



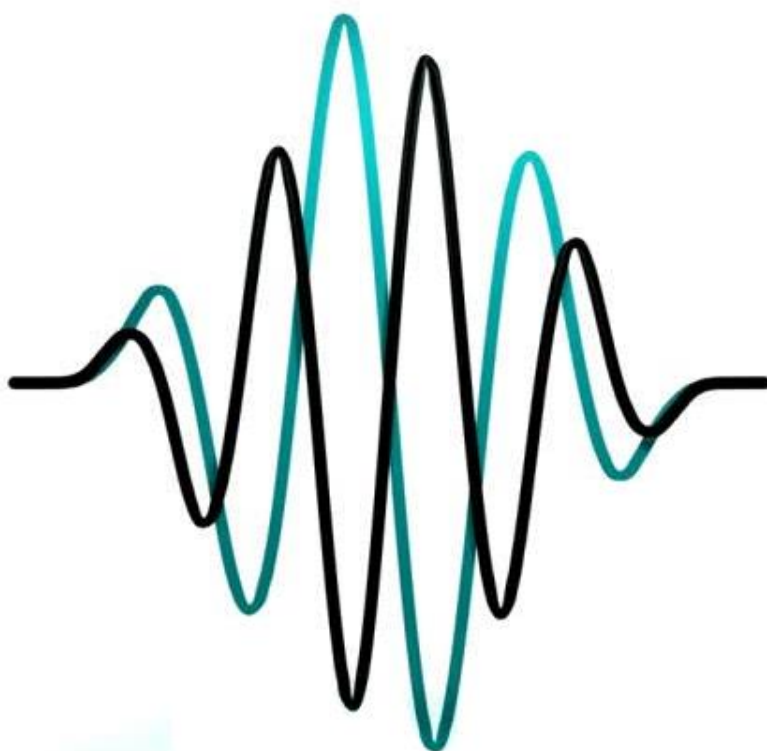
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

INSTITUTO NACIONAL SUPERIOR DEL PROFESORADO TÉCNICO

CONTROL ELÉCTRICO Y ACCIONAMIENTOS

APUNTES DE CÁTEDRA I

LABORATORIO DE MEDICIONES



Lic. RICARDO DEFRANCE



Temas

Concepto de Medición	Pág. 3
Simbología Normalizada	Pág. 5
Elementos de Regulación y Ajuste	Pág. 6
Resistencias Patrón	Pág. 10
Resistencia de Contacto	Pág. 12
Puente de Wheatstone	Pág. 14
Instrumento de Imán Permanente y Bobina Móvil	Pág. 17
Instrumento de Hierro Móvil	Pág. 20
Instrumento Electrodinámico	Pág. 24
Puentes de Corriente Alterna	Pág. 32
Potenciometro de Corriente Continua	Pág. 39
Resumen de Instrumentos Fundamentales	Pág. 45

Temas Complementarios

Expansiones Polares en Instrumentos de IPBM	Pág. 46
Sensibilidad del Puente Wheatstone	Pág. 49
Fundamentos Básicos de Metrología Eléctrica	Pág. 51
Bibliografía	Pág. 57



CONCEPTO DE MEDICIÓN

Antes de llevar a cabo las distintas descripciones de los instrumentos de medida es necesario definir el concepto de medición: *Medir una **cantidad** de una **magnitud** es compararla con otra de la misma magnitud que se adopta como unidad.*

En esta proposición aparecen dos términos que requieren una explicación o definición correcta: magnitud y cantidad.

Magnitud: físicamente se define como la propiedad de un cuerpo o un evento susceptible de ser medido.

Son magnitudes, el peso, la longitud, la velocidad, la intensidad de una corriente eléctrica, etc. Sin embargo no todas las magnitudes mencionadas se encuentran dentro de una misma categoría: mientras que el peso y la velocidad son magnitudes vectoriales, la longitud es una magnitud escalar. Además las magnitudes eléctricas pueden admitir en algunos casos una representación vectorial que simplifica el análisis de los circuitos.

Cantidad: es el número, vector o matriz que permite comparar cuantitativamente respecto de la que se tomó como unidad de la magnitud.

Por ejemplo, si se mide una intensidad de una corriente siendo el valor de 10 amper, el número 10 es la cantidad que dice qué relación existe entre la cantidad que se tomó como unidad y la medida. Este es el caso de una magnitud escalar (C.C.); para una representación vectorial (C.A.) la medición se expresa como $(6,8) A$ o $(6+j8) A$ o 10 A con ángulo 53° .

Sin embargo **medir** no representa en la mayoría de los casos una tarea sencilla. Requiere definir y ejecutar correctamente tres pasos: *qué es lo que se va a medir, cómo se va a medir y con qué elementos se va a medir.*

Que: La magnitud a medir (incógnita) no siempre está bien definida, y su caracterización plantea por lo general la mayor dificultad en la resolución del problema.

Como: Una vez definido que es lo que se medirá, surge el problema de la elección del método de medida más adecuado.



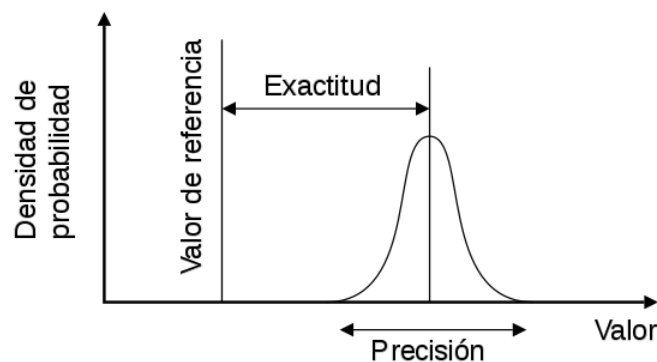
Con que elementos: solucionados los dos primeros puntos es necesario proceder a la selección de los aparatos de medición y de los operadores. Estas dos tareas están relacionadas entre sí ya que casi siempre la disponibilidad de personal adecuado define el tipo de aparato o método de medida a utilizar.

El valor que sirve como verdadero, variará según sea el objetivo que se persigue al hacer la medida. También se ve que cuanto más cercano al *valor verdadero* se encuentra el valor medido, mayor es la cantidad de *cifras significativas* colocadas en la expresión.

Si se analizan cuidadosamente lo expuesto anteriormente se llega en forma natural a dos conclusiones:

1. No existe una regla única e invariable para determinar hasta qué punto acercarse al valor verdadero, si éste fuera conocido;
2. Como es lógico, cuanto más cercano a él se quiera llegar, tanto mayor será el esfuerzo, y por ende el costo. Se ha arribado en forma natural al *concepto de error*, que permite determinar hasta qué punto una medición se aproxima al valor que se considera como verdadero.¹

El valor verdadero es el más probable, es decir surge estadísticamente a partir de número determinado de mediciones, por ejemplo $n = 10$. A partir de esta definición, pueden distinguirse dos conceptos muy importantes: **precisión** y **exactitud**. Un instrumento es *exacto* cuando el resultado que arroja se acerca al valor verdadero. Si a la vez, en un número determinado de mediciones muestra resultados próximos entre sí, también será *preciso*. En física, ingeniería, industria y estadística, precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud.



