

Introducción a mediciones eléctricas e instrumentos analógicos

1. Consideraciones generales

1.1 Definiciones básicas

Medir significa comparar la magnitud correspondiente con una unidad apropiada. Bajo el concepto de medir se entiende la acción de registrar numéricamente magnitudes cuyo conocimiento es imprescindible para estudios científicos, en máquinas e instalaciones, en la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, etc. El valor de la medida queda expresado como el producto del valor numérico por la unidad correspondiente.

Para realizar mediciones eléctricas se utilizan diversos instrumentos de medida, que pueden dividirse en cuatro grandes grupos:

1. **Instrumentos indicadores analógicos** en los que una aguja señala, sobre una escala apropiada, la magnitud eléctrica a medir.
2. **Instrumentos registradores**, en los que se anota gráficamente, el curso en el tiempo de la magnitud eléctrica correspondiente (los registradores modernos son denominados *dataloggers*)
3. **Instrumentos digitales**, en los que la magnitud eléctrica a medir se indica en una pantalla, en forma de un número decimal.
4. **Instrumentos totalizadores**, que indican la energía total suministrada durante cierto tiempo; se les denomina también instrumentos contadores o, simplemente, contadores.



Figura 1: Vistas frontales de instrumentos de medición: Analógico, Digital y Totalizador.

1.2 Denominaciones básicas de los instrumentos de medida

Deflexión

Se denomina así a la *cantidad de divisiones en que se desvía la aguja indicadora sobre una escala de un determinado instrumento*. La deflexión suele ser referida con la letra griega α . La deflexión máxima será la máxima cantidad de divisiones que tiene la escala de un instrumento ($\alpha_{\max}$).

Campo nominal de referencia

Indica el *rango de un determinado parámetro en el cual el instrumento mantiene su grado de exactitud (clase)*. Esta indicación viene expresada generalmente en el propio cuadrante de los instrumentos. Por ejemplo si en encuentra escrita una leyenda subrayada: 40....60 Hz significa que el instrumento mantiene su clase siempre y cuando el margen de frecuencia en la que el instrumento es utilizado no se aparte de los límites fijados.

Campo nominal de utilización

Es el **margen de variación** de algún parámetro que afecte el funcionamiento de un instrumento (por ejemplo: frecuencia, temperatura, etc) dentro del cual el error cometido por el instrumento corresponde a **dos veces la clase**.

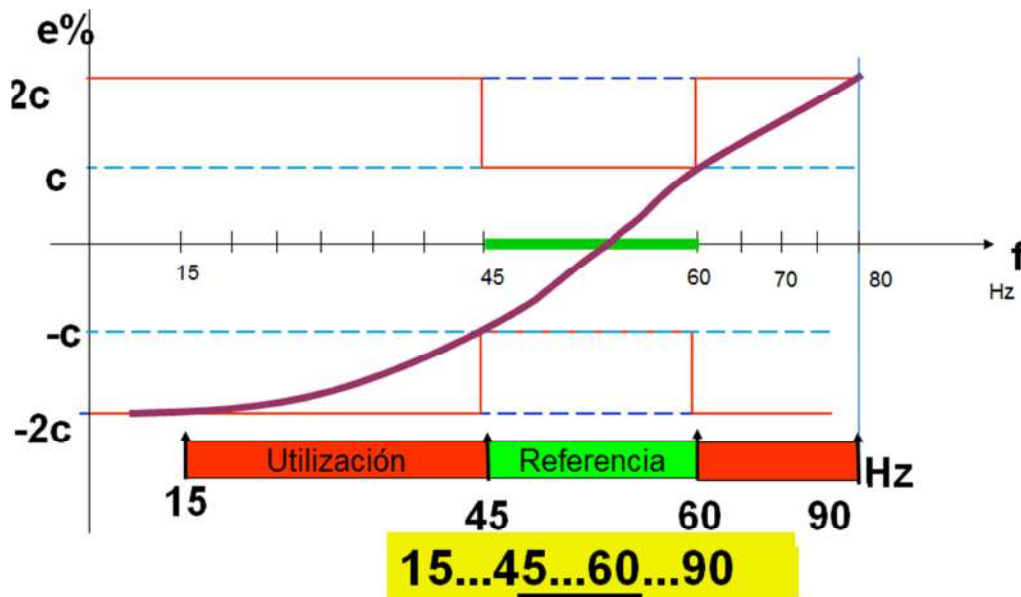


Figura 2: Curva cualitativa comparativa para diferenciar entre: Campo nominal de referencia y Campo nominal de Utilización, para el caso de un instrumento analógico.

Clase

Se define como el *error absoluto máximo* (diferencia entre valor medido y valor verdadero de la magnitud medida) que puede cometer el instrumento en cualquier parte de la escala, referido a su alcance y expresado en valor porcentual:

$$c = \frac{E_{Max}}{Alcance} 100$$

Este valor viene marcado como un número dentro de las especificaciones del aparato de medida y en el panel frontal del mismo, en el lugar en donde se dan las indicaciones del mismo (símbolo del instrumento, aislación, posición de funcionamiento, etc.). Como resulta obvio cuanto menor sea ese número mayor será el grado de exactitud del instrumento.

Valores de clase estandarizados: 0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 1,5 - 2,5 - 5.

0,1 y 0,2	Instrumentos de gran precisión para investigación o calibración.
0,5	Instrumentos de precisión para laboratorios.
1 y 1,5	Instrumentos de medidas portátiles.
2,5 y 5	Instrumentos para montaje en tableros eléctricos industriales.

Existe la posibilidad de determinar la clase a través de un método de medida denominado “**contraste de instrumentos**”.

Si no se encuentra este número identificador, significa que el fabricante no garantiza la clase del instrumento, es decir, su clase puede ser superior a 1.5.

La clase de un instrumento permite calcular el **error de clase** del mismo, el cual es la indicación que nos brinda el fabricante sobre la calidad del equipo. Este error equivale a la cota de error absoluto cuando se mide en un instrumento de alcance determinado.

También puede interpretarse a la clase como un número que brinda una idea del error porcentual máximo que el instrumento cometerá (según su fabricante) cuando deflexione “a fondo de escala”, es decir, cuando su indicación coincida con el alcance del instrumento. Por ejemplo, si un instrumento analógico de alcance 10V y es de clase 1 y el mismo indica 10V en una medición, quiere decir que el *error instrumental* asociado a la medición será del 1% de su alcance, es decir, 0.1V.

$$Error\ de\ clase = \frac{c \cdot A}{100} = E_{Máx}$$

Rango de medida

Se define así al tramo de la escala en el cual las lecturas son confiables. Puede ocurrir que en una determinada escala de un instrumento indicador o registrador tenga al principio de ella valores muy comprimidos. En esa parte no es correcto medir, es por ello que en el rango de medida se expresa como:

$$\text{Rango de medida} = \alpha_{Max} - \alpha_{Min}$$

El valor máximo del rango de medida queda definido como el alcance del instrumento, dato que se ha de utilizar en la definición de clase de un instrumento.

Cuando el instrumento responde a una ley de deflexión lineal (por caso el instrumento de imán permanente y bobina móvil, con campo radial y uniforme), la escala será lineal si se trata de la aplicación como amperímetro o voltímetro. En este caso el rango de medida será coincidente con el alcance del instrumento. En el caso de los instrumentos cuya ley de deflexión es del tipo cuadrática, (hierro móvil, electrodinámico) la escala será lineal por cuanto el fabricante mediante dispositivos constructivos tratará que sea así. No obstante esto, siempre en el inicio de la escala se produce invariablemente una contracción de la misma y la imposibilidad de su correcta calibración (aproximadamente entre un 10 a un 20% del alcance). Este es el caso del amperímetro electrodinámico que se ilustra a continuación:

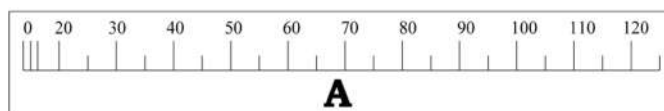


Figura 3: Escala de un amperímetro electrodinámico

Para el cuadrante del amperímetro que se ilustra en la figura, el rango será de 105 divisiones.

También se puede definir al rango de medida como el margen de valores de la magnitud de medida, en el que el instrumento se atiene a los límites de error definidos por la clase correspondiente.

Margen de indicación

Se define así a toda la escala del instrumento.

Exactitud

Es el grado de **proximidad del valor medido con el valor real** o verdadero.

Precisión

La precisión de un instrumento indicador da idea de la **repetición de las lecturas** en el mismo. No siempre un instrumento preciso significa que sea exacto. A la inversa un instrumento exacto ha de ser siempre preciso.

Campo de indicación y campo de medida

El **campo de indicación** de un instrumento de medida está determinado por los valores inicial y final de la escala. El campo de medida de un instrumento de medida comprende aquella parte de la escala en la cual resultan válidas sus indicaciones.

Por ejemplo, en la figura, el campo de indicación comprende de 0 a 800 A; pero las indicaciones de instrumento en el intervalo de 0 a 100 A resultan imprecisas y no pueden considerarse como resultados de medición. Es decir, el **campo de medida** de este instrumento está comprendido entre 100 y 800 A, solamente.

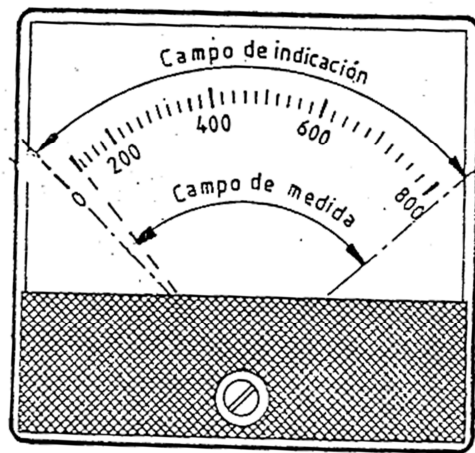


Figura 4: Campo de indicación y de medida en un instrumento de medida

Constante de lectura o Constante de Escala (C_E o K)

Se define a la *relación entre la magnitud máxima al final de la escala (alcance), con su unidad correspondiente, y la máxima deflexión, en divisiones.*

Ejemplo: Si se tiene un instrumento con alcance 5 A. y un máximo de 100 divisiones, la constante de lectura será:

$$C_E = \frac{\text{Alcance}}{\alpha_{Max}} = \frac{5 \text{ A}}{100 \text{ div}} = 50 \frac{\text{mA}}{\text{div}}$$

Cuando la aguja deflexiona una cantidad cualquiera, la magnitud medida será: $X_m = C_E \alpha$

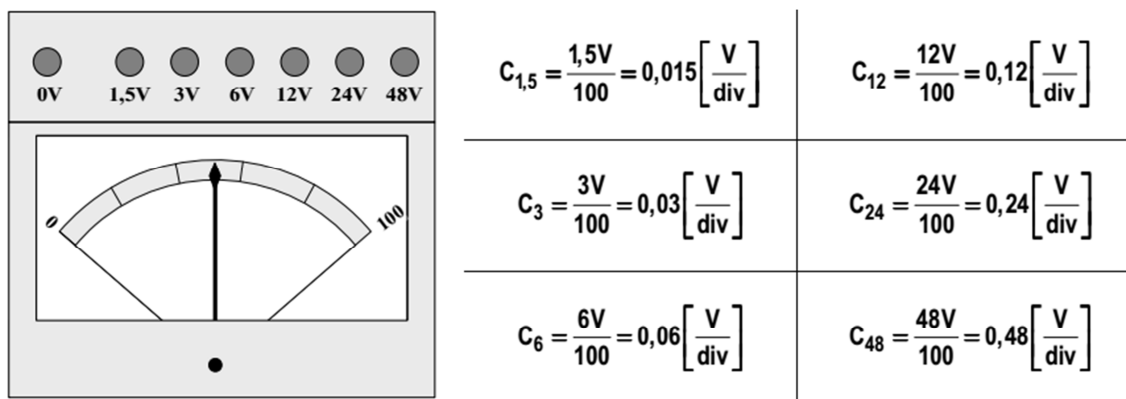
Ejemplos de distintas constantes de escalas para un voltímetro de escala múltiple

Figura 5: Ejemplos de distintas Constantes de Escalas para un mismo instrumento de medida.

Sensibilidad

La sensibilidad de un instrumento de medida viene dada por la **relación existente entre la variación de las indicaciones (no del ángulo de desviación) y la modificación de la magnitud de medida ocasionada por aquella.** En otras palabras, se define sensibilidad como la relación entre efecto sobre causa.

Si un instrumento (ejemplo el de imán permanente y bobina móvil) tiene una ley de respuesta:

$$I = k \alpha$$

Gráficamente se demuestra que para el mismo incremento de corriente corresponde siempre el mismo incremento de desviación, de modo que la relación entre ambos incrementos se mantiene constante:

$$S = \frac{\Delta \alpha}{\Delta I}$$

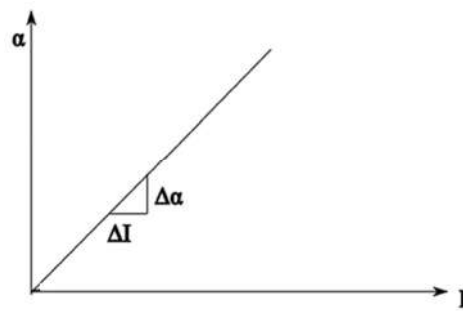


Figura 6: Sensibilidad en un instrumento de respuesta lineal

En forma general, y para instrumentos con cualquier tipo de respuesta (por ejemplo cuadrática), la sensibilidad puede definirse como la derivada de la deflexión respecto a la corriente, en un punto dado de la escala: $S = \frac{d\alpha}{dI}$

Resolución instrumental

Se define como la *variación de la magnitud de medida que ocasiona de forma reproducible un cambio mínimo apreciable en la indicación*.

En el ejemplo de la figura, el mínimo de variación ΔR que provoque un mínimo apreciable de variación en la aguja del amperímetro, un ΔI , a éste se lo denominará **resolución instrumental**, que puede valer desde un 1/5 hasta un 1/10 de división, dependiendo de la calidad del instrumento de medida.

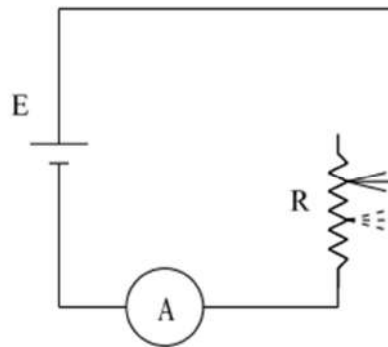


Figura 7: Circuito esquematizando el mínimo cambio perceptible por el instrumento.

Sobrecarga

Es la *relación entre la cantidad máxima no destructiva que tolera el instrumento, sobre la cantidad máxima nominal*:

$$\text{Sobrecarga} = \frac{X'}{X_{Max}} 100$$

Si un voltímetro de alcance 100 V tiene una sobrecarga del 150%, significa que hasta 150 V el instrumento puede utilizarse sin destruirse. Generalmente el fabricante da valores de sobrecarga acompañado con su correspondiente tiempo de admisión.

Consumo propio

El consumo propio es la **potencia absorbida por un instrumento, necesaria para provocar su propia deflexión**. El consumo propio es importante tenerlo en cuenta en mediciones de alta exactitud, pues es capaz de producir notables distorsiones en las lecturas, denominadas error de tipo sistemático (ya que se repiten en módulo y signo), particularmente, errores sistemáticos de inserción instrumental.

Ejemplo:

Es fácil demostrar que el voltímetro (de resistencia interna igual a R_2) dará una lectura igual a 100 V con un error del 33% en defecto (despreciando para este ejemplo el error instrumental por clase).

El consumo propio expresado en unidades de potencia será $P_V = \frac{V^2}{R_V}$

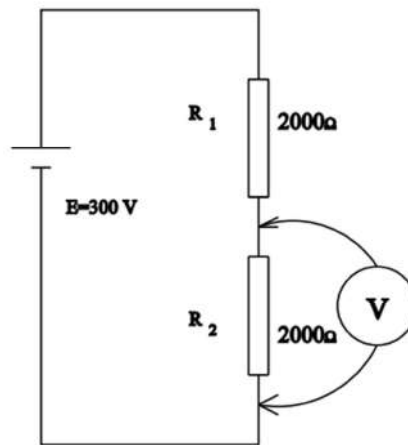


Figura 8: Circuito al que se conecta un voltímetro de resistencia interna 2000 ohm.

Es evidente que cuanto mayor será R_V (en el caso ideal, R_V tiende a infinito) tanto menor será la potencia de consumo y por ende el error de inserción.

