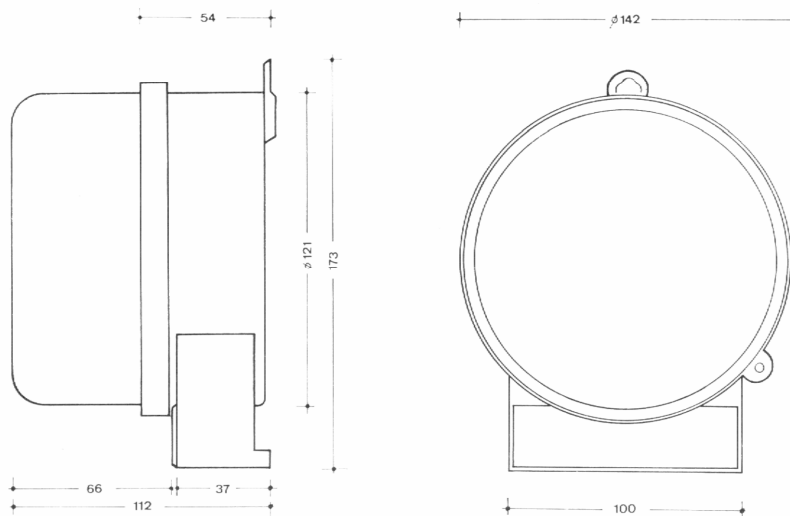
BORNERA:

El block de terminales es de resina fenólica, de generosas dimensiones, lográndose de esta manera una muy buena aislación contra sobretensiones al mismo tiempo que una gran resistencia mecánica.

TAPA DE BORNES:

Cabe agregar que la tapa de bornes es de material plástico transparente y aislante resultando su colocación independiente de la tapa principal. Además, es precintable y tiene grabado el esquema de conexiones.

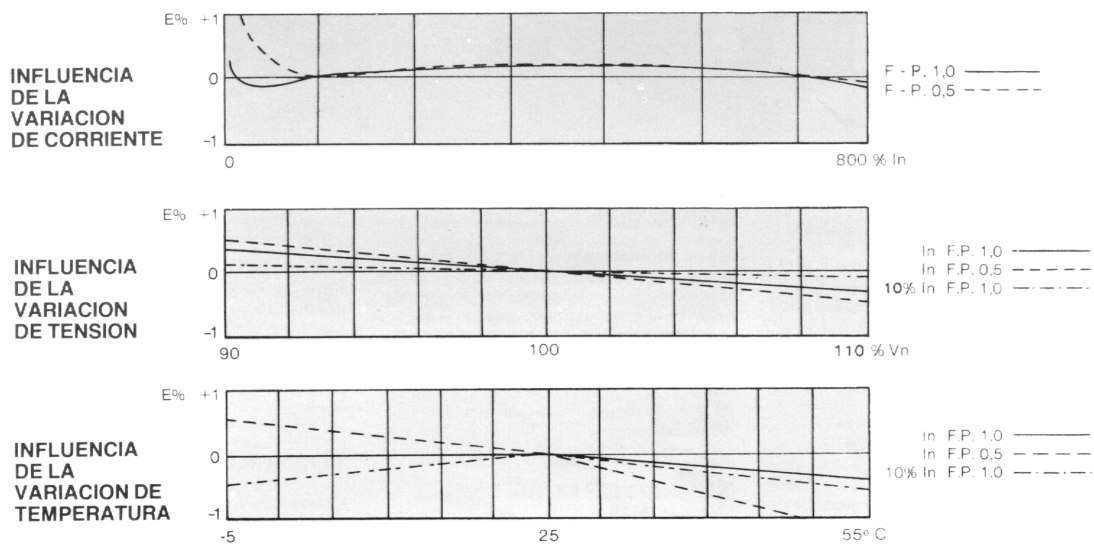
Características técnicas del F-85



CORRIENTE NOMINAL 5 AMP.
 CORRIENTE MAXIMA PERMANENTE 40 AMP.
 FRECUENCIA NOMINAL 50 Hz
 TENSION NOMINAL 220 VOLT.
 CLASE 2
 CONSTANTE DEL DISCO 666 2/3 VUELTAS POR Kwh.
 LIMITES DE ERROR 5% In y 800% In.
 (TIPICOS) + 2%

CORRIENTE DE ARRANQUE (TIPICA) 0.5% In
 AMPER ESPIRAS DE LA BOBINA DE CORRIENTE SS
 CONSUMO DE LA BOBINA DE CORRIENTE 0.40 VA
 CONSUMO DE LA BOBINA DE TENSION 1.3W
 CORRIENTE DE EXCITACION DE LA BOBINA DE TENSION 25 MA

CURVAS CARACTERISTICAS PROMEDIO



GENERAL ELECTRIC ARGENTINA

SOCIEDAD ANONIMA

DIRECCION TELEGRAFICA
 "INGENETRIC"
 TELEX 02 - 1679

SANTO DOMINGO 3220
 TEL. 21-6141/49 - 28-2917
 1292 BUENOS AIRES