¹

En la técnica de las mediciones el término de error no tiene el sentido que le da el lenguaje corriente de falta de verdad o de equivocación o falsedad



SIMBOLOGÍA

Símbolos para aparatos de medida							
1		Mecanismo de bobina móvil y de imán permanente (en general)	11		Aparato de medida electromagnético	Corriente de utilización	
						21	Corriente continua
2		Mecanismo de bobina móvil y de imán permanente con rectificador	12		Aparato de medida electrodinámico de cuadro móvil	22	Corriente alterna
3		Mecanismo de bobina móvil y de imán permanente con circuito electrónico	13		Mecanismo de medida por inducción	23	Corriente continua o alterna indistintamente
4	 	Convertidor térmico sin aislar Convertidor térmico aislado	14		Mecanismo de medida electrostático	Posición de funcionamiento	
						24	 Vertical Horizontal Inclinada por ejemplo 60°
5		Aparato de medida electromagnético de cuadro móvil	15		Aparato de medida térmico	Tensión de prueba	
						25	Tensión de prueba 500 V
6		Mecanismo de medida electromagnético de imán móvil	16		Mecanismo de medida por bimetálico	Tensión de prueba mayor de 500 V	
						26	 Por ejemplo 2 KV Por ejemplo sin prueba
7		Mecanismo de medida electromagnético de imán giratorio	17		Mecanismo de medida de vibración	27	Instrumento trifásico con un sistema de medida
8		Mecanismo electrodinámico sin hierro	18		Blindaje magnético de hierro	28	Instrumento trifásico con dos sistemas de medida
9		Mecanismo electrodinámico con hierro	¡Atención!			29	Instrumento trifásico con tres sistemas de medida
			19	Ver instrucciones			
Clase de precisión			Condición ambiental			Resistencia exterior del instrumento	
10	Aparatos de verificación Clase 0,1 0,2 0,5	Aparatos industriales Clase 1 1,5 2,5	20	25°C	Zona de influencia 15 a 25° y de 25 a 35 °	30	En paralelo (Shunt)
							En serie
							Aparente, independiente
Ejemplo de uso							
			1,5				
	Mecanismo	Corriente	Precisión	Colocación	Aislamiento		



ELEMENTOS DE REGULACIÓN Y AJUSTE

En las prácticas de las mediciones eléctricas, principalmente en los trabajos de laboratorio, se hace necesario el empleo de elementos para regular la tensión o la intensidad de corriente y con los cuales ajustar valores. Un elemento de regulación de uso frecuente es el resistor variable, que en muchos casos debe tener un valor conocido para que se lo ajuste.

Un resistor se caracteriza por dos magnitudes:

- El valor de la resistencia en ohm
- El valor de la disipación de potencia en watt

Existen varios tipos de resistores variables. Comenzaremos describiendo los resistores regulables *a cursor*, contruidos por una resistencia de alambre y un contacto deslizante. En la figura 1 se representa un esquema convencional. El alambre está enrollado sobre una forma aislante y el terminal C, se prolonga a lo largo por medio de una barra conductora, sobre la cual corre el cursor que hace de derivación. Estos resistores tienen una disipación del orden de 200 a 300 W.

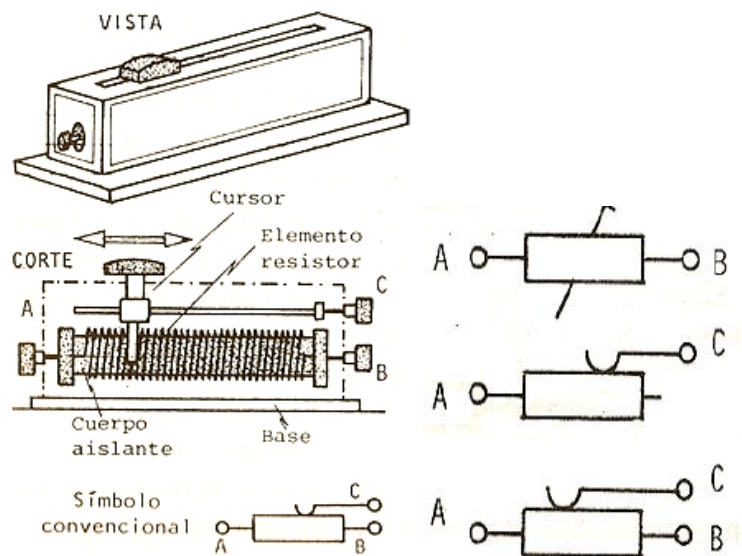


FIGURA 1



Otro modelo de resistor variable es el resistor regulable a *clavijas*, representado en la figura 2, que admite variaciones discretas. Cuando la clavija está extraída, la corriente debe pasar de un bloque al siguiente a través de la resistencia. Cuando la clavija está colocada (línea de trazos) la corriente pasa directamente de un bloque a otro. Las clavijas son cortocircuitos y en la figura 2a se observa la disposición de una serie de resistencias, todas en serie.

Al colocar una clavija cualquiera, por ejemplo en la quinta posición a contar desde la izquierda, se cortocircuitan las cuatro primeras y entre terminales se tiene la suma de las resistencias restantes

Otra disposición es la de la figura 3, en base a la misma idea, en que la colocación de la clavija establece un puente en determinado sector.