Similar demostración puede hacerse en el caso de medición de corriente con un amperímetro, llegando a la expresión de consumo propio $P_A = R_A I^2$

Es evidente que para el caso del amperímetro, su resistencia interna R_A debería ser mínima, (en el caso ideal $R_A=0$).

En algunos catálogos de instrumentos el consumo propio suele estar expresado en la caída de tensión que provoca la inserción del amperímetro cuando por el circuito circula una corriente igual al alcance del instrumento. Para el voltímetro el consumo estará expresado en la corriente que circula por el instrumento cuando entre sus bornes se aplica una tensión igual al alcance.

Valores orientativos de consumo propio de acuerdo al tipo de instrumentos, son los siguientes:

- Instrumentos de imán permanente y bobina móvil:
 - Bajo, del orden de los mW.
- Instrumentos de hierro móvil y electrodinámicos:
 - Medio, del orden de las unidades de W.
- Instrumentos de inducción:
 - Alto, del orden de 5 a 10 W.

Errores de los instrumentos de medida

Todo instrumento de medida tiene cierto error o inexactitud que se debe, en parte, a la construcción del instrumento, en parte al ajuste realizado durante su contraste y, en parte, al desgaste durante su funcionamiento. Como consecuencia de todos estos factores, los valores de la magnitud indicada por el instrumento de medida diferirán en un cierto grado de los valores reales de la magnitud medida.

No debe confundirse los errores propios de un instrumento de medida, con los *errores del método de medición* (estos últimos, son típicamente errores **sistemáticos**, como el error por inserción instrumental ya mencionado, mientras que los errores propios del instrumento de medida, como el error por la clase, son de carácter **aleatorio**). El error de instrumento de medida es solamente una de las causas de error en las mediciones, y pueden ser definidos también como “errores de fabricación”. Así pues, en lo que sigue se hace referencia solamente a los errores propios de los instrumentos, como una característica a considerar en lo que se refiere al propio instrumento de medida.

La exactitud de un instrumento es uno de los criterios para juzgar de su calidad.

Error absoluto. Es la diferencia que existe entre el valor indicado por el instrumento X_m y el valor real X_v de la magnitud medida; es decir

$$E = X_m - X_v$$

El error absoluto es positivo o negativo según que el valor indicado sea mayor o menor que el valor real de la magnitud. En los instrumentos de medida, el error absoluto se determina por comparación de las lecturas del instrumento en cuestión con las lecturas de un instrumento patrón (suponiendo que al instrumento patrón como exacto, es decir, despreciando su error de clase, ya que su clase es mucho menor comparada al del instrumento a contrastar).

Por ejemplo, si al verificar un voltímetro y éste indica 123,5 V y el voltímetro patrón indica 125 V, el error absoluto de la lectura es:

$$E = X_m - X_v = 125 \text{ V} - 123.5 \text{ V} = -1.5 \text{ V}$$

En la hoja de contraste que a veces se incluye con el instrumento, se indican los errores calculados durante el contraste o verificación. Estos datos sirven para realizar las oportunas correcciones cuando se efectúan mediciones con este instrumento. Recuérdese que en un instrumento de medida la corrección C_o tiene el mismo valor absoluto que el error absoluto, pero es de signo contrario, o sea: $C_o = -E$

En el ejemplo anterior, el voltímetro indicaba 123,5 V; aplicando la corrección

$$C_o = -E = +1.5 \text{ V}$$

el valor real de la lectura será:

$$X_v = X_m + C_o = 123.5 \text{ V} + 1.5 \text{ V} = 125 \text{ V}$$

Error relativo. El error relativo de un instrumento de medida es la relación entre el error absoluto E , definido anteriormente, y el valor máximo de la escala (denominado alcance del instrumento), o sea:

$$e = \frac{E}{\text{Alcance}} = \frac{X_m - X_V}{A}$$

Por lo general, se emplea el error relativo porcentual:

$$e_{\%} = \frac{E}{\text{Alcance}} 100$$

La ecuación anterior se utiliza para calcular el error relativo en el caso más general, es decir cuando la escala es uniforme o cuando el sector de la escala a que se refiere el error es uniforme.

Supóngase que el voltímetro del ejemplo anterior tiene una escala uniforme comprendida entre 0 y 150 V. El error relativo es, en este caso:

$$e_{\%} = \frac{1.5}{150} 100 = 1 \%$$

Límite de error de un instrumento de medida

Generalmente, el fabricante de un instrumento de medida garantiza que los valores reales de las magnitudes medidas con el instrumento, en condiciones experimentales determinadas, están comprendidas dentro de ciertos límites referidos al resultado de la medición. Casi siempre se da la semi-distancia que separa estos límites, afectada de los signos «más» y «menos» (por ejemplo, $\pm 1,5$ V).

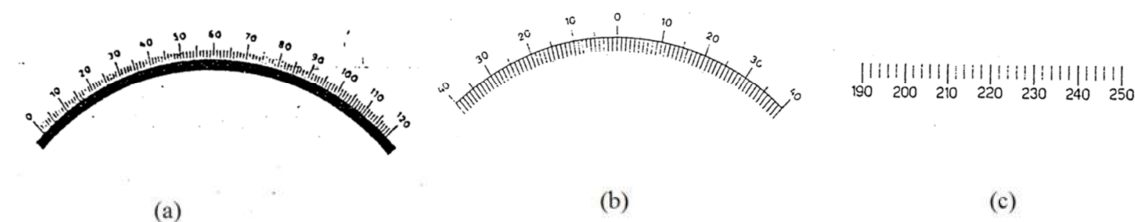


Figura 9: a) Escala de medida uniforme, con cero a la izquierda. b) Escala de medida uniforme, cero central. c) Escala uniforme, con valor inicial distinto a cero.

Para los instrumentos de medida que tienen el cero en el centro de la escala, el error relativo porcentual se calcula por la siguiente expresión:

$$e = \frac{X_m - X_V}{A_{\text{escala 1}} + A_{\text{escala 2}}}$$

También existen instrumentos de medida, cuya escala está comprendida entre un valor distinto de cero y otro valor cualquiera. Para estos instrumentos, el error relativo porcentual se determina mediante la siguiente expresión:

$$e = \frac{X_m - X_V}{A_{Max} - A_{Min}}$$

Cuando la escala del instrumento de medida no es uniforme, como suele ocurrir por ejemplo con un óhmetro, el error relativo se calcula como

$$e = \frac{L_m - L_V}{L_0}$$

L_m : Parte de la escala recorrida por la aguja [mm]

L_V : Parte de la escala que corresponde al valor real [mm]

L_0 : Longitud total de la escala [mm]

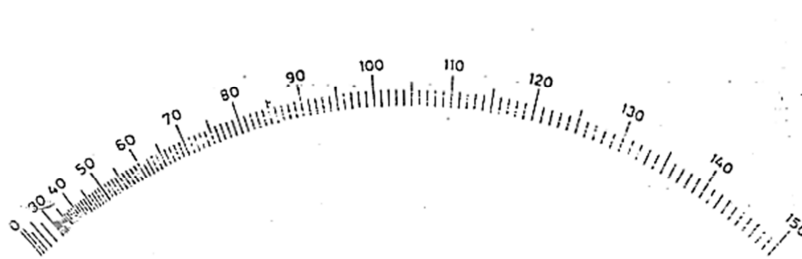


Figura 10: Escala de medida no uniforme

Condiciones normales de funcionamiento de un instrumento de medida

Los instrumentos de medida se fabrican para su funcionamiento óptimo, en lo que a errores y exactitud se refieren, para condiciones normales de funcionamiento y que están establecidas por convenciones internacionales; fuera de estas condiciones normales, los fabricantes de instrumentos de medida no garantizan la exactitud de dichos instrumentos.

Las condiciones normales de funcionamiento típicas son las siguientes:

1. Temperatura ambiente no superior a 20 °C. Cuando el instrumento de medida está previsto para su funcionamiento a temperaturas diferentes a 20°C, estas temperaturas deben indicarse en su cuadrante (panel frontal) o manual de especificaciones.
2. En instrumentos de medida para corriente alterna, la frecuencia en la que el equipo está contrastado, debe indicarse en el cuadrante. Si no se indica, se entiende que la frecuencia de contraste es de la de red local (en Argentina, 50 Hz)

3. En instrumentos de medida para corriente alterna (AC), se supone que han de funcionar con formas de onda sinusoidales.
4. Durante su empleo, la posición del instrumento de medida es la que está indicada en el cuadrante.
5. El instrumento de medida debe trabajar en ausencia de campos magnéticos exteriores; en caso contrario, el instrumento debe estar provisto del correspondiente blindaje magnético, cuya existencia se indica en su cuadrante.

Condiciones anormales de funcionamiento de un instrumento de medida

Cuando un instrumento de medida trabaja en condiciones diferentes a las consideradas normales, aparecen errores adicionales, que deben sumarse a los errores que aparecen en condiciones normales de funcionamiento. Como consecuencia, el instrumento funciona fuera de los márgenes de exactitud previsto por el fabricante.

Los más importantes errores adicionales de un instrumento de medida suelen ser los que se expresan a continuación:

- Error por temperatura. Se produce cuando el instrumento funciona fuera de los límites previstos de temperatura; en estas condiciones, varían las propiedades de los materiales utilizados en la construcción del instrumento, lo que puede ocasionar valoraciones erróneas en la medición.
- Error por frecuencia. En algunos sistemas de medida, la cupla motora y por lo tanto, la indicación del instrumento depende de la frecuencia.
- Error de forma de onda. Depende de la deformación de la forma de onda sinusoidal, y aparece en los instrumentos cuyo momento motor depende del valor medio de los valores de la corriente alterna que miden.
- Error de posición. Se produce cuando se desplaza el centro de gravedad del instrumento; en estos casos, la fuerza de la gravedad origina momentos adicionales que provocan errores en los momentos motores. Este error puede resultar importante en instrumentos cuyo eje es horizontal (por ejemplo, los instrumentos para tableros eléctricos).
- Error por influencia de campos magnéticos exteriores. Este error depende de los campos magnéticos presentes en el exterior del instrumento y, por lo tanto, de las intensidades, direcciones, frecuencias, etc. de dichos campos.

Ejemplo de aplicación:

Para medir una tensión de 80,0 V se dispone:

- a) de un instrumento de medida clase 0,5, con un campo de medida de 250 V .
- b) de un instrumento de medida clase 1, con un campo de medida de 100 V.

¿Cuál de estos dos instrumentos es más apropiado para nuestra medición? Recuerdese que el error porcentual se refiere al valor final de escala.

a) Con el instrumento clase 0,5 se puede esperar un error porcentual de $\pm 5 \%$ es decir, que referido a una escala de 250 V, el error absoluto es

$$E = e_{\%} A_{Max} = \frac{\pm 0.5 \cdot 250V}{100} = \pm 1.25 V$$

Es decir, que se obtiene una incerteza en la medición de

$$X_V = X_m \pm E = (80 \pm 1.25) V$$

b) Con el instrumento clase 1, el error porcentual es de $\pm 1 \%$ o sea que, referido a una escala de 100 V, el error absoluto es

$$E = e_{\%} A_{Max} = \frac{\pm 1 \cdot 100V}{100} = \pm 1 V$$

Es decir, que se obtiene una incerteza en la medición de

$$X_V = X_m \pm E = (80 \pm 1) V$$

Esto quiere decir que, a pesar de su menor exactitud, con el instrumento clase 1 se obtiene una precisión mayor. Esto se da ya que se ha elegido un campo de medida más apropiado.

Conclusiones:

- **Deben evitarse instrumentos de medida cuyo valor de final de escala sea bastante mayor que el valor a medir.**
- **A ser posible, el campo de medida debe elegirse de forma que el posible valor a medir pueda leerse en el tercio superior de la escala**

En la práctica, las medidas pueden clasificarse de la forma siguiente:

Medidas de precisión mediocre	→ Error relativo 10 % ó más
Medidas de precisión normal	→ Error relativo de 5 a 10 %
Medidas de precisión media	→ Error relativo de 1 a 10 %
Medidas de alta precisión	→ Error relativo de 0,1 a 1 %
Medidas de muy alta precisión	→ Error relativo inferior a 0,1 %

Marcado de los terminales de los instrumentos de medida

Cuando el sentido de la corriente influye en el funcionamiento de un instrumento de medida, como sucede, por ejemplo, en amperímetros, voltímetros, wattímetros, etc., debe marcarse con un símbolo el terminal que ha de conectarse al polo positivo.

En los wattímetros y fasímetros monofásicos, debe marcarse con un asterisco (*) el borne del circuito de intensidad y el del circuito de tensión que debe conectarse a la llegada de la corriente, para que la desviación del equipo móvil corresponda al signo positivo de la potencia o del desfase respectivamente.

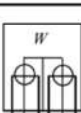
En los wattímetros y fasímetros polifásicos, las fases deben estar marcadas con números o letras, referidas al esquema de conexionado del instrumento.

En los instrumentos previstos para ser conectados con transformadores de medida, los bornes deben estar referidos a los de los transformadores.

Cuando para el funcionamiento correcto de un instrumento de medida tenga que conectarse a tierra su envolvente, en ésta debe existir el correspondiente borne de masa.

Símbolos para la rotulación de instrumentos de medida

En los cuadrantes de los instrumentos analógicos se suelen rotular una serie de símbolos que brindan información en forma rápida (e independientemente del idioma del fabricante y del usuario) y específica sobre el instrumento.

	Instrumento de medida, representación general
	Sistema de medida de indicación general
	Sistema de medida, de indicación con desviación de índice a ambos lados
	Instrumento de medida, amperímetro
	Vatímetro con dos elementos de medidas para sistemas trifásicos (conexión Aron)
	Instrumento digital
	Instrumento integrador (medidores de energía)
	Instrumento registrador

Símbolo	Instrumento	Aplicaciones
	Imán permanente y bobina móvil	amperímetros, voltímetros, óhmetros
	Imán permanente y bobina móvil con rectificador	amperímetros, voltímetros en corriente alterna
	Imán permanente y bobina móvil, cocientímetro	óhmetro
	Lupa de tensión	voltímetros
	Hierro móvil	amperímetros, voltímetros
	Electrodinámico, sin hierro	amperímetros, voltímetros, vatímetros
	Electrodinámico, cocientímetro	fasímetros, frecuencímetros
	Electrodinámico con núcleo de hierro	amperímetros, voltímetros, vatímetros
	Electrostático	voltímetros
	De vibración	frecuencímetros
	Inducción	medidores de energía
	Imán móvil	amperímetros

	Posición de trabajo vertical (instrumentos de tablero)
	Posición de trabajo horizontal
	Posición de trabajo inclinada con indicación del ángulo de inclinación
	Posición de trabajo inclinada con un campo nominal de uso de 45° a 75° (campo nominal de referencia 60°)

	Pantalla electrostática
	Pantalla magnética (de hierro)
ast	Instrumento de disposición astática
	Tensión de prueba 500 V.
	Tensión de prueba (el número interno expresado en kV)
	Instrumento no cumple ninguna especificación de tensión de prueba
	Ídem
	Atención. Observar las instrucciones de empleo en un documento separado
	Corriente continua
	Corriente alterna (sino indica la frecuencia se considera como margen nominal el comprendido entre 45 y 65 Hz).
	Ambas corrientes
	Trifásico con un solo elemento de medida
	Trifásico con dos elementos de medida
	Trifásico con tres elementos de medida
	Resistencia en paralelo (separada del instrumento)
	Resistencia en serie (separada del instrumento)
	Ajuste de cero

Exactitud, campo nominal de uso y referencia	
1,5	Índice de clase de exactitud (referido a los errores porcentuales del valor confiable). Valores normalizados: 0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 1,5 - 2,5 - 5
15...45...55...65 Hz	Instrumento para ser utilizado desde 15 a 65 Hz. Campo nominal de uso 15 a 65 Hz. Campo nominal de referencia 45 a 55 Hz

Tensión de prueba

Determina la **resistencia a tensiones eléctricas del aislamiento entre los terminales del instrumento y su caja o carcasa exterior**. La prueba se hace con tensión alterna a frecuencia de línea.

De acuerdo a las tensiones nominales del instrumento corresponderá la tensión de prueba:

Tensión nominal del instrumento	Tensión de prueba
Hasta 40 V	500 V
40 hasta 650 V	2.000 V
650 hasta 1.000 V	3.000 V
1.000 hasta 1.500 V	5.000 V
1.500 hasta 3.000 V	10.000 V
3.000 hasta 6.000 V	20.000 V
6.000 hasta 10.000 V	30.000 V
más de 15.000 V	$2,2 U_n + 20.000 \text{ V}$

A excepción de la primera (aparece el símbolo de la estrella sin número), en el resto queda expresada en el instrumento con la estrella y el número correspondiente en kV.

Ejemplo:

En la Figura 11 se muestra parte del cuadrante de un wattímetro. De acuerdo a las indicaciones que aparecen en el margen inferior izquierdo del instrumento se interpreta que se trata de un instrumento electrodinámico con núcleo de hierro, para corriente monofásico y corriente continua, de posición de trabajo horizontal, clase 0.5, frecuencia de referencia de 40-60 Hz y utilización de 60-400 Hz. La tensión de prueba es de 2 kV entre uno de los bornes y la caja que lo contiene. El fabricante garantiza que si aplicamos una tensión alterna de 2.000 V a 50 Hz no circulará más de 1 mA de corriente de fuga.

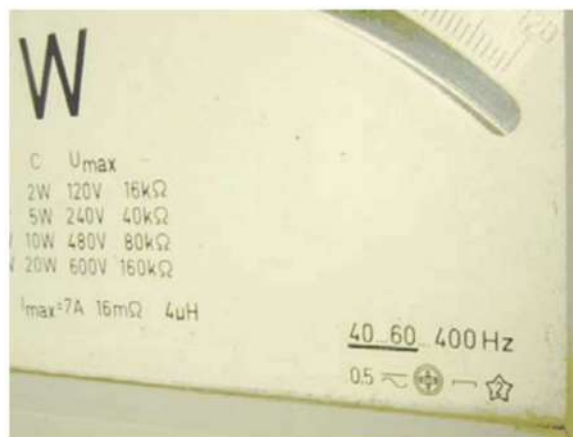


Figura 11: Detalle de simbología de especificaciones en el cuadrante de un wattímetro

Instrumentos de medición de las principales magnitudes eléctricas

A continuación se expresan las principales magnitudes eléctricas, el nombre de los correspondientes instrumentos de medida y las unidades eléctricas que miden estos instrumentos.

Magnitud eléctrica	Instrumento	Unidad
Tensión	Voltímetro - Milivoltímetro	V - mV
Corriente	Amperímetro - Miliamperímetro	A - mA
Resistencia	Ohmetro - Milióhmetro	Ω - m Ω
Resistencia de aislación	Megohmetro	M Ω
Potencia activa	Wattímetro	W
Potencia reactiva	Varmetro	Var
Energía activa	Contador de energía activa	kW.h
Frecuencia	Frecuencímetro	Hz
Factor de potencia	Cofímetro - Fasímetro	-
Tasa de distorsión armónica (THD)	Analizador de redes	-
(Forma de onda)	Osciloscopio	-

Clasificación de los instrumentos de medida por las características constructivas

La caja o envoltente que contiene un instrumento de medida puede adoptar formas muy diversas. En primer lugar existen:

- instrumentos para montaje fijo, utilizados en los tableros de medida
- instrumentos portátiles, utilizados en los laboratorios y para comprobar líneas y máquinas eléctricas



Figura 12: Instrumentos de medida de montaje fijo (izquierda) y portables (derecha)

Clasificación de los instrumentos de medida por el principio de funcionamiento

El movimiento de la aguja o del sistema indicador de un instrumento de medida se produce utilizando distintos efectos electro-magnéticos. El conjunto de los elementos generadores del movimiento y el propio órgano móvil, cuya posición depende de la magnitud a medir, se denomina sistema de medida.

Los sistemas de medida se diferencian por su estructura y por su modo de funcionamiento, tal como se expresa a continuación:

1. Sistemas de medida basados en la acción mutua de un imán permanente y una bobina móvil: **instrumentos imán permanente y bobina móvil (IPBM)**.
2. Sistemas de medida basados en la acción mutua de una bobina fija y un núcleo magnético móvil: **instrumentos de hierro móvil (HM)**.
3. Sistemas de medida basados en la acción mutua de una bobina fija y una bobina móvil: **instrumentos electrodinámicos**.
4. Sistemas de medida basados en los efectos de inducción: **instrumentos de inducción**.
5. Sistemas de medida basados en los efectos electrostáticos de cargas eléctricas en reposo: **instrumentos electrostáticos**.
6. Sistemas de medida basados en los efectos caloríficos de la corriente eléctrica: **instrumentos electrotérmicos**.

En resumen:

Principio de funcionamiento	Magnitud a medir	Tipo de corriente	Ley de respuesta
Imán permanente y bobina móvil	corriente, tensión	c.c.	$\theta = K \cdot i$
Hierro Móvil	Corriente, tensión	c.c. y c.a.	$\theta = \frac{aL}{d\theta} I^2$
Electrodinámico	Corriente, tensión, potencia, etc. (En corriente alterna -además- frecuencia, factor de potencia, etc.	c.c. y c.a.	$\theta = \frac{dM}{d\theta} I_f I_m \cos\beta$
Inducción	Potencia, energía	c.a.	$\theta = K I_1 I_2 \sin\beta$

2. Conceptos generales de instrumentos analógicos

2.1 Generalidades

Desde el punto de vista de su funcionamiento, un instrumento de medida está constituido por dos sistemas:

1. Sistema traductor, constituido generalmente por un circuito eléctrico en el cual la magnitud eléctrica medida se convierte en otra magnitud (mecánica, por lo general), que actúa sobre el sistema indicador.
2. Sistema indicador, constituido, como hemos dicho anteriormente, por una parte fija y un índice o un haz luminoso, que determinan, sobre una escala graduada, la magnitud eléctrica medida.

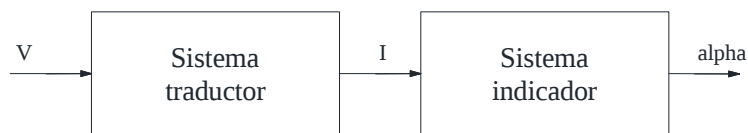


Figura 13: Diagrama en bloques de un instrumento analógico voltímetro

2.2 Cuplas en los instrumentos analógicos

Cualquiera sea el medio usado para producir la desviación del sistema móvil, la cupla resultante de dicha fuerza debe ser equilibrada por la acción de una cupla opuesta (originada en general, por un resorte) que es función de la desviación del sistema.

Bajo la acción de estas cuplas opuestas, el sistema llega a una posición de equilibrio. Simultáneamente debe haber un medio de absorber la energía del movimiento, para que el sistema se detenga en su posición de equilibrio.

Cupla directriz, antagónica o de restitución:

Si debido a la excitación eléctrica o por un medio mecánico cualquiera, el sistema móvil del instrumento es movido o apartado de su posición de cero, un par o cupla mecánica que normalmente se logra con el desarrollo de un resorte en espiral, una cinta en suspensión o una cinta tensa, *contrarresta el par de giro*.

Esta cupla es el producto de la constante del resorte y del ángulo de giro:

$$C_d = k \theta$$

K: constante elástica del resorte

θ : desviación angular del sistema móvil

Cupla de inercia:

Si varía la magnitud a medir y se mueve el sistema móvil, aparecen pares dinámicos de giro que se oponen al movimiento. *Esta cupla es debido a la forma geométrica y peso del sistema móvil* y está dada por la expresión:

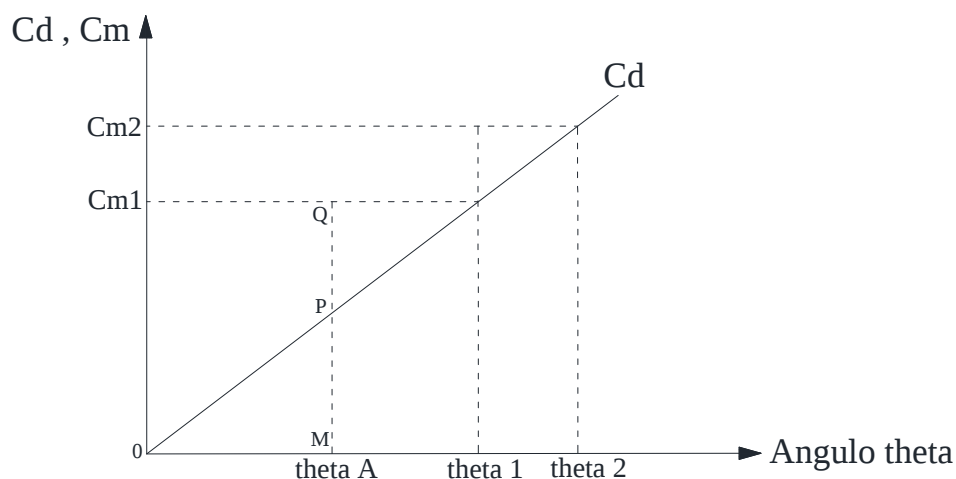
$$C_i = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$d\omega/dt$: aceleración angular

J: Momento de inercia del sistema con respecto a su eje de rotación

ω : velocidad angular

θ : desviación angular del sistema móvil



Si se supone por un instante que la cupla de inercia C_i es nula, tendríamos que al conectar el instrumento, la cupla motora en ese instante ($\theta = 0$) es cero y cero la antagónica. Cuando el rotor comienza a girar describiendo un ángulo θ , con el crecer de θ va aumentando la cupla antagónica (C_d) opuesta a la motora. De este modo, cuando el ángulo descrito por el rotor alcanza un valor (por ejemplo, θ_A) el balance de las cuplas es el siguiente:

- 1) La cupla motora (cuyo valor se supone constante) está representada en la figura por el segmento MQ
- 2) La cupla directriz, de sentido opuesto al de la motora, tiene un valor representado por el segmento MP.
- 3) La cupla actuante está dada por PQ.

Como resultado general el rotor sigue girando en sentido de la motora, pero la cupla actuante es cada vez menor, hasta que, cuando el ángulo llega al valor θ_1 se cumple que:

$$C_{d1} = K\theta = C_{m1}$$

Ahora la cupla motora aumentará el valor C_{m2} y se rompe el equilibrio: el exceso en el sentido de la cupla motora impulsa al rotor en el sentido de ángulos crecientes, hasta el valor final tal que:

$$K\theta_2 = C_{d2} = C_{m2}$$

Se ve que para cada valor de la cupla motora corresponde un valor bien determinado de θ .

Recordar que no se ha considerado en este estudio la cupla de inercia C_i , ni otras cuplas que se verán más adelante.

En el caso que el instrumento tenga resorte en espiral - uno de cuyos extremos es solidario al eje móvil- la cupla directriz vale:

$$C_d = E \frac{a e^3}{12 l} \theta = K \theta$$

E: Módulo de elasticidad del material del resorte

a: ancho de la cinta

e: espesor de la cinta

l: longitud de la cinta

Estos resortes en espiral no deben tener efectos secundarios elásticos, ni envejecimiento y deberán depender poco de la temperatura. El material que se usa es bronce-fosforoso o bien aleaciones especiales de acero.

En el caso de usar suspensión con cinta tensa - se estudiará más adelante- la cupla directriz viene dada por las reacciones elásticas que se desarrollan como consecuencia de la torsión de la cinta de suspensión al actuar la cupla motora.

Cupla de amortiguamiento

Para disminuir la inevitable inercia de las oscilaciones del sistema móvil, cerca de la posición establecida de equilibrio, cada instrumento tiene un dispositivo especial denominado amortiguador.

La cupla amortiguante tiene entonces por objeto, *absorber energía del sistema oscilante y llevarlo rápidamente a su posición de equilibrio*, para que pueda ser leída su indicación.

Los amortiguamientos pueden ser de dos tipos, según su característica predominante:

1. Conservativos

2. Disipativos

El amortiguamiento conservativo es tal que la mayor parte de la energía del sistema móvil es devuelta al circuito por acción regeneradora. Esto sucede, por ejemplo, en el galvanómetro, en el que el frenado debido al aire es solamente una pequeña parte del amortiguamiento total del sistema móvil.

En la mayor parte de los instrumentos eléctricos se usa un amortiguamiento disipativo, que tiene como ventaja sobre el anterior que no depende mayormente de las características del circuito al cual está conectado.

Hay tres clases principales de amortiguamiento disipativo:

Por rozamiento:

b) Fluido

c) Magnético

a) El rozamiento entre dos superficies genera una cupla que es función de la compresión recíproca, pero no de la velocidad. Este rozamiento está siempre presente en los soportes de la parte móvil del instrumento y tiene cierta influencia (aunque pequeña) en la detención del sistema móvil. Por esta razón, el sistema móvil no se detendrá en θ_p sino en $\theta_p \pm \Delta\theta$, siendo $\Delta\theta$ un desplazamiento indeterminado, debido al rozamiento.

Si se supone que solamente hay rozamiento, la amplitud de la oscilación disminuye linealmente, mientras que lo hará según una exponencial si el amortiguamiento es fluido. En el caso real se tiene una combinación de ambos, y el sistema se detiene antes que en cualquiera de los dos casos anteriores, aunque la diferencia es poco notable. En definitiva lo importante es la aparición de indeterminación introducida por $\Delta\theta$.

b) El amortiguamiento fluido es proporcional a la velocidad. En la actualidad se usa únicamente el amortiguamiento por aire, en un dispositivo cerrado. Este generalmente consiste en un aspa móvil liviana de aluminio que se mueve en una cámara cerrada en forma de sector, comprimiendo al

aire, que fluye por sus bordes para equilibrar la presión. Este flujo de aire cesa apenas el aspa deja de moverse.

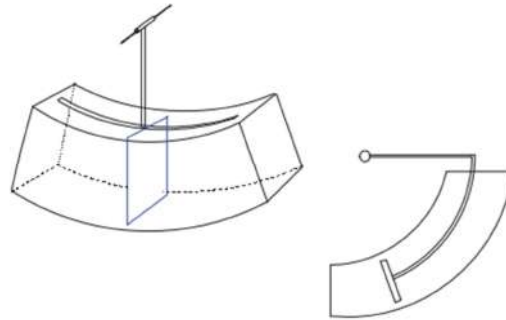


Figura 14: Sistema de amortiguamiento disipativo por rozamiento con fluido (aire)

c) El amortiguamiento magnético también es proporcional a la velocidad. Se produce por las corrientes parásitas inducidas en un disco o sector de aluminio fijado al eje y situado en el entrehierro de un imán permanente cuando el eje gira por la acción de la cupla motora. Estas corrientes reaccionan con el campo del imán y producen un par resultante que se opone al movimiento.

La magnitud aproximada del amortiguamiento se calcula como sigue:

Si B es la densidad de flujo constante - y supuesta uniforme- en el entrehierro y v la velocidad lineal del elemento de disco bajo el entrehierro del imán. En el disco se induce una f.e.m.:

$$e = B \cdot l \cdot v$$

Siendo l la longitud del polo.

Esta f.e.m. produce una corriente:

$$I = \frac{B l v}{R_0}$$

Siendo R_0 la resistencia efectiva del disco.