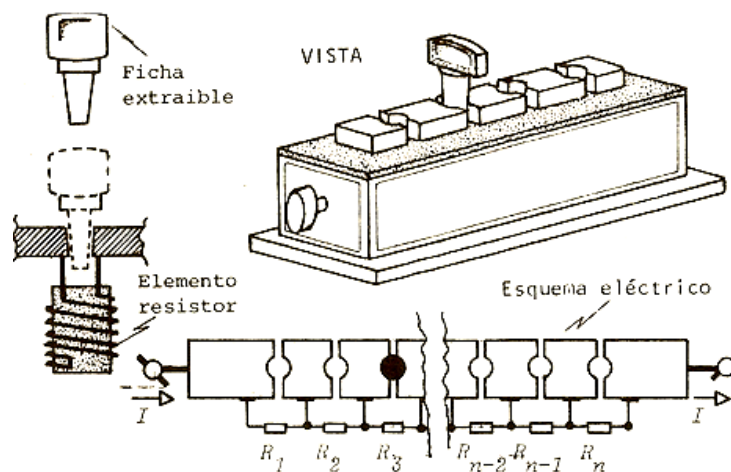


FIGURA 2

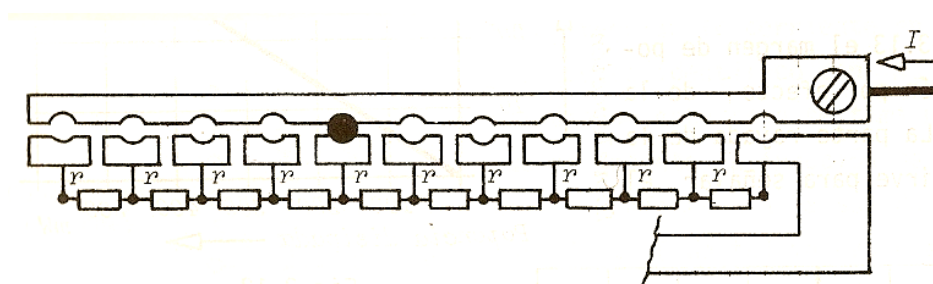


FIGURA 2ª

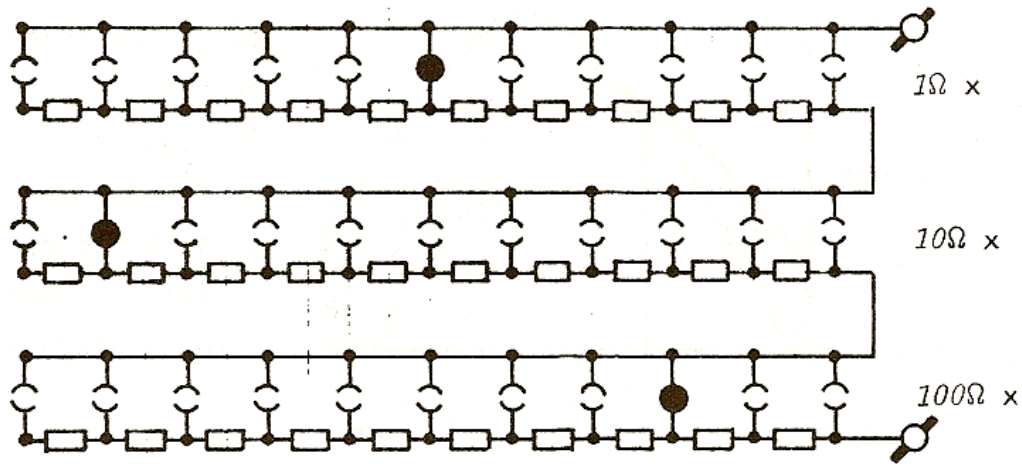


FIGURA 3

Este tipo de resistor a clavija se fabrica para una disipación de potencia del orden de 2 a 3 watt por cada componente. En la primera fila, las resistencias son de $1\ \Omega$ cada una, en la segunda fila de $10\ \Omega$ y en la tercera de $100\ \Omega$. Por lo tanto se pueden organizar valores múltiplos de diez en cada fila. En la figura se compone un valor de $5+90+200 = 295\ \Omega$. El conjunto sirve hasta $999\ \Omega$. Este tipo de variación se denomina en *décadas*. Otro modelo de resistencias regulables es los denominados resistores regulables a *manivela*, que se fabrican también con el criterio de las décadas. En la figura 4, se observa el esquema de conexiones y un corte del elemento que muestra la disposición del contacto móvil.

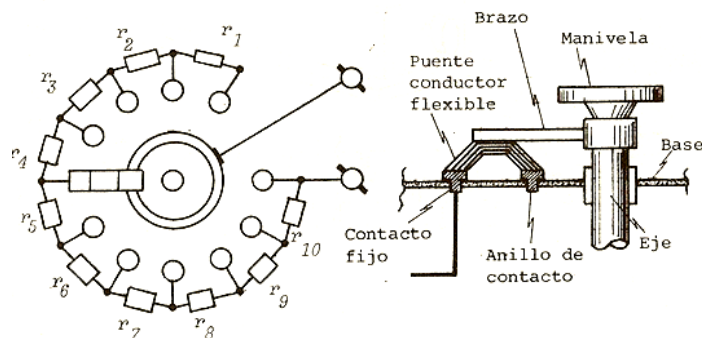


FIGURA 4



En la figura 5, se muestra el esquema eléctrico interno y abajo el aspecto exterior del regulador con sus manivelas para las diferentes décadas.

Tanto las resistencias regulables a *cursor* como las de *clavijas* o la de *manivelas*, son aparatos de mesa, de muy poca disipación. Para muchos ensayos de laboratorio es necesario operar con potencias algo mayores, del orden de los kilowatt y para ello se emplean los resistores de carga, que tienen la forma mostrada en la figura 6

Para potencias mayores, se utilizan resistores líquidos compuestos por placas metálicas sumergidas en un líquido conductor.

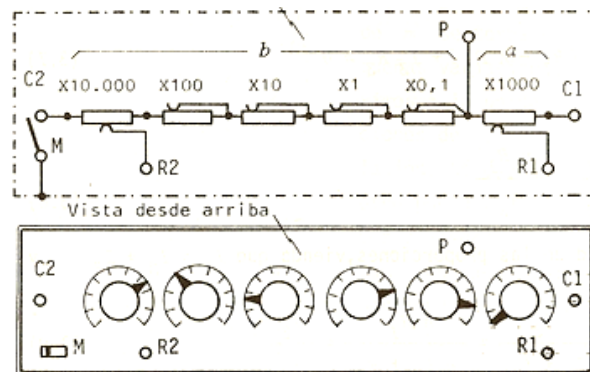


FIGURA 5

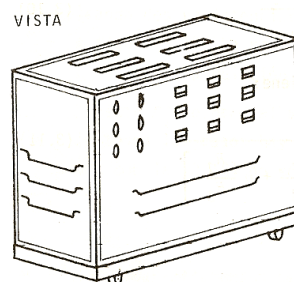


FIGURA 6

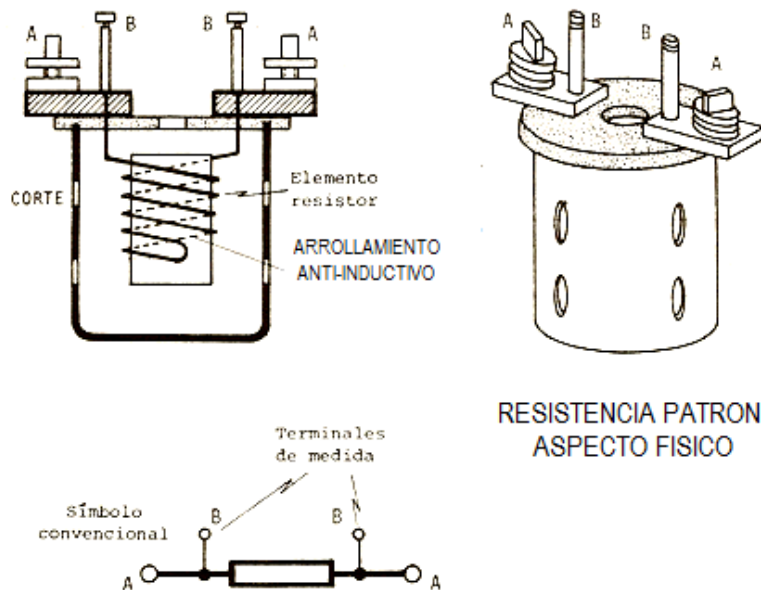


RESISTENCIAS PATRÓN

Un patrón es una magnitud utilizada para describir la distribución de probabilidad de una variable aleatoria. Están destinados a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o varios valores de una magnitud para que sirvan de referencia.

Las resistencias comunes están construidas de alambre de manganina (cobre 84%, manganeso 12% y níquel 4%) y existen otras aleaciones que también se emplean.

Las resistencias patrón, tienen valores nominales prácticamente invariables con el tiempo y se las construye especialmente para que puedan usarse como elementos de contraste de resistencias comunes o asociadas con instrumentos de medición de alta precisión. El alambre se dispone de forma que reduzca al mínimo la inducción, ya que una resistencia devanada se comporta como una bobina (circuito R-L) y consiste en arrollar en forma conjunta sobre un cilindro aislante a los alambres que llevan corrientes de sentido opuesto, con lo que se atenúan los campos magnéticos provocados por cada uno.



Esta resistencia se coloca en un recipiente adecuado y sus terminales se llevan al exterior por medio de elementos que se caracterizan por presentar muy baja resistencia de contacto. Por eso, las resistencias patrón, tienen cuatro terminales, dos de conexión al circuito y dos terminales de medición donde se garantiza el valor exacto de la resistencia.



En la parte inferior del esquema se observan los terminales de conexión al circuito (A - A), por donde ingresa y egresa la corriente. En los terminales de medición (B - B) se obtiene el valor nominal de resistencia en ohm.

Generalmente al patrón se lo sumerge en aceite dentro del recipiente y la perforación de la tapa superior es para tomar la temperatura por medio de un termómetro. Las resistencias patrón tienen una capacidad de disipación de 1 watt en aire y 10 watt sumergidas en aceite.

Las resistencias de contacto se pueden estimar en 10^{-3} y 10^{-4} ohm. Cuando se les aplica corriente continua solo presentan resistencia. Con corriente alterna manifiestan inductancia pese a su construcción anti-inductiva. Por otra parte la proximidad de los conductores denota un efecto capacitivo que se acentúa con la frecuencia.

Los **patrones** se utilizan en mediciones de laboratorio fundamentalmente para calibración de equipos y contraste de instrumentos. Los patrones se certifican con estándares internacionales y existen los de tipo “viajero”, denominación que alude a la posibilidad de trasladarlos.

Dentro de la clasificación, encontramos distintos tipos de patrones:

- Patrón de referencia: El de más alta calidad metrológica.
- Patrón de trabajo: para controlar medidas materializadas, instrumentos y materiales de trabajo.
- Patrón de transferencia: Utilizado como intermediario para comparar patrones.
- Patrón internacional: reconocido para servir como referencia internacional.
- Patrón nacional: reconocido por un país, para servir de referencia en la asignación de valores a otros patrones de la magnitud considerada. Se contrastan con patrones internacionales.
- Patrón primario: su valor se acepta sin referirse a otros patrones de la misma magnitud.
- Patrón secundario: su valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud.



RESISTENCIA DE CONTACTO

Terminales de tensión y de corriente

En todas las condiciones en que se investigan resistencias muy pequeñas, pueden cometerse errores de importancia como consecuencia de las resistencias de contacto. Así por ejemplo en el diagrama de la figura 1, si el patrón R está conectado por medio de dos bornes de presión, el circuito contendrá además del patrón, a dos resistencias de contacto r_{c1} y r_{c2} cuyo efecto puede ser apreciable cuando R es pequeña. El error proveniente de estas resistencias de contacto se elimina en las resistencias patrones instalando bornes separados para tensión y para corriente (TT y CC de la figura 2).

Los bornes de corriente CC se conectan al circuito principal y los de tensión a los circuitos de intensidad débil. Cada uno de los bornes introducirá cierta resistencia de contacto r_{c1} , r_{c2} , r_{c3} , r_{c4} .

Los bornes TT están unidos por medio de conexiones soldadas a los extremos de la resistencia patrón R y forman parte de la misma.

Se producen caídas de potencial en las cuatro resistencias de contacto, pero resultan insignificantes por cuanto r_{c1} y r_{c2} se encuentran en serie con E solamente, r_{c3} y r_{c4} quedan en serie con r_b y r_a , que son de valores mucho mayores (decenas de ohm). El elemento importante a los efectos de la medición es la caída de tensión en la resistencia patrón R y este valor no queda afectado por la resistencia de contacto.

La mejora obtenida proviene en que las caídas producidas en las resistencias de contacto no quedan aplicadas a la parte del circuito que efectúa la comparación de valores (r_{c1} y r_{c2} en la figura 2) o producen efectos despreciables por provenir de corrientes débiles (r_{c3} y r_{c4}).

En lo que se refiere al efecto de las conexiones sobre la resistencia R_x , que se mide, la resistencia de contacto queda sumada con esta. En los puentes suelen instalarse también bornes de tensión y de corriente a fin de permitir la corrección del efecto de los conductores de conexión de R_x con el puente, cuando estos conductores deben ser necesariamente largos y provocar un aumento importante en el valor medido.

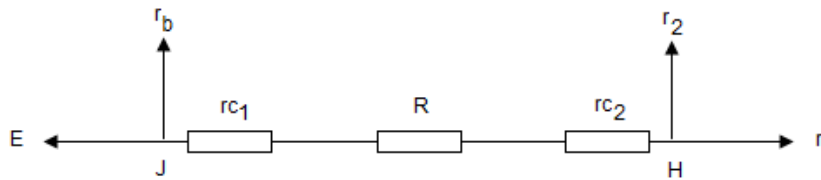


Figura 1

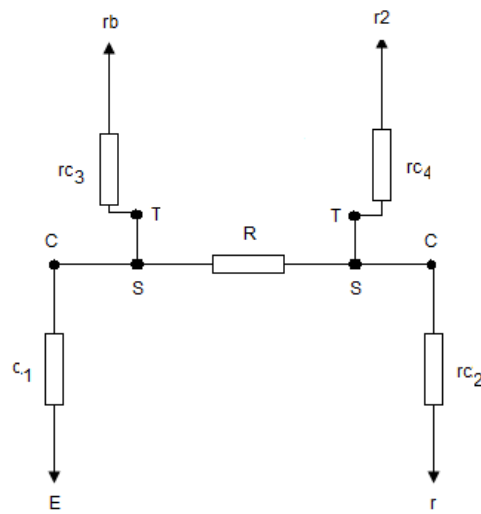


Figura 2

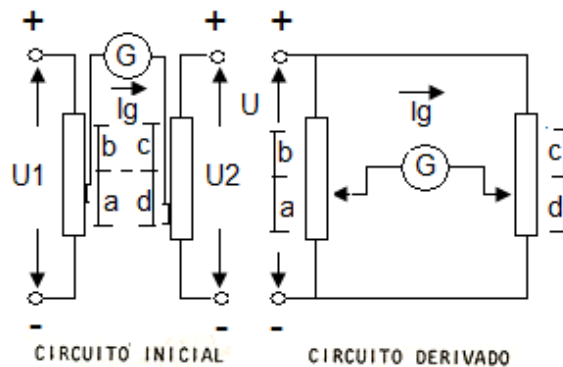
El **punto de Thomson**, como se explicará más adelante, elimina la resistencia de contacto entre los brazos de conexión de la resistencia incógnita, por medio de su doble rama de relación.

Son casos típicos los terminales de contacto y conexiones, donde la existencia de un contacto imperfecto en las interfaces entre materiales, puede hacer que se mida un valor distinto al que cabría esperar. La resistencia de contacto depende así de las condiciones de medida, a diferencia de la resistencia intrínseca que es una propiedad inherente del material.