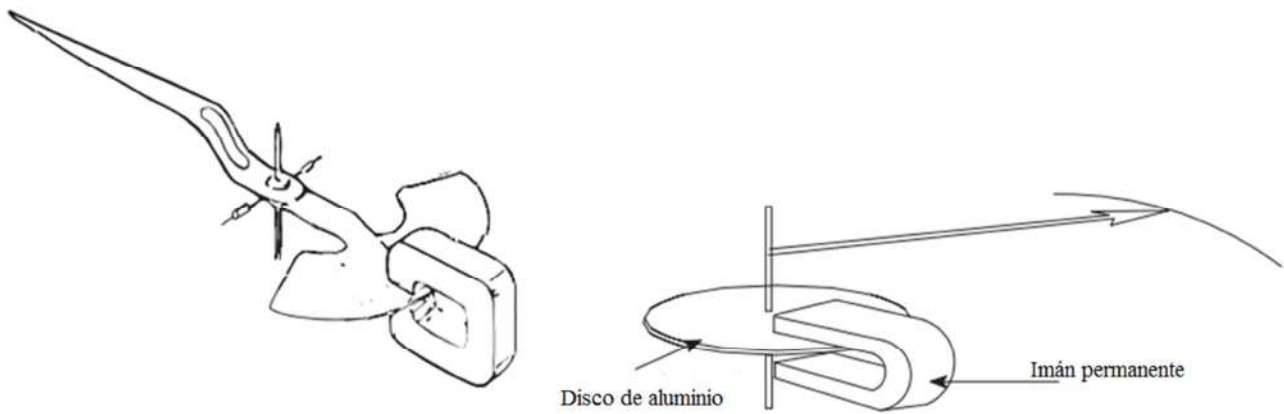


Figura 25: Dos vistas del sistema de amortiguamiento magnético

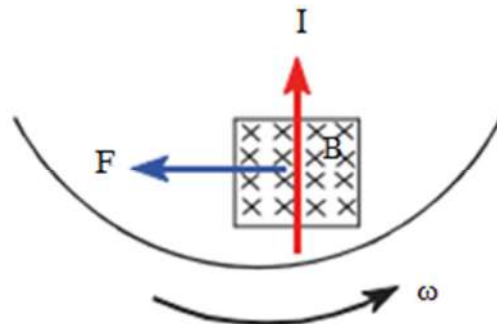


Figura 36: Determinación vectorial del sentido de la fuerza

La reacción entre esta corriente y el campo produce una cupla amortiguante:

$$C_a = F r = B I l r = \frac{B^2 I^2 v}{R_0} r = \frac{B^2 l^2 \omega r^2}{R_0}$$

Siendo "r" el radio y "ω" la velocidad angular. El coeficiente de amortiguamiento será

$$D = \frac{B^2 l^2 r^2}{R_0}$$

Quedando la **cupla amortiguante** como:

$$C_a = F a = \frac{B^2 l^2 a^2 N^2}{R_0} \frac{d\theta}{dt} = D \frac{d\theta}{dt}$$

Sistemas de suspensión:

Ya se ha citado a la cupla de rozamiento, diciendo que la misma se origina en el roce del eje del sistema móvil con su cojinete. También se ha mencionado que su valor es prácticamente independiente de la velocidad angular ω y además se opone al sentido de desplazamiento. Es por ello que se debe afectarla del doble signo: $\pm Cr$

En muchos instrumentos el sistema móvil se monta sobre pivotes, tal como muestra en las figuras. Este montaje puede ser vertical u horizontal. En los instrumentos de laboratorio portátiles, como regla, el sistema móvil está dispuesto verticalmente, mientras que en los de tableros es horizontal. A pesar del reducido peso del sistema móvil, la presión del pivote sobre el cojinete alcanza grandes valores, teniendo en cuenta el pequeñísimo radio de curvatura del pivote (0,01-0,15 mm). Por esta razón los cojinetes de los instrumentos de medidas eléctricas se elaboran al igual que en los relojes. Se usan piedras preciosas (ágata, rubí, zafiro, etc.) y los pivotes de acero de la mejor calidad: acero-plata, al cobalto- tungsteno, etc. Las monturas o engastes para cojinetes, en instrumentos portátiles y de tableros, se ejecutan en forma de tornillos con diámetro de 3 a 3,5 mm., de pequeña rosca o redondos sin filetes.

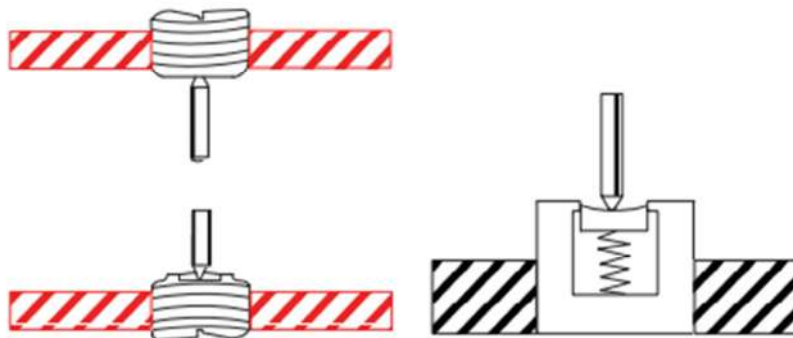


Figura 17: Montajes del sistema móvil sobre pivotes

En algunos instrumentos se utilizan monturas redondas con resortes para amortiguar los golpes.

En los instrumentos de alta sensibilidad esta cupla de rozamiento debe ser prácticamente nula, es por ello que el sistema u órgano móvil está tensado con un hilo (oro o cobre-fósforo) a través de los resortes. Cuando todavía se requiere mayor sensibilidad, el sistema móvil adopta la disposición colgante o suspendida. Este es el sistema generalmente adoptado por el galvanómetro donde una sensibilidad aún mayor se logra por medio un sistema óptico. El indicador es el rayo luminoso, libre de masa e inercia, permitiendo sistemas móviles con pequeños momentos de inercia.

Si se emplea una escala plana y con un ángulo de desviación del sistema móvil, el número total de divisiones responderá a la expresión:

$$d = l \tan(2\alpha)$$

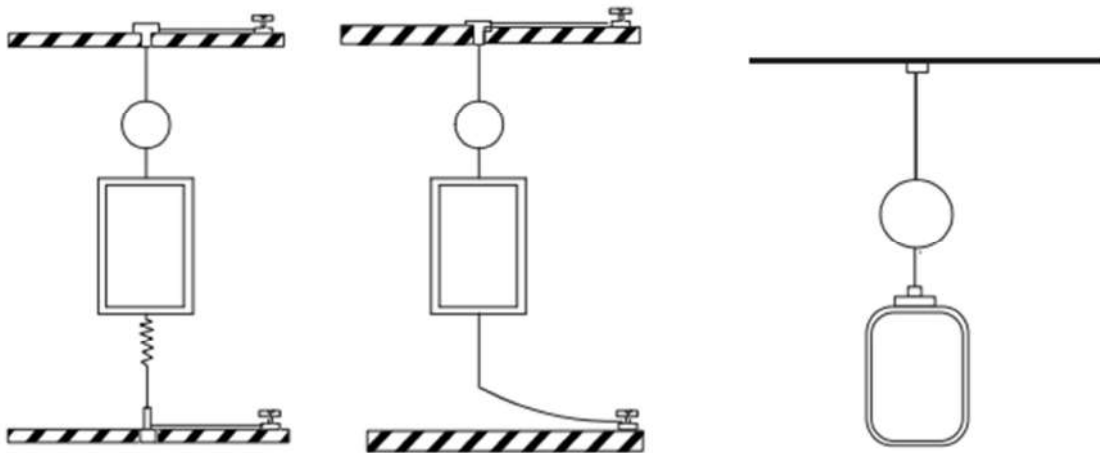


Figura 18: Esquemas de sistemas móviles sin pivote, incorporando espejos de reflexión de un haz de luz para la indicación

2.3 Estudio de la ecuación de movimiento del sistema móvil alrededor del eje

El estudio de la ecuación del movimiento en un instrumento eléctrico indicador, conduce a la obtención de la respuesta del mismo relacionada con los distintos parámetros que lo constituyen en función del tiempo.

Por la simplicidad y conveniencia de su diseño eléctrico y mecánico, el movimiento del sistema indicador de un instrumento eléctrico es generalmente un movimiento de rotación. Se puede considerar que estos dispositivos mecánicos tienen un solo grado de libertad: el de rotación alrededor de su eje.

Planteando la sumatoria de las cuplas actuantes en el eje del sistema móvil se tiene que

$$C_m - C_a - C_d \pm C_r - C_i = 0$$

Reemplazando por sus respectivas expresiones y ordenando términos se llega a que:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + k\theta \pm C_r = C_m$$

Donde la cupla motora C_m constituye la “entrada” del sistema.

Suponiendo despreciable el rozamiento para facilitar el análisis, la ecuación anterior queda:

$$C_m = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + k\theta$$

que resulta la ecuación diferencial general del movimiento de un instrumento.

Es decir que la cupla motora iguala a la suma de las cuplas de inercia, de amortiguamiento y del resorte.

Solución de la ecuación diferencial

Las ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden en coeficientes constantes, se encuentran a menudo en los estudios técnicos.

Resolviendo la ecuación diferencial se desea llegar a la función temporal $\theta(t)$

Esta función es importante ya que permitirá determinar en qué forma se produce el movimiento en los instrumentos de rotación en función del tiempo.

Como es sabido, la solución general de una ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes consiste en la suma de una solución particular θ_p (que representa el estado permanente o estacionario final e independiente del tiempo) y una solución homogénea θ_h (representativa del estado transitorio), que tiende a desaparecer con el tiempo.

$$\theta(t) = \theta_p(t) + \theta_h(t)$$

La solución general debe tener las constantes arbitrarias que indique el orden de la ecuación diferencial (en nuestro caso dos, ya que es de segundo orden, es decir aparece la segunda derivada).

Para hallar la solución homogénea se plantea la ecuación homogénea:

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + K\theta = J \ddot{\theta} + D \dot{\theta} + K \theta = 0$$

Se propone como solución homogénea:

$$\theta_h = A e^{r t}$$

Introduciendo dicha solución propuesta en la ecuación diferencial y operando, se llega a que la respuesta homogénea en función del tiempo es:

$$\theta_h = A e^{r_1 t} + B e^{r_2 t}$$

Donde A, B, r_1 y r_2 son constantes a determinar.

En forma general:

$$r_{1,2} = -\frac{D}{2J} \pm \sqrt{\frac{D^2}{4J^2} - \frac{K}{J}}$$

Es también sabido que el comportamiento del sistema dependerá de si las raíces reales e iguales (respuesta crítica), reales y diferentes (respuesta sobre-amortiguada) o complejas conjugadas (respuesta sub-amortiguada).

$$r_{1,2} = -\frac{D}{2J} \pm \sqrt{\frac{D^2}{4J^2} - \frac{K}{J}} \rightarrow \text{Respuesta sobreamortiguada}$$

$$r_{1,2} = -\frac{D}{2J} \pm j \sqrt{\frac{K}{J} - \frac{D^2}{4J^2}} \rightarrow \text{Respuesta subamortiguada}$$

$$r_{1,2} = -\frac{D}{2J} \rightarrow \text{Respuesta crítica}$$

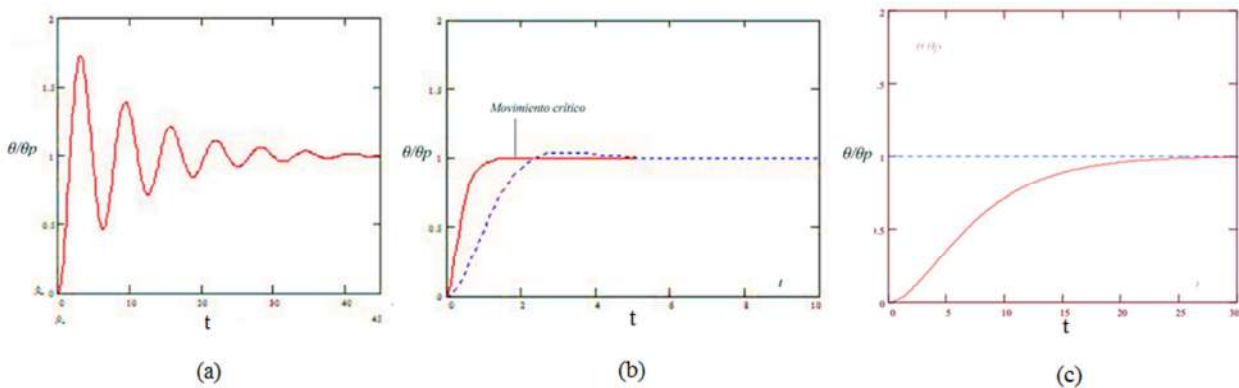


Figura 19: a) Respuesta $\theta(t)$ subamortiguada. b) Respuesta $\theta(t)$ crítica y ligeramente subamortiguada (ideal). c) Respuesta $\theta(t)$ sobreamortiguada

Es evidente que el comportamiento ideal cuando la respuesta es de tipo **ligeramente sub-amortiguada**, por lo que los instrumentos se diseñan de esta forma. Si bien en principio puede suponerse que desde el punto de vista práctico la respuesta crítica sería la más ideal ya que es la que demora menor tiempo en converger al valor final de deflexión para una entrada escalón dada, en realidad no lo es, por cuanto se prefiere siempre que exista una pequeña oscilación para asegurar el operador que el sistema móvil no está frenado por alguna causa externa.

2.4 Elementos constructivos de los instrumentos indicadores de medida

De acuerdo con lo dicho hasta ahora, se puede comprender fácilmente que los instrumentos de medida indicadores constarán de los siguientes elementos constructivos:

1. *Sistemas de medida*, que utilizan los distintos efectos de la corriente eléctrica para mover los elementos indicadores del instrumento de medida.
2. *Escalas*, donde se expresan los valores de las magnitudes eléctricas a medir.
3. *Dispositivos indicadores*, que indican sobre las escalas los valores de estas magnitudes.
4. *Dispositivos antagonistas*, que producen el par antagonista necesario para una buena medición, por frenado de los dispositivos indicadores.
5. *Dispositivos amortiguadores*, que evitan las oscilaciones de los dispositivos indicadores.
6. *Dispositivos correctores*, para , ajustar la posición del cero en la escala de medida.
7. *Dispositivos de apoyo*, para apoyar y suspender los dispositivos indicadores y otros órganos móviles.

2.5 Clasificación de instrumentos analógicos

Existen seis grandes grupos de sistemas de medida que, esencialmente, se diferencian por el principio en que se basa su funcionamiento:

Instrumento IPBM

1. Principio de funcionamiento: acción mutua entre los campos magnéticos de un imán permanente y una bobina.
2. Clases típicas: 0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5, 2,5, 5.
3. Variantes:
 - a) de bobina móvil. Para galvanómetros, amperímetros, voltímetros y ohmímetros de corriente continua;
 - b) de imán móvil. Para amperímetros, voltímetros y galvanómetros, de corriente continua;
 - c) con rectificador. Para amperímetros y voltímetros de corriente continua y alterna;

d) termoelectrónicos (con termoelemento). Para amperímetros y voltímetros de corriente continua y de corriente alterna;

e) diferenciales (logómetros). Para megohmmetros, ohímetros y frecuencímetros.

Sistema Hierro Móvil

1. Principio de funcionamiento: acción mutua entre los campos magnéticos de una bobina fija y un núcleo móvil.

2. Clases típicas: 1, 1,5, 2,5, 5.

3. Variantes:

a) mono polinúcleos. Para amperímetros y voltímetros de corriente continua y de corriente alterna;

b) diferenciales (logómetros). Para ohímetros, frecuencímetros y sincronoscopios;

c) de vibración. Para frecuencímetros de lengüetas.

Sistema electrodinámico

1. Principio de funcionamiento: acción mutua entre los campos magnéticos de una bobina fija y una bobina móvil.

2. Clases típicas: 0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5.

3. Variantes:

a) sin hierro. Para amperímetros, voltímetros y wattímetros de corriente continua y de corriente alterna;

b) ferrodinámicos. Para amperímetros, voltímetro y wattímetro de corriente continua y de corriente alterna;

c) diferenciales (logómetros). Para ohímetros y frecuencímetros.

Sistema de inducción

1. Principio de funcionamiento: producción de corrientes parásitas o de Foucault.
2. Clases típicas: 1,5, 2, 5.
3. Variantes:
 - a) simples. Para amperímetros, voltímetros y contadores de energía eléctrica, de corriente alterna;
 - b) diferenciales (logómetros). Para cofímetros y frecuencímetros

Sistema electrostático

1. Principio de funcionamiento. Efectos electrostáticos, de cargas eléctricas en reposo.
2. Clases típicas: 1, 1,5, 2,5, 5.
3. Variantes: se emplean solamente para voltímetros de corriente continua y de corriente alterna.

Sistema electrotérmico

1. Principio de funcionamiento. Dilatación de un elemento metálico originado por el calor debido al efecto Joule.
2. Calidades: 2,5, 5.
3. Variantes:
 - a) de alambre caliente. Para amperímetros y voltímetros, de corriente continua y de corriente alterna;
 - b) bimetalicos. Para amperímetros y voltímetros, de corriente continua y de corriente alterna.

2.6 Instrumento Imán Permanente y Bobina Móvil (IPBM)

Son los llamados comúnmente de "bobina móvil" o "tipo D'Arsonval" y son los más utilizados en el campo de la corriente continua. *Se basan en la acción motriz ejercida por el campo de un imán permanente sobre una bobina recorrida por una corriente continua.*

Básicamente el instrumento está constituido por dos sistemas: uno fijo (el circuito magnético) y otro móvil (el cuadro de la bobina).

El cuadro móvil puede estar sustentado por: pivotes, hilo o bien hilo tensado.

Los resortes de bronce fosforoso sirven para llevar la corriente a la bobina móvil y crear la cupla directriz que es proporcional al ángulo de rotación del cuadro.