PUENTE DE WHEATSTONE

Para el análisis, observemos el esquema 1. En la parte izquierda del circuito se disponen dos divisores de tensión, conectados a dos fuentes de tensión diferentes y vinculadas en su parte inferior por una conexión directa y por un galvanómetro que hace de puente en la parte superior.



ESQUEMA 1

Maniobrando los contactos deslizantes, se puede lograr que no circule corriente por el galvanómetro, en esa condición, se cumple:

$$U1 = \frac{a}{a+b} = U2 \frac{d}{c+d}$$

Se puede simplificar el circuito mediante la unión de las fuentes en una sola, en cuyo caso resulta:

$$\frac{a}{a+b} = \frac{d}{c+d}$$

Operando, queda:

$$\boxed{\frac{a}{b} = \frac{d}{c}}$$

Relación fundamental del puente.

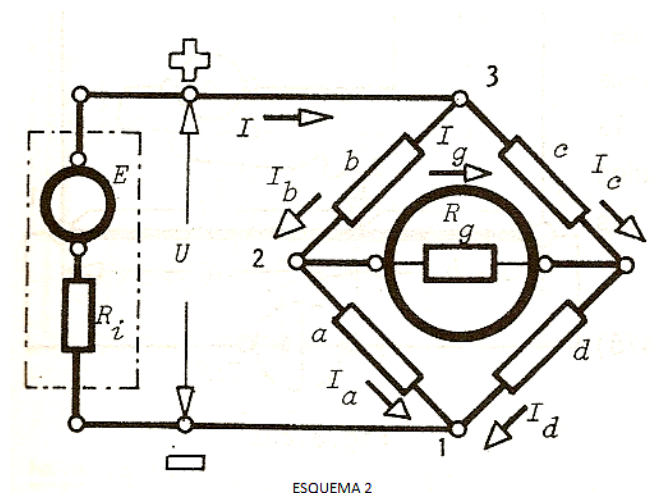


La relación obtenida es independiente de la tensión aplicada y del valor de corriente que circula por el galvanómetro.

Es evidente que si una de las resistencias es desconocida, por ejemplo la de la rama d (de ahora en adelante nuestra incógnita), se puede determinar su valor si son conocidas las otras tres, es decir:

$$x = \frac{a}{b} c$$

En el esquema 2, se observa la configuración circuital definitiva que se emplea.



$$\text{Con } I_g = 0 \quad I_a = I_b \quad \text{e} \quad I_c = I_d ; b \cdot I_b = c \cdot I_c \text{ y } a \cdot I_a = d \cdot I_d$$

En base a la expresión general obtenida en el análisis expuesto, podemos resumir:

Mantener constante $\frac{a}{b}$ y variar c hasta lograr el equilibrio

Mantener constante c y variar $\frac{a}{b}$ hasta lograr el equilibrio

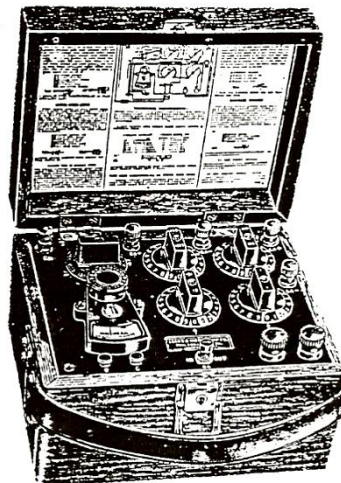


En ambos métodos se requieren tres resistencias perfectamente calibradas, una fuente de tensión, que en la práctica puede ser una pila o un acumulador; y un galvanómetro con cero al centro de la escala (detector de cero).

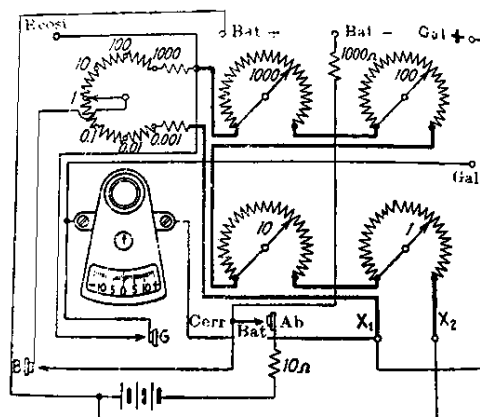
El instrumento solo debe indicar la ausencia de corriente y por ello a este método se lo llama de cero o de equilibrio.

No es necesario que los detectores indiquen la magnitud de la intensidad de corriente.

El esquema cuadrangular que se presenta a menudo, no corresponde al circuito original del instrumento, sino que es una estrategia conceptual para explicar sucintamente su funcionamiento.



PUENTE DE WHEATSTONE





INSTRUMENTO DE IMÁN PERMANENTE Y BOBINA MÓVIL – IPBM

Es el instrumento eléctrico de mayor aplicación en mediciones eléctricas. Históricamente es uno de los primeros instrumentos de medición precisos. También es denominado instrumento D'Arsonval en honor a un médico francés, Arsenio D'Arsonval, quien tiene el mérito de su perfeccionamiento casi definitivo.

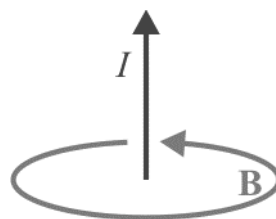
En la actualidad casi todos los instrumentos de bobina móvil parten constructivamente del modelo desarrollado por la firma Weston, debido a esto se lo conoce universalmente como sistema Weston o instrumento tipo Weston. Su funcionamiento se basa en la acción mutua de una corriente eléctrica y un campo magnético. A estos instrumentos se los clasifica como magnetoeléctricos. Se trata del único sistema instrumental sencillo que permite obtener una sensibilidad elevada, cualidad que, unida a una considerable robustez mecánica, lo hace insustituible en numerosas aplicaciones.

En su forma más simple el instrumento está formado por una bobina móvil prácticamente sumergida dentro de un campo magnético uniforme, existente entre las expansiones polares de un imán permanente. Un núcleo de hierro dulce, que se halla en el centro de las expansiones polares, concentra el flujo magnético en esa zona, distribuyéndose radialmente.

Cuando la bobina es recorrida por una corriente continua de intensidad I , cada uno de sus lados, de longitud l , está sujeto a una fuerza que viene dada por la siguiente expresión:

$$F = \pm n I l B \text{ [N]}$$

Donde n es el número de espiras de la bobina y B es la inducción magnética. El signo \pm indica que la fuerza puede tener dos sentidos, según la dirección de la corriente.