Los lados activos de la bobina (los paralelos al eje) se encuentran en el entrehierro existente, entre las expansiones polares de un imán permanente y un tambor cilíndrico fijo de hierro dulce. Las superficies enfrentadas de las expansiones polares y del núcleo son cilíndricas, de manera tal de obtener un campo de inducción uniforme y de dirección radial en toda la zona en el cual se puede mover la bobina.

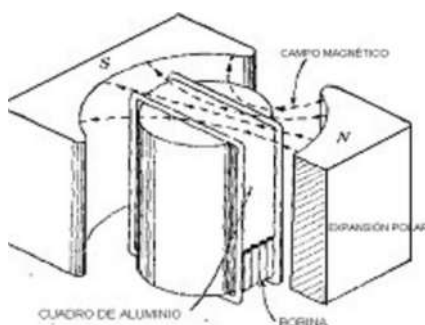


Figura 20: Partes de un instrumento IPBM

Circuito magnético

El circuito magnético del sistema D'Arsonval está constituido por:

- Imán permanente (1)
- Expansiones polares de hierro dulce (2)
- Núcleo de hierro dulce (3)
- Derivador magnético de hierro dulce (4).

(Los números entre paréntesis corresponden con los de la figura 2).

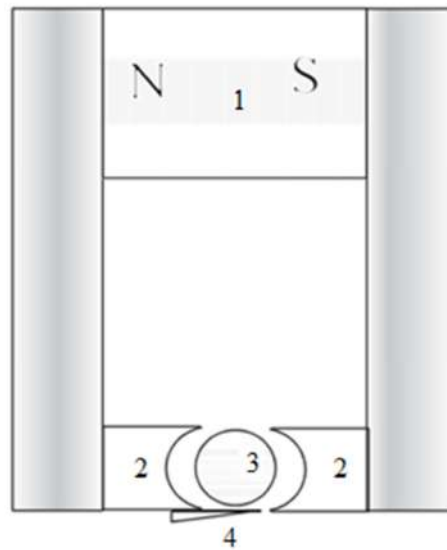


Figura 21: Circuito magnético de instrumento IPBM

Téngase presente que todo el circuito magnético es fijo y su misión es la de crear en un entrehierro reducido un flujo radial e inducción constante a fin de obtener una distribución uniforme de escala.

El derivador magnético por el que circula parte del flujo disponible, restándolo del entre hierro en una fracción regulable a voluntad por adecuado desplazamiento, permite llevar la inducción B a un valor perfectamente determinado a los fines de lograr en la fábrica que con la corriente del alcance, la aguja coincida con la última división de la escala.

También sirve para compensar el eventual debilitamiento del imán a través del tiempo: si el derivador se aleja, es menor el flujo que por él deriva, con lo que se refuerza el flujo del entrehierro, restituyéndolo al valor original.

Ventajas del instrumento de IPBM

El instrumento de imán permanente y bobina móvil tiene las siguientes cualidades:

- Elevada sensibilidad
- Consumo bajo
- Alto valor de la cifra de mérito (relación entre la cupla motora y el peso del rotor)
- Escala uniforme y con posibilidades de hacerla extendida (hasta 300)
- Poca influencia de los campos magnéticos externos
- Posibilidades de modificar las escalas, ampliar fácilmente el rango de medida

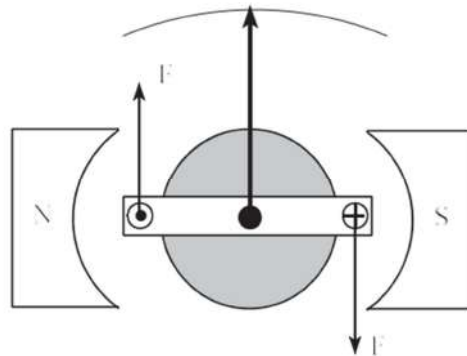


Figura 224: Esquema de generación de fuerzas en un instrumento IPBM a partir de la circulación de corriente por la bobina y del campo magnético constante B impuesto por el imán permanente.

Ley de respuesta

Para deducir la ley de respuesta del instrumento, consideremos una bobina de N espiras. Al circular una corriente I por el cuadro, aparece una fuerza actuante sobre los lados activos de la bobina:

$$F = B \cdot N \cdot I \cdot l$$

(siendo l lado activo de la bobina).

Si a es el ancho de la bobina, la cupla motriz será:

$$C_m = B N I l a$$

De esta expresión se denomina al producto $B \cdot N \cdot l \cdot a$ como “constante motora” o “ G ”.

Como ya se explicó en el estudio de las cuplas, una vez superado el transitorio el equilibrio final se logra cuando:

$$C_m = C_d$$

$$G I = K \theta$$

$$\rightarrow \theta = \frac{G I}{K}$$

A la relación G/K se la llama “sensibilidad instrumental” o “ S ”

$$\theta = S_i I$$

$$\alpha = S_i \cdot I$$

Esta variable dice que ante la presencia de un campo magnético radial y uniforme, la bobina móvil reacciona provocando una cupla y por ende una deflexión que es directamente proporcional a la corriente que circula por ella. Esta conclusión implica además que el instrumento posee una polaridad identificada en los bornes, (cuando opera con corriente continua).

Si intencional o accidentalmente se invierte la polaridad, es evidente que la cupla cambiará de sentido, sin poder efectuar lectura alguna si el instrumento no posee escala con cero al centro.

Aplicaciones del sistema IPBM

Amperímetros

El instrumento de imán permanente y bobina móvil es muy sensible a la corriente. Esta corriente entra y sale del cuadro móvil por los resortes que cumplen la misión de cupla antagónica (espirales o cinta tensada).

Con intensidades del orden de los 15 a los 20 mA estos resortes alcanzan la temperatura máxima admisible. Por esta razón ese es el valor máximo de la intensidad que puede medirse con un aparato así constituido y que se llama miliamperímetro. Si el alcance es del orden de los microamperes, el nombre que recibe es microamperímetro.

Para alcances más altos se logran con derivadores o shunts dispuestos de modo tal que por la bobina móvil circule el valor nominal o alcance del instrumento.

Se verá a continuación la deducción de como calcular el valor de la resistencia derivadora para una amperímetro de alcance y resistencia interna conocidos. Del esquema de la figura, la tensión en bornes del instrumento es:

$$V_{AB} = R_s I_s = R_a I_a$$

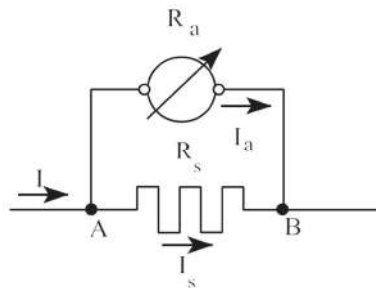


Figura 53: Esquema de un amperímetro implementado a partir de un elemento móvil IPBM

Despejando el valor de R_s :

$$R_s = R_a \frac{I_a}{I - I_a}$$

Denominando con n al poder multiplicador del shunt a la relación entre la corriente de línea y corriente a fondo de escala (alcance propiamente dicho del instrumento sin derivador): $n = \frac{I}{I_a}$

Voltímetros

El instrumento de imán permanente y bobina móvil como medidor de corriente queda definido por su alcance y resistencia interna, por ejemplo $50 \mu A$ y 5.000Ω .

El producto de estos dos valores definen el alcance como voltímetro para el ejemplo, se transforma en un milivoltímetro de $250 mV$ a fondo de escala. Para mayores alcances se disponen de resistencias adicionales o multiplicadoras en serie con el instrumento, de manera que el nuevo alcance viene dado por la expresión:

$$V = I (R_a + R_m)$$

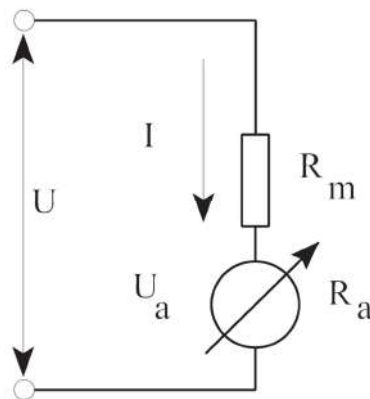


Figura 64: Voltímetro implementado con sistema móvil IPBM

Para determinar R_m para un alcance dado y conociendo los datos R_a e I se plantean las ecuaciones:

$$V = V_0 + I R_m = V_0 + V_0 \frac{R_m}{R_a}$$

El poder multiplicador de la resistencia adicional queda definido por :

$$m = \frac{V}{V_0}$$

$$m = 1 + \frac{R_m}{R_a} \rightarrow R_m = R_a(m - 1)$$

La resistencia total $R_m + R_a$ define a R_v la resistencia interna total del instrumento. El cociente entre R_v y U determina una característica importante que diferencia al instrumento con otros de la misma clase. Esta característica es a menudo llamada impropriamente "sensibilidad del voltímetro Ω/V ". Los valores más comunes son:

$$1000 - 5000 - 10.000 - 25.000 - 50.000 \Omega/V$$

Voltímetro para corriente alterna

Si un instrumento de imán permanente y bobina móvil se conecta a una tensión de corriente alterna, la bobina móvil no provocará ninguna lectura detectable y sólo se observará una vibración del índice para frecuencias bajas. Para evitar esto es necesario modificar la forma de onda.

El elemento convertidor (B) no es otra cosa que un diodo en serie con la entrada del instrumento.

Suponiendo que se trata de rectificador (diodo) ideal y que al conjunto de instrumento-rectificador lo sometemos a una señal de la forma:

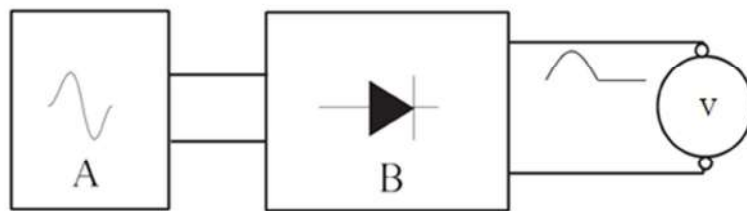


Figura 75: Sistema de rectificación en serie (B) con una fuente alterna de tensión AC (A) para la medición de la tensión con un voltímetro IPBM

$$v(t) = V_0 \sin \omega t$$

$$i(t) = I_0 \sin \omega t$$

Entonces la corriente medida por el instrumento será el valor medio de la señal rectificada en media onda, o sea:

$$\rightarrow I_{medida} = \bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_0 \sin \omega t d\omega t = \frac{I_0}{\pi}$$

Para una señal senoidal como se observa, al rectificar en media onda, ahora el instrumento acusará el valor medio de dicha señal. Para lograr que indique el valor RMS (eficaz) de la señal original sin rectificar (recordar que originalmente interesa medir el valor eficaz de una tensión o corriente alterna, no su valor medio), se multiplica dicho valor hallado por una constante denominada factor de forma y el instrumento indicará finalmente el valor eficaz de la señal original.

Aplicación de un elemento Hall para la medición de corriente

Si se indica con I el valor de la corriente continua que circula por la línea -y que se desea medir-, con N el número de espiras (para este caso igual a uno), con μ la permeabilidad en el entrehierro y con B el valor de la inducción en entrehierro, se puede escribir

$$B = \mu \cdot N \cdot I$$

Por lo que la tensión generada será:

$$e = K I$$

Siendo

$$K = \frac{K_l K_h \mu_0 N}{d} i$$

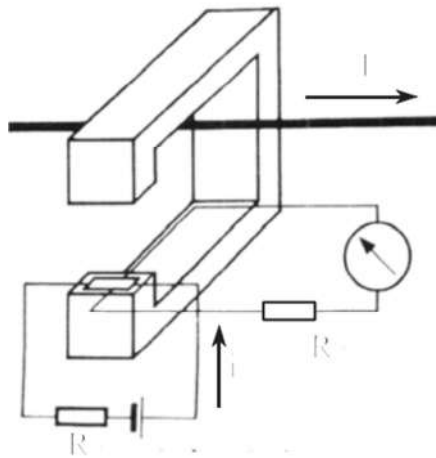


Figura 86: Combinación de efecto Hall y sistema IPBM para la medición de corriente

Las resistencias R_1 y R_2 colocadas en serie con el circuito de control y de salida respectivamente, tienen la misión de hacer al dispositivo prácticamente independiente de la temperatura.

Tratándose del funcionamiento en corriente continua, el circuito magnético no debe ser necesariamente laminado, y puede estar constituido por un bloque fundido de material magnético.

Desde el punto de vista práctico el método ofrece óptimos resultados y particularmente conveniente en el campo de las mediciones de elevadas intensidades de corriente o bien, cuando el circuito está sometido a tensiones altas. En el primer caso, el dispositivo actúa como una pinza amperométrica de las utilizadas en corriente alterna (y que algunas de reciente tecnología incluyen los cristales Hall para la medición en continua) presentando la ventaja de no interrumpir el circuito ni provocar errores de inserción. En el segundo caso la ventaja reside en mantener al operador alejado del conductor en tensión, eliminando así el peligro por contacto accidental.

Existen otras aplicaciones del elemento Hall, para la medición de tensión y de potencia que exceden al alcance de este apunte.

Análisis de los errores sistemáticos en instrumentos de IPBM

Las causas que dan origen a este tipo de errores pueden resumirse en las siguientes:

- 1) Variación de temperatura.
- 2) Inestabilidad del imán permanente.
- 3) Aparición de efectos termoeléctricos.

Variación de la temperatura

La mayoría de los instrumentos indicadores tienen como temperatura de referencia, (a la cual fueron calibrados), la llamada temperatura de calibración 20°C , 25°C , para otros valores la indicación se verá afectada por la incidencia en las siguientes partes constitutivas del aparato:

- a.- Modificación de la constante motora (G).-
- b.- Modificación de la constante elástica (Kr).-
- c.- Variación de la resistencia de la bobina móvil (Ra).-
- a.- Modificación de la constante motora G

a. Modificación de la constante motora (G).

Esta es producida en razón de que el aumento de temperatura desmagnetiza el imán permanente reduciendo su flujo y consecuentemente la pérdida de inducción en el entrehierro hace que la constante motora disminuya proporcionalmente. En forma experimental se ha logrado determinar que la reducción del par motor es lineal y con coeficiente porcentual de -0.02% por cada grado de variación positiva de la temperatura.

Este valor porcentual se obtiene considerando la diferencia de deflexión referida a la obtenida para la temperatura de referencia.

b. Modificación de la constante elástica K

Los muelles en espiral por su característica metálica, si son sometidos al aumento de temperatura reducen su elasticidad en un valor aproximadamente constante en $+0.04\%/^{\circ}\text{C}$ -para un determinado rango de temperatura-. Esta pérdida de elasticidad es temporal ya que desaparecida la causa el espiral retoma su características originales.

c. Variación de la resistencia de la bobina móvil

Si se analiza el caso del amperímetro, es decir el cuadro móvil en paralelo con la resistencia shunt. Siempre los conductores de línea deben conectarse directamente al shunt y los que unen al instrumento deben ser de dimensiones lo suficientemente cortas para no aumentar la resistencia propia del cuadro móvil, provocando un error de inserción.

En condiciones ideales de funcionamiento debe cumplirse para las dos ramas R_s y R_a el mismo coeficiente de temperatura y la misma temperatura de funcionamiento.

Para que las dos ramas tengan el mismo coeficiente de temperatura (si la resistencia shunt es de manganina, por ejemplo) se compensa la variación de resistencias agregando en serie con la bobina un resistor de manganina de resistencia r .

Si se analiza con esta disposición la variación porcentual de resistencia:

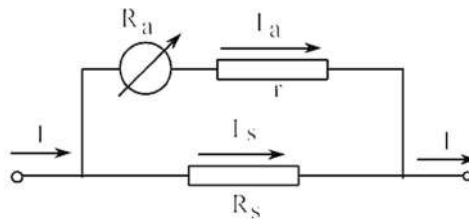


Figura 97: Amperímetro IPBM y variación de los valores de resistencia con la temperatura

$$R = R_a + r$$

Cuando se produce un aumento de temperatura la R resulta:

$$R' = R_a(1 + \alpha_{cu} \Delta t) + r(1 + \alpha_{Mn} \Delta t)$$

Para una temperatura de 20 C:

$$\alpha_{cu} = 4 \cdot 10^{-3} \Omega/^{\circ}C \quad y \quad \alpha_{Mn} = 6 \cdot 10^{-6} \Omega/^{\circ}C$$

Como se observa esta variación es tan poco perceptible frente a la del cobre que la última expresión puede simplificarse :

$$R' = R_a + R_a \alpha_{cu} \Delta t + r_{Mn}$$

Con lo que la variación absoluta de resistencia será:

$$\Delta R = R' - R = R_a \alpha_{cu} \Delta t$$

Y en forma relativa:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_a}{R_a + r} \alpha_{cu} \Delta t$$

Si se elige el valor de la resistencia adicional $r = 9 \cdot R_a$, entonces la variación de resistencia se reduce a un 10%.