Alcanzada la posición de equilibrio entre la cupla motora y la cupla antagónica de las espirales, la bobina queda desplazada con respecto de la posición de reposo en un cierto ángulo θ , proporcional a la corriente I , según la siguiente relación:

$$I = \frac{Kr}{n I B d} \theta$$

En la cual Kr es la constante elástica de las espirales y d es la distancia entre los lados activos de la bobina. Todas las constantes del instrumento se pueden agrupar en una sola, que denominaremos Ki , entonces puede escribirse:

$$I = Ki \cdot \theta$$

La expresión de la intensidad de corriente en función del ángulo de deflexión tiene una característica lineal, es decir que la desviación de la bobina y por tanto, del índice de aguja, es directamente proporcional a la magnitud de la corriente que circula por la bobina móvil. Esto significa que la escala es uniforme, o sea que los intervalos entre una división y la otra son iguales y representan siempre el mismo incremento de corriente. También se puede expresar diciendo que la sensibilidad del instrumento es constante en cualquier parte de la escala.

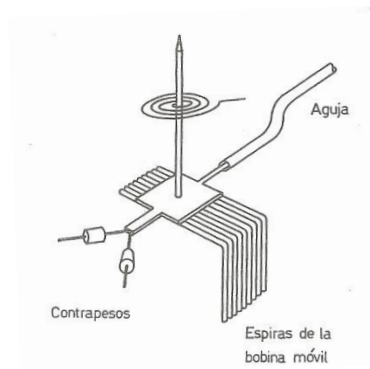
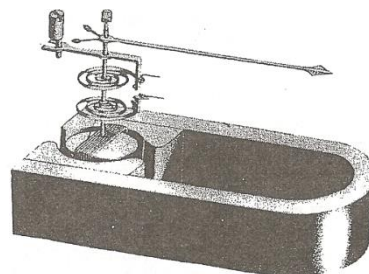
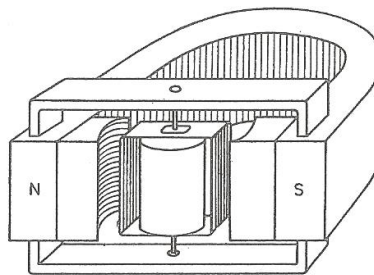
En realidad, la absoluta linealidad de la escala es sólo una condición teórica que se cumple aproximadamente en la práctica. Pequeñas imperfecciones en la uniformidad del campo magnético dan origen a alinealidades, que para los fines comunes no revisten mayor importancia.

Los instrumentos de bobina móvil permiten medir fácilmente corrientes pequeñas, del orden de 50 μA a 500 mA. Se amplía el rango de medida utilizando resistencias adicionales denominadas *shunt*. En corriente alterna pueden utilizarse mediante un rectificador, en cuyo caso la respuesta del instrumento será de valor medio calibrado a valor senoidal.

Pueden usarse como voltímetros. La sensibilidad voltimétrica de un instrumento de bobina móvil aumenta cuando disminuye su resistencia interna.



En ciertas aplicaciones, tales como el funcionamiento con termocuplas, es necesario que el instrumento posea una sensibilidad voltimétrica elevada. Los fabricantes reducen la resistencia interna haciendo la bobina con alambre de mayor sección y con pocas vueltas, para lo cual es necesario además aumentar la intensidad de campo magnético aumentando la potencia y el volumen de los imanes. Otro recurso es disminuir el peso de la bobina móvil para emplear espirales de menos torque. Para ello generalmente se quita el marco de aluminio de la bobina y ésta se devana en aire.





INSTRUMENTO DE HIERRO MÓVIL

Los instrumentos de hierro móvil están dentro de la categoría de instrumentos básicos en mediciones industriales. Son más empleados que los instrumentos de imán permanente y bobina móvil en este campo. Se los clasifica como instrumentos electromagnéticos. No son instrumentos de clase elevada como los de bobina móvil. Igualmente empleando hierros especiales se puede obtener una clase de 0,5 %. Pueden emplearse con frecuencias entre 25 y 150 ciclos. También se los puede utilizar en corriente continua.

Los instrumentos de hierro móvil pueden ser de atracción o de repulsión. Se expondrán a continuación las características de los sistemas de atracción.

El sistema de atracción está formado por un solenoide o bobina por donde circula la corriente a medir. Si una pequeña pieza de hierro dulce está sujeta a un eje, de forma tal que pueda girar libremente en torno a éste y el conjunto se monta cerca de la bobina, la chapa o lámina delgada de hierro será atraída por el campo magnético producido por la bobina cuando circule corriente por ésta, tendiendo a acercarse a la zona de mayor intensidad de campo.

La pieza de hierro es atraída independientemente del sentido de circulación de la corriente, de modo que este instrumento puede emplearse en corriente alterna. La fuerza con que la pieza es atraída es proporcional al cuadrado de la intensidad de corriente.

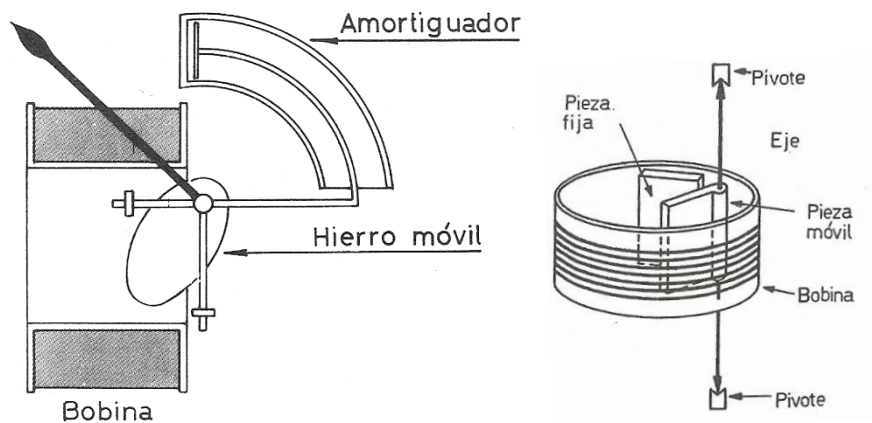
La respuesta del instrumento de atracción en corriente continua viene dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{K_1 \cdot N \cdot I}{R} = K_2 \cdot I \\ m_H &= K_3 \cdot \phi \\ F &= K_4 \cdot \phi \cdot m_H = K_4 \cdot \phi \cdot K_3 \cdot \phi = K_5 \cdot \phi^2 \\ M_E &= F \cdot D \text{ suponiendo } d = \text{cte.} \\ M_E &= K_5 \cdot d \cdot \phi^2 = K_6 \cdot \phi^2 = K_6 \cdot K_2^2 \cdot I^2 = K_7 \cdot I^2 \\ M_M &= K_8 \cdot \alpha \quad \text{Si } \alpha = \alpha_{\text{equilibrio}} \Rightarrow M_E = M_M \\ K_7 \cdot I^2 &= K_8 \cdot \alpha_{\text{equilibrio}} \Rightarrow \boxed{\alpha_{\text{equilibrio}} = K_9 \cdot I^2}\end{aligned}$$



En los instrumentos de atracción el hierro móvil está formado por láminas de material ferromagnético muy delgadas y montadas en forma excéntrica al eje de giro. Como se ha mencionado, esta pieza de hierro tiende a moverse desde la zona de campo magnético más débil hacia la zona de campo más intenso, cuando circula corriente por la bobina.

La forma que posee el hierro móvil tiene importancia, porque de ella depende en cierto grado la forma de división de la escala



Se expondrán a continuación las características de los sistemas de hierro móvil de repulsión.