Debe tenerse presente que para mantener el mismo poder multiplicador n , habrá que aumentar 10 veces el valor de R_s ocasionando un consumo diez veces mayor:

$$n = \frac{R_a + 9R_a}{10R_s}$$

El otro inconveniente es el aumento con esta disposición del error sistemático de inserción al intercalar en la línea una resistencia que perturbara al circuito. En la práctica existe pues, una solución de compromiso adoptándose un valor de r aproximadamente igual a cinco veces el valor de la resistencia del cuadro móvil.

Ahora bien antes de analizar esta solución, el efecto total dará una deflexión en defecto por grado centígrado (sumando la variación de la constante elástica K_r , la de la constante motora G y la de la resistencia interna R_a):

$$\Delta K + \Delta G + \Delta r_a = \Delta t$$

$$(+0.04 \% / ^\circ\text{C}) - (0.02 \% / ^\circ\text{C}) - (0.4 \% / ^\circ\text{C}) = \mathbf{-0.38 \% / ^\circ\text{C}}$$

Si en cambio se opta por la solución antes citada y adoptando $r = 9 \cdot R_a$ el coeficiente de temperatura pasa a $0.04 \% / ^\circ\text{C}$, por lo que la incidencia total se reduce a :

$$(+0.04 \% / ^\circ\text{C}) - (0.02\%/^\circ\text{C}) - (0.04\%/^\circ\text{C}) = \mathbf{-0.02 \% / ^\circ\text{C}}$$

2. Estabilidad del imán

La estabilidad del imán permanente depende entre otras cosas del diseño y tratamiento para su envejecimiento -sometiéndolo a temperaturas de 100°C durante horas-. A pesar de esto el imán con el correr del tiempo sufre una lenta desmagnetización que se traduce en una pérdida de la exactitud del instrumento. Una forma de corregir el problema es actuando sobre el shunt magnético.

3.-Influencia de los campos externos

Si bien la incidencia de los campos extraños no es tan importante como en instrumentos de otro tipo de funcionamiento, la indicación se ve afectada más aun cuando el aparato no posee blindaje. En este caso el mayor error es producido cuando la dirección del campo exterior resulta normal a la dirección de la línea de fuerza simétrica en el entrehierro.

4.- Aparición de efectos termoelectrónicos

Esta influencia aparece cuando se efectúan conexiones entre elementos constitutivos de distinto material -como por ejemplo cuando se conecta el cuadro de la bobina móvil, de cobre, con una resistencia adicional de manganina-. Esto trae aparejado los mismos efectos (Seebeck) ya analizados en los instrumentos de IPBM con termocupla. La aparición de esta f.e.m. espurias provocan perturbaciones en las indicaciones tanto más importante cuanto más sensible sea el instrumento.

2.7 Instrumentos electromagnéticos (HIERRO MOVIL)

El instrumento de imán permanente y bobina móvil sigue una ley de deflexión lineal con la corriente. Esto, como se ha señalado tiene sus desventajas cuando se lo utiliza en corriente alterna (con rectificador) pues la escala está calibrada para medir señales con factor de forma 1.11 y por lo tanto cuando se mide ondas no sinusoidales las lecturas adolecen de un error sistemático, tanto mayor cuanto más lejos esté del factor de forma de calibración.

Los instrumentos de hierro móvil como los electrodinámicos son sumamente útiles para medir valores eficaces de señales de distintas formas de ondas.

Características constructivas

Los instrumentos a hierro móvil, también llamados ferromagnéticos, deflexionan por la acción tanto de la corriente continua, como de la corriente alterna.

Para comprender el principio recurrimos a la figura 1, que representa el croquis de un instrumento a hierro móvil del tipo llamado de atracción.

La corriente que se desea medir pasa por una bobina fija que genera un campo magnético. Dentro de dicho campo hay una pieza metálica llamada hierro móvil, sujeta en forma asimétrica al eje de giro

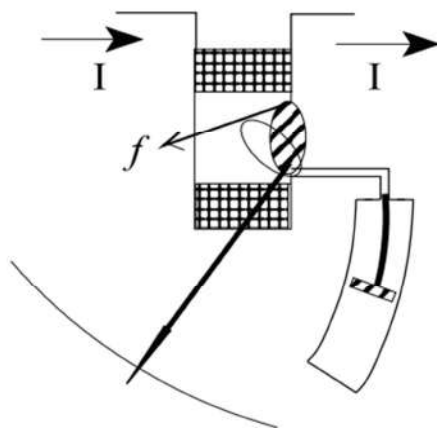


Figura 108: Esquema de instrumento hierro móvil

Completan el instrumento un resorte para generar la cupla antagónica, la aguja y la correspondiente escala.

Si se aplica corriente se produce en el interior de la bobina un campo magnético de intensidad H , cuyo sentido se determinará fácilmente con ayuda de la regla del tirabuzón. Los sentidos de las corrientes marcados en la representación, corresponden a un sentido de arrollamiento arbitrariamente adoptado en el dibujo. Por efecto del campo magnético, el hierro sometido a su influencia se magnetiza, es decir, se imana y se comporta como una pequeña brújula. Al ser así, se orienta dentro del campo, también como lo haría una brújula. Como está sujeta a un eje de giro, la fuerza " f " aplicada en el extremo, provoca una cupla motora C del sentido ubicado en el dibujo.

En la figura, se han dibujado tres estados de la misma configuración anterior. La parte (a) corresponde al estado sin corriente. No hay campo magnético, y el hierro móvil permanece en su posición de reposo, que para nuestro ejemplo es la vertical. Si se aplica una corriente entrante por la izquierda, el campo H va de izquierda a derecha, el hierro móvil se magnetiza con su polo "sud" a la izquierda y "norte" a la derecha produciéndose el giro.

En la parte (b) de la figura que se muestra al hierro móvil en su posición de máxima deflexión.

Este tipo de aparato, tiene una posición de máximo giro o máxima deflexión que no puede sobrepasar, dado que si el hierro móvil está horizontal, por más que se aumente la corriente, es decir, el campo magnético, el hierro no puede orientarse más. Esto hace que los aparatos a hierro móvil sean, en general, bastante robustos, porque haciendo la bobina con capacidad térmica suficiente (disipación) como para resistir por un tiempo prudencial una corriente mayor que la nominal, la parte mecánica no sufre modificaciones ni mayores daños.

Los aparatos de este tipo son bastante resistentes a las sobrecargas de corriente, por lo menos comparativamente con los de otro tipo. En la parte (c) de la misma figura, tenemos aplicada una corriente de sentido contrario, y el campo H cambia de sentido.

La imantación de la pieza móvil cambia de sentido, en consecuencia se invierte, pero debe notarse que de todos modos el resultado es el mismo, porque la parte ferromagnética siempre trata de orientarse conforme la dirección del campo con independencia del sentido.

Esta explicación cualitativa permite ver que, estos instrumentos sirven para ambas corrientes, dado que la corriente alterna comporta una inversión del sentido de circulación, que por la inercia de la pieza móvil no alcanza a cambiar la posición hasta el momento que toma el valor contrario.

Dentro de la misma clasificación del instrumento vemos en las figuras, en la que se han dibujado esquemas de un aparato a hierro móvil del tipo denominado repulsión.

Dentro de una bobina casi cilíndrica están colocadas dos piezas metálicas, una sujeta a la cara interior de la misma y otra sujeta al eje de giro, llamada respectivamente hierro fijo y hierro móvil.

El campo provocado por la corriente de la bobina de valor H , imana a las dos piezas metálicas con polaridades concordantes en los dos extremos, lo que hace que estas partes se comporten como dos imanes enfrentados con polos de igual nombre.

Estos componentes se rechazan, como es bien sabido, con una fuerza " f " provocándose un giro del eje.

Estos aparatos también tienen su resorte antagónico y su sistema amortiguador.

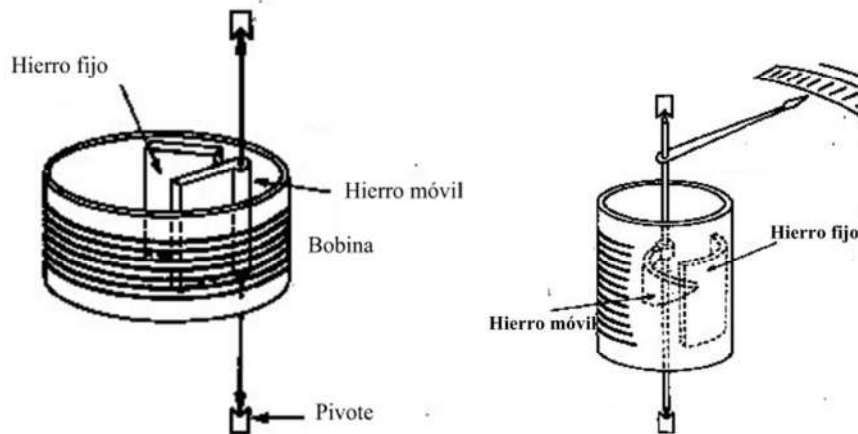


Figura 29: Detalle sistema hierro móvil

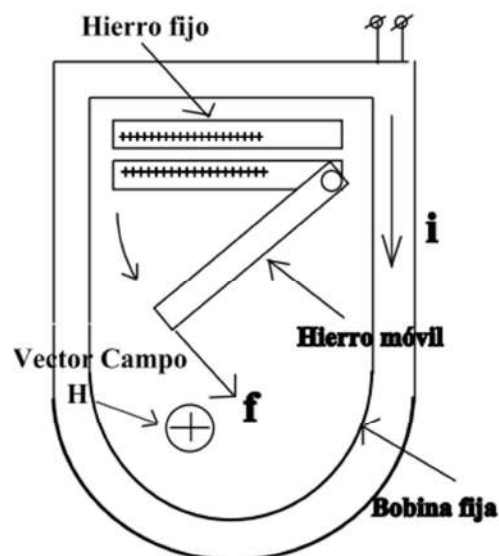


Figura 11: Detalle funcionamiento sistema hierro móvil por repulsión

Ley de respuesta

Una forma de obtener la ley de respuesta es a partir de la energía almacenada en el campo magnético de la bobina excitadora. Como se sabe, esta expresión es la siguiente:

$$W = \frac{1}{2} L i^2$$

Siendo:

W: Energía electromagnética (Joule).

L: Coeficiente de autoinducción de la bobina con el hierro (Henry).

i: corriente excitadora (ampere).

Debe notarse que el coeficiente de autoinducción L no es una magnitud constante, ya que al variar la posición relativa de los dos hierros - el fijo y el móvil - (caso del instrumento de repulsión), se está modificando la configuración general del sistema.

Se sabe además que la variación de energía electromagnética con respecto al grado de libertad (ángulo de rotación θ) del sistema móvil, da origen al par motor instantáneo, es decir:

$$C_m = \frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$

Siempre y cuando la inductancia L sea independiente de i.

Esta cupla motora debe ser equilibrada por la cupla antagónica, que la efectúa el resorte y que vale:

$$C_d = K \theta$$

Igualando tendremos en el momento del equilibrio:

$$C_m = C_d$$

Despejando la deflexión θ :

$$\theta = \frac{1}{2 K} \frac{dL}{d\theta} i^2$$

Esta expresión dice que la ley de respuesta del instrumento a hierro móvil es proporcional a $dL/d\theta$ y al cuadrado de la corriente.

Respuesta en corriente continua

Reemplazando en la expresión anterior la corriente $i = I$, las acotaciones precedentes no cambian.

La primera acotación que se puede hacer es que a diferencia del IPBM aquí no es necesario respetar la polaridad de conexión.

La segunda que la ecuación es representativa de la ley de respuesta del instrumento y no necesariamente de la ley de distribución de escala, puesto que desde el punto de vista constructivo se tiende a la obtención de una escala uniforme (aunque con algunas limitaciones).

Como se sabe, el tipo de escala cuadrática, limita el margen de la corriente en el que puede ser utilizado el instrumento, con un error de lectura muy grande para valores bajos. Por ello es que se trata de compensar la des-uniformidad de la escala, mediante algún artificio constructivo. En los instrumentos de repulsión eso se consigue con formas geométricas perfectamente definidas y calculadas de los hierros fijos y móvil como así también de las separaciones entre sí, en las distintas posiciones. Si se quisiera una escala lineal, el factor $dL/d\theta$ deberá ser proporcional a:

$$\frac{dL}{d\theta} \approx \frac{1}{i} \approx \frac{1}{\theta}$$

Luego

$$dL \approx \frac{d\theta}{\theta} \rightarrow L = \ln \theta + C$$

Lo que indica que la uniformidad de la escala requiere un brusco aumento de L en su primera parte y un aumento más suave en la parte final. Esta condición se puede obtener por un diseño adecuado salvo en las proximidades del cero (donde aproximadamente en el 10% de la escala inicial no se puede efectuar lecturas)

Ley de respuesta en corriente alterna

Si la corriente que circula por la bobina es alterna:

$$i = I_0 \sin \omega t$$

$$\rightarrow \theta = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} I_0^2 \sin^2 \omega t$$

$$\text{Como } \sin^2 \omega t = 0.5 * (1 - \cos^2 \omega t)$$

$$\rightarrow \theta = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} \frac{I_0^2}{2} - \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} \frac{I_0^2}{2} \cos 2\omega t$$

Si la frecuencia fuera lo suficientemente baja es posible observar una oscilación del índice alrededor del valor medio. Pero el instrumento se diseña de tal modo que la frecuencia angular ω_0 es mucho menor que la frecuencia más baja medida. Por lo tanto toda expresión que responda a ω (o múltiplos de ω) no será detectada por el aparato.

Por lo dicho la última expresión se reduce:

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} I_{ef}^2$$

Es decir, que el instrumento a hierro móvil excitado con corriente alterna sinusoidal responde al cuadrado del valor eficaz.

Al principio de este capítulo se ha aclarado que el instrumento a hierro móvil como el electrodinámico miden valores eficaces de ondas no sinusoidales. Para que este concepto quede claro supongamos que la corriente a medir tiene la forma siguiente:

Es decir, que la onda deformada está compuesta por la suma de los siguientes términos:

$$i = I_{01} \sin \omega t + I_{02} \sin 2\omega t + I_{03} \sin 3\omega t$$

$$I_{01} = 2 A, \quad I_{02} = 1 A, \quad I_{03} = 0.4 A$$

Elevando al cuadrado la expresión anterior y rescatando únicamente aquellos valores que tendrán independencia de la frecuencia resultará:

$$i^2 = \frac{I_{01}^2}{2} + \frac{I_{02}^2}{2} + \frac{I_{03}^2}{2}$$

Lo cual indica que el instrumento medirá la suma de los cuadrados de los valores eficaces de cada una de las componentes de la onda no sinusoidal. En definitiva mide el valor eficaz de la onda deformada.

Aplicaciones

Amperímetro y voltímetros

Los instrumentos de hierro móvil son esencialmente amperímetros. Se los construye generalmente para un solo alcance, variando de acuerdo con el número de espiras de la bobina, de modo de obtener los amper-vueltas (NI) necesarios. Un instrumento de hierro móvil típico requiere unos 200 a 300 Av.

$$N.I = 200 \text{ a } 300 \text{ Av.}$$

Para llegar el índice al final de la escala, por lo tanto, amperímetros de alcance igual a 300 A. tendrán su bobina conformada por una única espira de cobre, es decir, un solo conductor de gran sección. Un miliamperímetro de alcance 100 mA necesitará de 2000 a 3000 vueltas de conductor fino.

Pero para corrientes muy pequeñas aparece una limitación: la impedancia de la bobina se vuelve tan grande que al introducir este miliamperímetro en el circuito a medir, lo modifica sustancialmente, es decir, se comete un gran error de inserción, lo que los hace inadecuados para muchas aplicaciones.

Generalmente no se construyen miliamperímetros con alcances menores a 100 mA por ese problema.

En corriente alterna si se quiere medir corrientes elevadas se utilizan amperímetros de alcance 5 A con transformadores de medida, y de esas manera se puede lograr medir corrientes hasta 10.000 A.