Es el sistema más empleado actualmente en la fabricación de instrumentos de este tipo. El principio de funcionamiento es ligeramente diferente y se basa en la repulsión que se establece entre dos placas de hierro dulce, una móvil y otra fija, imanadas simultáneamente con el mismo signo. El campo magnético es generado por una bobina devanada entorno a un núcleo. Si las dos piezas están próximas entre sí, cuando circule corriente por la bobina, se magnetizarán con polo norte en un extremo y polo sur en el otro.



Como ambas placas tienen la misma polaridad magnética se rechazan y esta fuerza de repulsión se aprovecha para medir la corriente que circula por la bobina, una de las placas se instala rígidamente en el interior de la bobina, mientras que la otra es montada sobre un eje giratorio, solidario al índice. El momento instantáneo depende del valor instantáneo de I^2 , por tanto, la posición del índice constituye una función del valor eficaz de la corriente y es independiente de la forma de onda, por lo menos dentro de ciertos límites.

Los instrumentos de hierro móvil pueden usarse en corriente continua, pero las lecturas pueden tener ligeros errores debido al magnetismo residual de las chapas. Esta causa de error se detecta fácilmente haciendo circular una misma corriente, primero en un sentido y luego en el opuesto. Si existe magnetismo residual ambas indicaciones serán distintas.

La respuesta del instrumento de repulsión en corriente continua viene dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{K.N.I}{R} = K_1.I & K_1 &= \frac{K.N}{R} \\ m_F &= K_2.\phi = \text{masa magnética del hierro fijo} \\ m_m &= K_3.\phi = \text{masa magnética del hierro móvil} \\ |\overline{F}_N| &= |\overline{F}_S| = K_4 \cdot \frac{m_F m_m}{d^2} & \text{Ley de Coulomb se desprecia d} \\ |\overline{F}| &= |\overline{F}_N| + |\overline{F}_S| = 2.K_4 m_F m_m = K_5.m_F.m_m \\ |\overline{F}| &= K_5.K_2.\phi.K_3.\phi = K_6.\phi^2 = K_6.K_1^2.I^2 = K_7.I^2 \\ F_T &= F.\cos\alpha & \cos\alpha \text{ se desprecia, por lo tanto } F_T &= F \\ F_T &= K_7.I^2 & M_E &= K_8.F_T = K_8.K_7.I^2 = K_9.I^2 \\ M_M &= K_{10}.\alpha & \text{Si } \alpha &= \alpha_{\text{equilibrio}} \\ M_E &= M_M \Rightarrow \overline{K}_9.I^2 = K_{10}.\alpha_{\text{equilibrio}} \Rightarrow \boxed{\alpha_{\text{equilibrio}} = K_{11}.I^2}\end{aligned}$$

Los instrumentos de hierro móvil se usan como voltímetros y amperímetros. Como voltímetro se lo construye con un devanado de muchas espiras, entre 2000 y 10.000 espiras de alambre de cobre de baja sección.



Como amperímetro el límite de corriente a medir está impuesto por la sección del alambre del devanado de la bobina. El límite práctico de corriente es aproximadamente 50 A. El error aumenta al incrementarse el valor de corriente a medir. Para la ampliación del rango de medida se recurre a un transformador de intensidad. No se emplean *shunt* debido al carácter complejo de la impedancia.

La respuesta en corriente alterna del instrumento de hierro móvil, viene dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}M_{E(\text{instantáneo})} &= K_1 i^2 & i &= \text{valor instantáneo} \\M_{E(\text{medio})} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_{E(\text{instantáneo})} d\omega t \\M_{E(\text{medio})} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K_1 i^2 d\omega t & \text{donde } i &= \hat{I} \cos \omega t \\M_{E(\text{medio})} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K_1 (\hat{I} \cos \omega t)^2 d\omega t = \frac{\hat{I}^2 K_1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \omega t d\omega t & \cos^2 \alpha &= \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \\M_{E(\text{medio})} &= \frac{\hat{I}^2 K_1}{2\pi} \left[\int_0^{2\pi} \frac{1}{2} d\omega t + \int_0^{2\pi} \frac{\cos 2\omega t}{2} d\omega t \right] \\M_{E(\text{medio})} &= \frac{\hat{I}^2 K_1}{2\pi \cdot 2} \cdot 2\pi = K_1 \left(\frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} \right)^2 = K_1 I_{\text{ef}}^2\end{aligned}$$

$$M_M = K_2 \alpha$$

$$\text{Si } \alpha = \alpha_{\text{equilibrio}} \Rightarrow M_E = M_M$$

$$K_1 I_{\text{ef}}^2 = K_2 \alpha_{\text{equilibrio}} \Rightarrow \boxed{\alpha_{\text{equilibrio}} = K_3 I_{\text{ef}}^2}$$

Queda demostrada la respuesta del instrumento a verdadero valor eficaz, independientemente de la forma de onda de la señal que se está midiendo. Recordemos que los instrumentos IPBM en corriente alterna, presentan el valor medio calibrado a valor senoidal (Factor de forma $F_F = 1,11$).

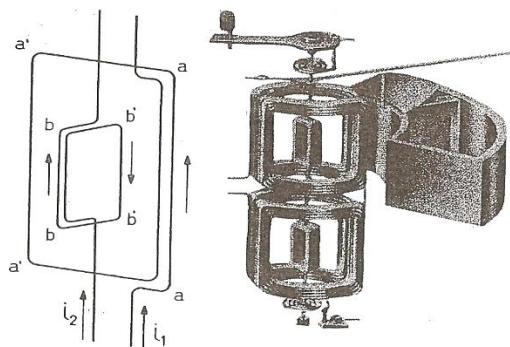


INSTRUMENTO ELECTRODINÁMICO

Estos instrumentos se basan en la acción mutua de dos campos magnéticos, análogamente a los instrumentos de bobina móvil, con la diferencia que en éste caso el campo producido por el imán permanente es reemplazado por un campo electromagnético producido por la corriente que circula por un grupo de bobinas fijas. Cuando las bobinas fijas tienen núcleo de aire, estos instrumentos se denominan electrodinámicos, mientras que cuando poseen bobinas fijas con núcleo de hierro, se denominan ferrodinámicos.

No contienen material magnético en su estructura por tanto están exentos de inconvenientes producidos por la saturación y la histéresis.

La idea básica del mecanismo de este instrumento puede ser obtenida considerando el funcionamiento del instrumento de imán permanente y bobina móvil. Durante medio ciclo de la onda, el índice deflexionaría hasta fondo de escala, pero en el medio ciclo siguiente, al invertirse la polaridad de la corriente que circula por la bobina móvil, deflexionaría en sentido opuesto. Si la frecuencia de la corriente fuera baja, se observaría el vaivén continuo del índice siguiendo la alternancia de la corriente. A frecuencias industriales, la inercia del mecanismo no permite este seguimiento y el índice oscilaría alrededor de cero.



Si se pudiera invertir la dirección del flujo del imán cada vez que se invierte la corriente en la bobina, la cupla tendría siempre una sola dirección. El flujo puede invertirse reemplazando al imán permanente por bobinas de campo conectadas en serie con la bobina móvil.