Con estos instrumentos no se puede ni se debe usar shunts para cambiar el alcance. Ello se debe a que como el consumo del aparato de medida es de valor alto en comparación con los de bobina móvil, y como sabemos que la potencia en el sistema "shunt-instrumento" esta dada por los valores de consumo serían inaceptables. Los amperímetros se construyen de 100 mA hasta 100 A, y su uso generalmente son de tablero, aunque se fabrican actualmente instrumentos de laboratorio de clase patrón.

Los voltímetros consisten en un miliamperímetro puesto en serie con una resistencia no inductiva de manganina. Su valor tiene que ser tal que la caída en la bobina sea una pequeña parte de la caída total, de manera de poder minimizar los errores de temperatura (que varía la resistencia de la bobina) y de frecuencia (por la variación de la reactancia).

Generalmente se hace la resistencia de manganina mayor a 10 veces la resistencia de la bobina.

Los instrumentos de hierro móvil tienen un consumo mayor de potencia que los de bobinas móvil de imán permanente (ya que la efectividad en la producción de la cupla motora es menor). Por ejemplo, un voltímetro típico de tablero de IPBM de 150 V. para corriente continua, tiene un consumo aproximado a la unidad de watt, mientras que uno de hierro móvil de similares características puede llegar a requerir más de cinco veces esa potencia.

La gran difusión de este tipo de instrumento proviene de su simplicidad constructiva (que se traduce en un menor costo), de su solidez y de su gran capacidad de sobrecarga. Esto último debido a que los resortes no son recorridos por la corriente, y por lo tanto no están expuestos a recalentamiento o destrucción por una sobrecarga accidental.

La bobina tiene una constante de tiempo elevada y puede soportar sin dañarse, fuertes sobrecargas momentáneas (aún 100 veces el valor nominal, durante fracciones de segundos).

El sistema móvil no resulta dañado por las sobrecargas, ya que no está recorrido por la corriente, y sobre todo por la saturación del hierro, que hace que las cuplas que se desarrollan en estos casos no alcancen valores muy elevados.

Errores sistemáticos de los instrumentos de hierro móvil

Los errores más importantes en los instrumentos de este tipo se deben a los siguientes factores:

a. Temperatura

La variación de temperatura, respecto a la de calibración o de referencia, puede ser producida por las pérdidas óhmicas desarrolladas en el arrollamiento o por la variación de la temperatura ambiente exterior a la bobina,

El calor puesto en juego en esas circunstancias puede afectar al instrumento en las siguientes formas:

- # Variación de los elementos mecánicos de fijación del sistema móvil y fijo.

Las expansiones producidas por incrementos de la temperatura, afectan la fricción natural que existe entre pivotes y cojinetes alterando la posición del eje de rotación y, por lo tanto, la precisión del instrumento.

- # Alteración de la resistencia óhmica de la bobina.

Este efecto puede considerarse como el más importante. Si la bobina es devanada totalmente en cobre, aumentará aproximadamente $0.4 \% / ^\circ\text{C}$. En los amperímetros esa variación no es importante, ya que la corriente que circula por la bobina es impuesta por el circuito de carga.

En cambio, en los voltímetros el efecto de la temperatura es relevante. Para una tensión aplicada constante, una variación de la resistencia de la bobina afectará a la corriente que circula por la misma y por lo tanto el campo magnético excitador. Esta dificultad puede ser sensiblemente reducida, y en algunos casos, eliminada, construyendo la bobina con un conductor de aleación de bajo coeficiente de temperatura.

- # Alteración de la constante elástica de la suspensión.

b.- Campos magnéticos externos

Los errores producidos por campos magnéticos externos, también llamados parásitos, son de importancia en todos los instrumentos que funcionan con débil campo excitador. Los efectos de los campos magnéticos son difíciles de determinar y por lo tanto su corrección sistemática. La magnitud del error cometido es dependiente de la intensidad de campo exterior, su dirección relativa al campo propio del instrumento y la forma y posición del instrumento. El efecto es importante cuando se refiere a campos generados con altas corrientes en barras cercanas al instrumento. Se pueden reducir sensiblemente empleando blindajes con aleaciones de alta permeabilidad.

c.- Errores por histéresis

Existe un atraso en la magnetización del hierro con respecto al campo creado por la corriente. Este defecto puede ser detectado por calibración del instrumento en corriente continua con valores crecientes y decrecientes. Se puede comprobar que para una misma intensidad se produce una deflexión del sistema móvil mayor para la corriente decreciente. Es posible reducir considerablemente este error haciendo que el hierro tenga dimensiones muy pequeñas utilizando materiales de alta permeabilidad.

d.- Errores debidos a la variación de frecuencia

Las corrientes parásitas o de Foucault inducidas en las partes mecánicas debido al flujo alternativo, tendrán un evidente defecto desmagnetizante.

Para reducir los efectos desmagnetizante, la bobina se fija sobre elementos no conductores (plásticos).

e.- Errores por forma de onda

Si bien se ha comentado que este instrumento mide valores eficaces de cualquier forma de onda exentas prácticamente de errores, salvo cuando se midan corrientes con valores picos elevados, la no linealidad de la característica magnética del hierro hace que la permeabilidad dependa no del valor eficaz sino del valor máximo.

Su efecto puede ser mayor como amperímetro que como voltímetro, en razón que la corriente de carga puede resultar fuertemente deformada, no así la tensión de línea ya que las armónicas presentes tienen valor reducido. Para disminuir el efecto por forma de onda, se trata de utilizar una aleación de alta permeabilidad y que trabaje en la zona de valor constante. La calibración del instrumento se hace con excitación sinusoidal, sea corriente o tensión.

2.8 Instrumentos electrodinámicos

Descripción

El instrumento está constituido por dos sistemas: uno fijo y otro móvil, cuyo grado de libertad es el de rotación pura.

Los dos sistemas, están formados por dos arrollamientos de forma geométrica característica, rectangular o circular y de conductores de secciones adecuadas, según al uso que se destine. El sistema móvil es similar al del instrumento de imán permanente y bobina móvil -figura 1-. De acuerdo a los requerimientos de sensibilidad el sistema indicador puede ser del tipo mecánico (aguja) u óptico (luminoso) y el par antagónico de cinta espirales. La cupla amortiguante es provocada por una paleta o émbolo.

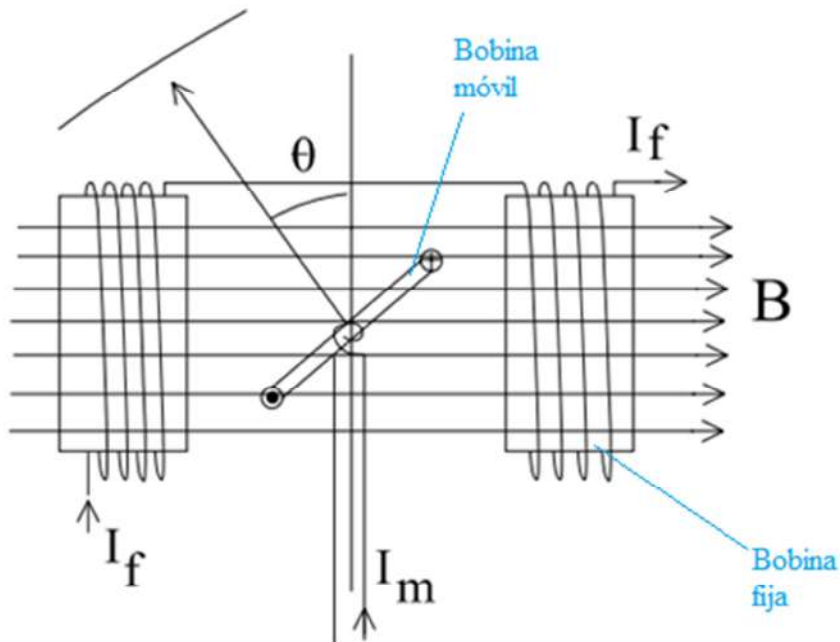


Figura 31: Esquema de instrumento electrodinámico

Ley de respuesta

Si mediante el sistema fijo, tenemos un campo paralelo y uniforme, se puede escribir que el flujo concatenado por el sistema móvil de N espiras, es aproximadamente:

$$\varphi_c = \varphi_{Max} N_m \sin \theta$$

Si se analiza con el auxilio de esquema de la figura el por qué de esta expresión:

$$\varphi_c = \varphi_{Max} N_m \cos(90^\circ - \theta)$$

$$\varphi_c = \varphi_{Max} N_m \sin \theta$$

Resulta entonces que la inducción mutua valdrá:

$$M = \frac{\varphi}{i_f} = \frac{\varphi_{Max} N_m \sin \theta}{i_f} = M_{Max} \sin \theta$$

Ahora bien, la derivada de la inducción mutua, con respecto al desplazamiento angular es:

$$\frac{dM}{d\theta} = M_{Max} \cos \theta$$

Se ha representado gráficamente la variación de M y su derivada respecto del ángulo de θ .

Se aprecia con que con este sistema, la inducción mutua varía sensiblemente en forma lineal en las cercanías del cero dentro de un ángulo total de aproximadamente 60° .

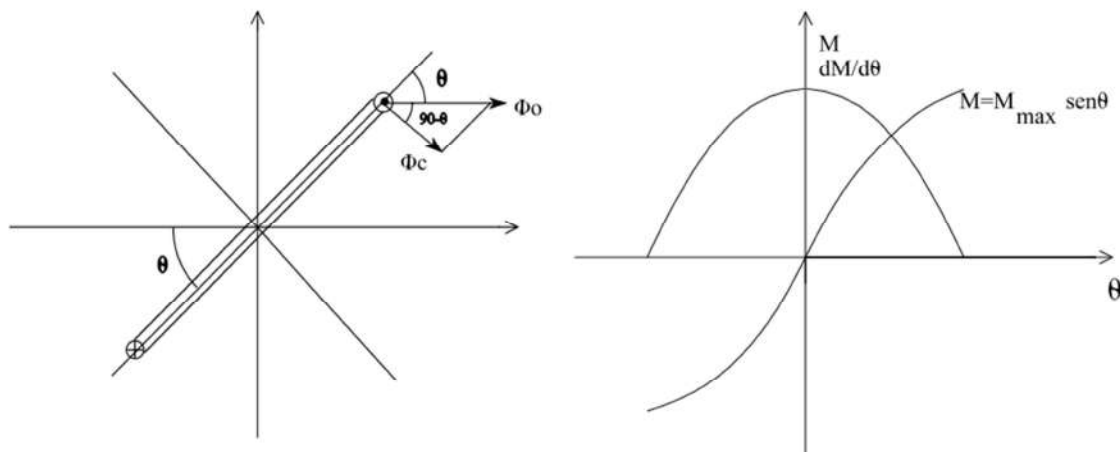


Figura 32: Variación de la inductancia mutua M con respecto al ángulo de desviación de la bobina móvil

Por tanto, al tener la inducción mutua una variación lineal, su derivada será constante dentro de ese ángulo.

Al apartarnos de la variación lineal de la inducción mutua, la derivada decrece en valor, por lo que se verá afectada la distribución de la escala del instrumento, como luego se ha de ver.

Si se desea que la distribución de la escala sea independiente de la posición del cuadro móvil, éste deberá mantenerse en la zona donde la inducción varía en forma casi lineal.

Sin embargo, mediante la adecuada elección en el diseño de las bobinas, es factible obtener la proporcionalidad entre la inductancia mutua y la escala en un ángulo usual de 90° (entre $+45^\circ$ y -45°).

Las distribuciones típicas de la escala dan uniformidad aceptable en la parte alta y constricción en la parte inferior, más acusadamente que en otros mecanismos.

Las intensidades en el sistema fijo y móvil respectivamente son i_f e i_m . Por estar los sistemas acoplados magnéticamente, la energía electromagnética instantánea almacenada en el conjunto, caracterizada por la auto y mutua inductancia, tiene la conocida expresión:

$$W = \frac{1}{2} L_f i_f^2 + \frac{1}{2} L_m i_m^2 + M i_f i_m$$

Para hallar el par motor instantáneo, o cupla instantánea c_m derivamos como se sabe la expresión anterior con respecto al grado de libertad, es decir el ángulo de rotación θ :

Para hallar el par motor instantáneo, o cupla instantánea c_m derivamos como se sabe la expresión anterior con respecto al grado de libertad, es decir el ángulo de rotación:

$$c_m = \frac{dW}{d\theta}$$

Entonces

$$c_m = \frac{dM}{d\theta} i_f i_m$$

Como solamente M varía con θ :

$$c_m = \frac{dM}{d\theta} i_f i_m$$

Para el caso de corriente continua (DC):

$$i_f = I_f \quad y \quad i_m = I_m$$

Con lo cual:

$$c_m = \frac{dM}{d\theta} I_f I_m$$

En el equilibrio:

$$c_m = c_d$$

$$\frac{dM}{d\theta} I_f I_m = k \theta$$

Con lo que :

$$\theta = \frac{1}{K} \frac{dM}{d\theta} I_f I_m$$

Trabajando únicamente en la parte lineal de M, donde:

$$\frac{dM}{d\theta} \sim cte$$

$$\rightarrow \theta \approx \frac{1}{K} I_f I_m$$

Caso 2: corrientes alternas

Supongamos ahora que la excitación del instrumento sea con corriente alterna. Debido a que las impedancias de las bobinas fijas y bobina móvil son distintas, habrá un ángulo de desfase β entre ambas corrientes:

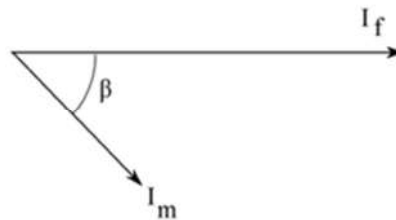


Figura 33: Corrientes en un instrumento electrodinámico

$$i_f = I_{f_{Max}} \sin \omega t, \quad i_m = I_{m_{Max}} \sin(\omega t - \beta)$$

$$C_m = \frac{dM}{d\theta} i_f i_m = \frac{dM}{d\theta} I_{f_{Max}} I_{m_{Max}} \sin \omega t \sin(\omega t - \beta)$$

$$C_m = \frac{dM}{d\theta} I_{f_{Max}} I_{m_{Max}} \frac{1}{2} (\cos \beta - \cos(2\omega t - \beta))$$

Por lo que la cupla motora tendrá dos componentes: una constante y otra de frecuencia doble de la aplicada.

Esta frecuencia es mucho mayor que la frecuencia natural del sistema móvil, por lo que no provocará ninguna deflexión apreciable del índice del instrumento -recordar lo visto en el capítulo de dinámica del sistema móvil.

Finalmente expresamos como ley del instrumento en corriente alterna:

$$C_m = \frac{dM}{d\theta} I_f I_m \cos \beta$$

Características

En estos instrumentos se trata de evitar en su construcción cualquier material ferromagnético excepción de la pantalla exterior.

Para que la corriente de la bobina fija no alcance valores demasiado grandes, la inducción magnética en el espacio ocupado por la bobina móvil se limita a 0.005 Wb/m , es decir valores sumamente bajo en comparación con los de imán permanente y bobina móvil que tienen una inducción de trabajo de aproximadamente: $B=0.6 \text{ Wb/m}$.

Generalmente existe un número par de bobinas fijas. Se prefiere los soportes de cerámica, ya que las piezas metálicas podrían debilitar el campo de la bobina fija, como consecuencia de las corrientes parásitas.

Debido al campo relativamente débil de la bobina, estos instrumentos son extremadamente sensibles a los campos externos parásitos, incluso en mediciones de corriente continua se nota la influencia del campo terrestre sobre el mecanismo, es por ello que generalmente estos instrumentos están protegidos por una envoltura de aleación muy permeable.

El doble blindaje, proporciona muy buenos resultados; consta de un material exterior con una gran inducción de saturación y una pequeña intensidad de campo coercitivo y uno interior de gran permeabilidad inicial. Con ello se logra para campos externos de intensidad $H=800 \text{ A/m}$. una protección activa, quedando el error por debajo del 0.23% . Existe otro método para la eliminación de los campos exteriores que es la "disposición estática" y que veremos más adelante.

Utilización

Los instrumentos electrodinámicos se utilizan con preponderancia en los aparatos de medida de potencia. Los tipos constructivos permiten exactitudes de clases elevadas (0.2 y 0.1).

La gama de frecuencias de utilización está limitada inferiormente por las oscilaciones de la aguja y superiormente por la influencia de corrientes parásitas y de la inductividad.

En los instrumentos electrodinámicos de exactitud estos límites son 40 y 500 Hz respectivamente, y, si se permiten errores correspondientes a la clase 0.5 , 15 y 1000 Hz .

Con los instrumentos electrodinámicos se pueden construir también amperímetros y voltímetros de gran exactitud; llegándose a obtener por medio de un diseño cuidadoso instrumentos de clase $= 0.25$ y aún menor. A causa de su costo elevado y su gran consumo, no se los emplea frecuentemente, salvo cuando se desea gran exactitud, o cuando es importante que los valores obtenidos estén libres de la influencia de la forma de onda y otros errores.

Pero la aplicación fundamental (dejando de lado su uso como medidores de potencia que de ellos se hace) es la de instrumentos patrones, o instrumentos de transferencia para calibrar voltímetros y amperímetros (que no pueden ser calibrados en corriente continua) para su empleo en corriente alterna.

Instrumentos electrodinámicos con hierro

Como resultado del desarrollo de los materiales magnéticos de bajas pérdidas, es posible emplear núcleos de hierro en algunos instrumentos electrodinámicos, con una cierta pérdida de exactitud pero con una ganancia fundamental en el valor de la inducción. En ellos el flujo producido en la bobina fija se cierra en parte en el hierro; de manera tal que a igual número de amper-vueltas (o sea para igual consumo) se aumenta la intensidad de campo, o bien se reduce el consumo para la misma intensidad de campo. Pero la presencia del hierro, aunque sea de gran permeabilidad y finamente laminado complica la teoría del instrumento y la ley que rige su movimiento. En efecto, los flujos no resultan rigurosamente proporcionales con respecto a las corrientes que los originan y están algo defasados con respecto de ellas; además la reactancia de las bobinas aumenta y con ella aumenta el error de frecuencia como veremos más adelante. El par de giro, es en idénticas condiciones, aproximadamente 20 veces mayor que en los mecanismos sin hierro, por lo tanto pueden construirse menores y más robustos.

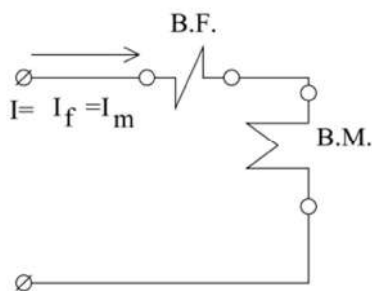
Aplicaciones del instrumento electrodinámico

I) Uso como amperímetro:

El instrumento electrodinámico puede usarse como medidor de la intensidad y puede funcionar tanto en corriente continua como en corriente alterna.

a) Excitación con corriente continua:

Cuando el amperímetro es utilizado para medir corriente, deberá ser conectado en serie con la carga, y al tener el instrumento electrodinámico dos circuitos eléctricos independientes, habrá dos variantes en su disposición de conexión de las bobinas, pues éstas pueden estar conectadas en serie o paralelo. Se verán ambos casos:



a1) Primer caso: Bobinas fijas y móvil en serie:

Al conectar las bobinas en serie respetando las polaridades relativas, se cumple que:

$$I_f = I_m = I$$

Siendo:

I_f = Corriente en la bobina fija

I_m = Corriente en la bobina móvil.

Se había visto que la ley de deflexión en los instrumentos electrodinámicos era:

$$\theta = K \frac{dM}{d\theta} I_m I_f \cos\beta \rightarrow \theta = K \frac{dM}{d\theta} I^2 \cos\beta$$

$$\text{Como } \frac{dM}{d\theta} \cong cte \rightarrow \theta \approx K' I^2$$

b2) Segundo caso: Conexión en paralelo de las bobinas

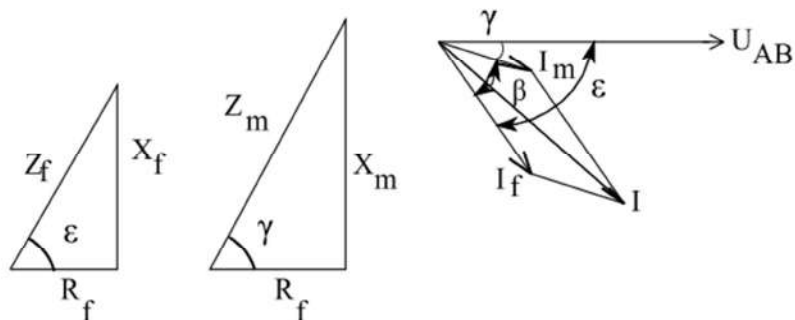
Si se toma la caída de tensión en los bornes del instrumento (U_{AB}) como origen de las fases podemos establecer el diagrama fasorial de la figura.

Los valores instantáneos de las corrientes serán:

$$i_f = i_{f_{Max}} \sin(\omega t - \varepsilon)$$

$$i_m = i_{m_{Max}} \sin(\omega t - \gamma)$$

$$\beta = \varepsilon - \gamma$$



$$\rightarrow \varepsilon = \text{atan} \frac{\omega L_f}{R_f} \quad \gamma = \text{atan} \frac{\omega L_m}{R_m}$$

Los wattímetros constituyen la mayor aplicación del sistema electrodinámico. Están diseñados para medir el valor de la potencia media no solo para el caso particular cuando $P = V I \cos\phi$, sino también en el caso general definido por:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt$$

En el caso de magnitudes poli-armónicas, la potencia será el producto de los valores eficaces de las corrientes y tensiones de igual frecuencia, por el coseno del ángulo comprendido entre ambas:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos\phi_n$$

Los wattímetros electrodinámicos, se construyen de tipo standard, portátiles, de laboratorio o bien de tablero, estos últimos con núcleo de hierro.

El wattímetro presenta bornes independientes para cada una de sus bobinas. La amperométrica que es la bobina fija, se conecta en serie con la carga y la voltimétrica que es la bobina móvil, en paralelo con la carga, de manera tal que la corriente que la circula es proporcional a la caída de tensión en la carga.

La bobina fija o amperométrica lleva pocas espiras, con sección suficiente para conducir la corriente nominal del instrumento, mientras que la voltimétrica estará formada por muchas espiras de baja sección, en serie con una resistencia.

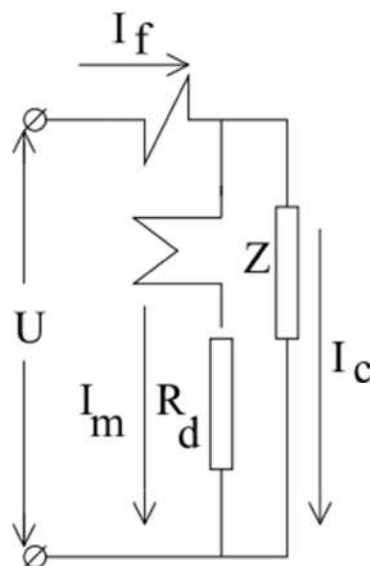


Figura 12: Esquema circuital de un wattímetro implementado con un sistema electrodinámico

Esquema de bornes

Como la corriente que circula en la bobina fija es prácticamente la corriente de carga y la de la bobina móvil proporcional a la tensión aplicada, la desviación será:

$$\theta = \frac{1}{K} \frac{dM}{d\theta} i_m i_f \cos\beta = K V I \cos\phi$$

Esta expresión es posible siempre y cuando se suponga que la corriente que circula por la bobina móvil está en fase con la tensión (es decir que el comportamiento es totalmente resistivo), de manera tal que el ángulo β coincida con ϕ .

Por lo tanto, el instrumento electrodinámico con la anterior conexión medirá la potencia activa media que consume la impedancia de carga. Se ve además que si se cumple que $dM/d\theta$ es constante su escala es uniforme. Por otra parte dará una indicación que es función no solo de la potencia consumida en la impedancia d carga que nos interesa medir, sino también de l potencia de su propia bobina de tensión, en caso que sea necesario deberá deducirse el consumo propio que vale:

$$P_{consumo} = V^2 / R_V$$

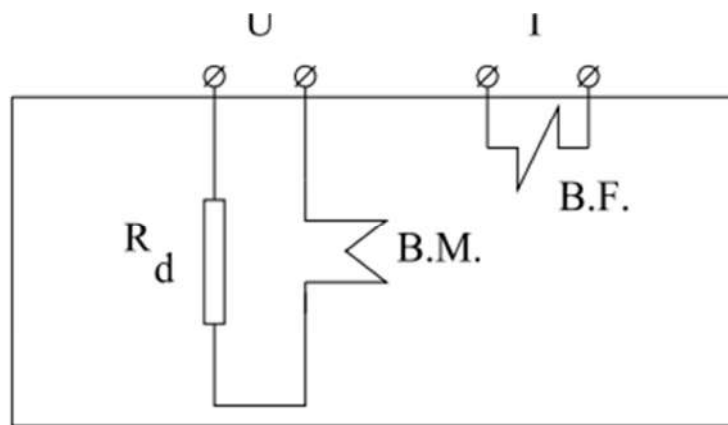


Figura 135: Esquema de bornes de wattímetro (monofásico)

Los valores típicos en los wattímetros son los siguientes:

Corriente en la bobina móvil : 15 a 20 mA.

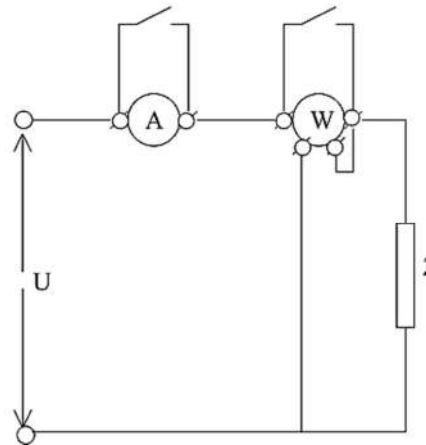
Corriente en la bobina fija: 20A como máximo.

Para los casos de corrientes mayores a 20A en la bobina amperométrica, se deben usar transformadores de medida (T.I.). Lo mismo ocurre en la bobina voltimétrica, cuya tensión no debe sobrepasar los 450 V debido a la gran potencia que debe disipar en el resistor en serie R_d , por lo tanto se deben usar en esos casos transformadores de tensión (T.V.)

Precauciones en la conexión

El wattímetro es un instrumento que debe protegerse especialmente, ya que la aguja indica siempre el producto: $U \cdot I \cdot \cos \phi$ (carga), y este producto puede ser inferior al alcance a pesar que la corriente puede ser superior a la nominal y quemar la bobina amperométrica.

Ejemplo:



$$V_n = 500V$$

$$I_n = 5 A$$

$$P_n = (300 V) (5A) (1) = 1500W$$

Si se está utilizando para medir la potencia consumida por una carga en la cual están establecidos los siguientes valores:

$$V = 180V \quad I = 10 A \quad \cos\phi(\text{carga}) = 0.5$$

El wattímetro indicará una potencia:

$$P_m = 180 \times 10 \times 0.5 = 900 W$$

Se ve que en este caso la aguja no está en el fondo de escala, sin embargo la bobina amperométrica está recorrida con una corriente de 10 A y puede llegar a quemarse. Por ello es conveniente usar un amperímetro en serie con la amperométrica para verificación de la corriente máxima, y una vez verificada desconectarlo.

También es interesante conectar un interruptor unipolar que cortocircuite la bobina amperométrica del wattímetro cuando se produce el arranque de motores, debido al gran consumo de los mismos en el arranque.

Dado que en un instrumento electrodinámico los sistemas amperométrico y voltimétrico no tienen conexión interna, tendremos exteriormente cuatro bornes y por lo tanto existen cuatro posibles formas de conexión del instrumento.

En las cuatro variantes la cupla motora depende del sentido relativo de las corrientes instantáneas en las bobinas por lo que en estos instrumentos viene indicado la polaridad. Respetada ésta, la deflexión del instrumento será de izquierda a derecha. La polaridad viene marcada en los bornes de intensidad y de tensión del instrumento con los símbolos siguientes " * " a estos bornes se les llaman "bornes homólogos"; por supuesto que los otros dos también serán homólogos entre sí.

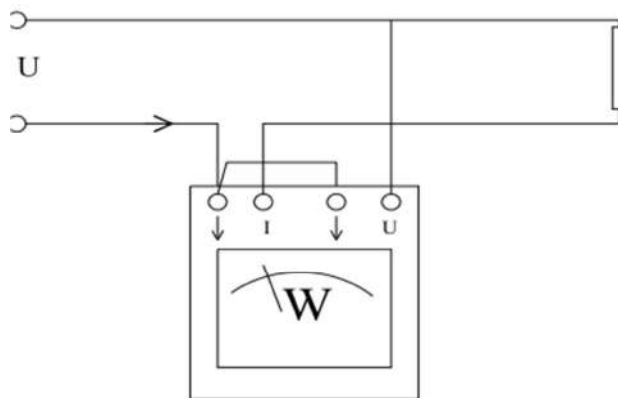


Figura 146: Indicación de homología de terminales en un wattímetro

Nota: Si la corriente instantáneamente "entra" o "sale" por el borne marcado con "*" de la amperométrica, debe "entrar" o "salir" por el borne marcado "*" de la voltimétrica para que el sentido de la desviación sea el correcto.

Factores que afectan la exactitud de los instrumentos electrodinámicos

Existen tres factores de perturbación que afectan la exactitud de este tipo de instrumentos, y ellos son los siguientes:

1) Temperatura

Las variaciones de temperatura en los elementos constitutivos, motivadas por la modificación de la temperatura ambiente y por autocalentamiento, producen errores sistemáticos.

a) En los voltímetros: La variación de temperatura varía la resistencia de las bobinas, con lo cual modifica la proporcionalidad entre tensión y corriente. Para que la variación sea insignificante, la resistencia adicional que colocábamos en serie con la B_m se construye de manganina.

b) En los amperímetros: Modifica la distribución de las corrientes en las ramas en paralelo (conexión paralelo entre B_m y B_f).

c) En las bobinas voltimétricas de los wattímetros: Lo mismo que en los voltímetros.

d) En los resortes de la Bm: Modificación de la constante elástica de los mismos. Por ello se trata de separar el máximo posible los resortes de las resistencias multiplicadoras derivadoras que pueden entregar calor.

2) Frecuencia

Varias son las formas en que la variación de frecuencia altera la indicación de los instrumentos:

a) **Acoplamiento con partes metálicas:** Las piezas metálicas de los instrumentos actúan como el secundario de un transformador (debido al campo magnético principal). Las corrientes inducidas en las partes metálicas producen un campo de tipo desmagnetizante, y por lo tanto una disminución de la indicación. Lo mismo que los instrumentos de hierro móvil, este efecto se minimiza tratando de reemplazar todas aquellas partes metálicas por piezas de material plástico, y aquellas que no se pudieran reemplazar, disponerlas en lugares alejadas del campo magnético. Estas últimas además deberán construirse de aleaciones de alta resistividad.

b) **Variación en las reactancias:** Esto influye en forma diferente según el tipo de instrumento: En la bobina voltimétrica: (Bm) y en los voltímetros, si aumenta la frecuencia aumenta la impedancia y disminuye I_m con lo que el instrumento indicará de menos. Si la frecuencia disminuye el instrumento indicará de más. Para minimizar los errores sistemáticos en los voltímetros y wattímetros la resistencia multiplicadora R_d se hacen de arrollamientos antiinductivos. Si además ésta tiene valores de 10 a 20 veces mayor que la reactancia de las bobinas, el efecto es despreciable.

3) Campos magnéticos externos

Como se había visto, este tipo de instrumento sin núcleo de hierro tiene un campo principal muy débil. (60 gauss a plena escala). Cualquier campo externo puede influir en la medición. Para reducir el problema se recurre a las siguientes soluciones:

a) Blindaje:

Se coloca el sistema de medición en un dispositivo de forma cilíndrica, figura 28. El cilindro se fabrica en chapas delgadas de alta permeabilidad, laminadas en forma que el espesor llegue a unos 5 milímetros. La laminación se efectúa para disminuir las corrientes parásitas de acoplamiento.

2) Construcción de tipo astática El blindaje anterior, en frecuencias muy altas trae aparejados problemas con las corrientes parásitas en el propio blindaje. La construcción astática (ver esquema en la página siguiente) dos bobinas móviles, solidarias a un mismo eje y sobre éste la aguja indicadora, evita el inconveniente citado.

Básicamente son dos sistemas de medición exactamente iguales, tales que sus cuplas se sumen, pero con campos de B_f desplazados 180° en el espacio. Por lo tanto un campo magnético extraño refuerza a una cupla y debilita en la misma proporción a la otra, permaneciendo la cupla total inalterable.

3. Referencias

- [1] J. A. Suárez, de *Medidas Eléctricas*, Número ISBN 950-43-9807-3, 2014.
- [2] A. Karcz, de *Fundamentos de Metrología Eléctrica*, Ediciones Técnicas Marcombo S.A..