La bobina fija está dividida en dos secciones para generar un campo más uniforme y llevar a una linealización de la escala, que para el caso del amperímetro y voltímetro electrodinámico es cuadrática.

El amortiguamiento se realiza con cámara de aire siendo frecuente también el amortiguamiento por corrientes de Foucault, empleando un imán permanente externo. La bobina móvil está autosostenida, es decir, no está devanada sobre un marco metálico, como sucede en los instrumentos de imán permanente y bobina móvil, para evitar que se induzcan corrientes parásitas en él.

Dado que la inducción (B) es proporcional al flujo (Φ) y éste a su vez es proporcional a la intensidad de corriente, resulta que la respuesta de este instrumento es proporcional al producto de la intensidad de corriente a través de la bobina fija y de la circulante por la bobina móvil.

La expresión de equilibrio resulta:

$$\alpha_{\text{equilibrio}} = K_i \cdot I_F \cdot I_M$$

Los instrumentos electrodinámicos pueden construirse como amperímetros, voltímetros y vatímetros, siendo esta última su aplicación principal.

Amperímetro electrodinámico en C.A.

$$\left. \begin{array}{l} M_E = K_1 \cdot I^2 \\ \alpha = K_2 \cdot I^2 \end{array} \right\} \text{Expresiones generales de C.C.}$$

$$\text{En C.A. vale } M_{E(\text{instantáneo})} = K_1 \cdot i^2$$



$$\begin{aligned}
 M_{E(\text{medio})} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_{E(\text{instantáneo})} \cdot d\omega t \\
 M_{E(\text{medio})} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K_1 i^2 \cdot d\omega t & i_{\text{instantáneo}} &= \hat{I} \cdot \cos \omega t \\
 M_{E(\text{medio})} &= \frac{K_1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \hat{I}^2 \cdot \cos^2 \omega t \cdot d\omega t & \cos^2 \omega t &= \frac{1}{2} + \frac{\cos 2\omega t}{2} \\
 M_{E(\text{medio})} &= \frac{K_1 \hat{I}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \omega t \cdot d\omega t = \frac{K_1 \hat{I}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos 2\omega t}{2} \right) d\omega t \\
 M_{E(\text{medio})} &= \frac{K_1 \hat{I}^2}{2\pi} \left[\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\omega t + \underbrace{\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \cos 2\omega t \cdot d\omega t}_0 \right] \\
 M_{E(\text{medio})} &= \frac{K_1 \hat{I}^2 \cdot 2\pi}{2\pi \cdot 2} = \frac{K_1 \hat{I}^2}{2} = K_1 \left(\frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} \right)^2 = K_1 \cdot I_{\phi}^2 \\
 M_{M(\text{mecánico})} &= K_2 \alpha \\
 \text{Si } \alpha &= \alpha_{\text{equilibrio}} \\
 M_M &= M_{E(\text{medio})} \Rightarrow K_2 \cdot \alpha_{\text{equilibrio}} = K_1 \cdot I_{\phi}^2 \\
 \alpha_{\text{equilibrio}} &= \frac{K_1}{K_2} \cdot I_{\phi}^2 = \boxed{K_3 \cdot I_{\phi}^2 = \alpha_{\text{equilibrio}}}
 \end{aligned}$$

Vatímetro electrodinámico

$$\text{En C.C.: } M_E = K_1 \cdot U \cdot I$$

En C.A. es válida como valores instantáneos: $M_{E(\text{instantáneo})} = K_1 \cdot u \cdot i$

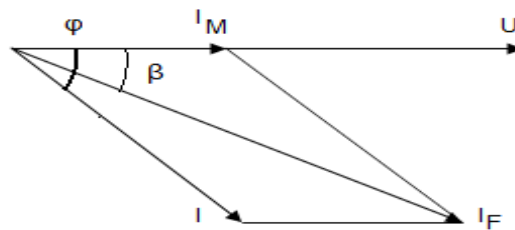
$$u = \hat{U} \cdot \cos \omega t$$

$$i = \hat{I} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

$$M_{E(\text{medio})} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_{E(\text{instantáneo})} \cdot d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K_1 \hat{U} \cdot \cos \omega t \cdot \hat{I} \cdot \cos(\omega t + \varphi) d\omega t$$

$$M_{E(\text{medio})} = \frac{1}{2\pi} K_1 \hat{U} \cdot \hat{I} \cdot \int_0^{2\pi} \cos \omega t \cdot \cos(\omega t + \varphi) d\omega t$$

$$\left. \begin{aligned}
 &+ \frac{\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta}{\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta) = 2 \cos \alpha \cdot \cos \beta} \right\} \text{siendo } \begin{aligned} \alpha &= \omega t \\ \beta &= \omega t + \varphi \end{aligned}
 \end{aligned}$$



$$M_{E(medio)} = \frac{1}{2\pi} K_1 \cdot \frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2} \cdot \int_0^{2\pi} \cos(\omega t + \omega t + \varphi) + \cos(\omega t - \omega t - \varphi) d\omega t$$

$$M_{E(medio)} = \frac{1}{2\pi} K_1 \cdot \frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2} \cdot \cos \varphi \int_0^{2\pi} d\omega t = K_1 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi = P_{act}$$

$$M_M = K_2 \cdot \alpha$$

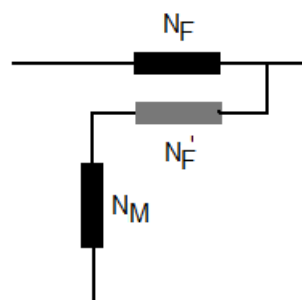
$$\text{Si } \alpha = \alpha_{equilibrio} \Rightarrow M_M = M_E$$

$$K_2 \cdot \alpha_{equilibrio} = K_1 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi$$

$$\alpha_{equilibrio} = \frac{K_1}{K_2} \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi$$

$$\boxed{\alpha_{equilibrio} = K_3 \cdot P_{act}}$$

Para compensar el elevado consumo del circuito voltimétrico, se dispone de una bobina fija devanada sobre la bobina fija principal, de forma de producir un campo magnético de acción contraria para que la deflexión del índice se vea compensado por el mayor consumo del circuito derivado. Esta disposición evita la necesidad de corrección.



N_F' BOBINA DE COMPENSACIÓN
 N_F BOBINA FIJA
 N_M BOBINA MÓVIL



Voltímetro electrodinámico en C.A.

$$U_{ef} = Z I_{ef}$$
$$M_{E(medio)} = K_1 \cdot \frac{U_{ef}^2}{Z^2} = \left(\frac{K_1}{Z^2} \right) U_{ef}^2 = K_4 \cdot U_{ef}^2$$
$$\text{Si } \alpha = \alpha_{equilibrio} \Rightarrow M_M = M_{E(Medio)}$$
$$\boxed{\alpha_{equilibrio} = K_5 \cdot U_{ef}^2}$$

Por la naturaleza de las relaciones fundamentales de las fuerzas que solicitan al sistema móvil, el instrumento lee verdadero valor eficaz. Puede calibrarse directamente en corriente continua y utilizarlo en corriente alterna. (Instrumento de transferencia)

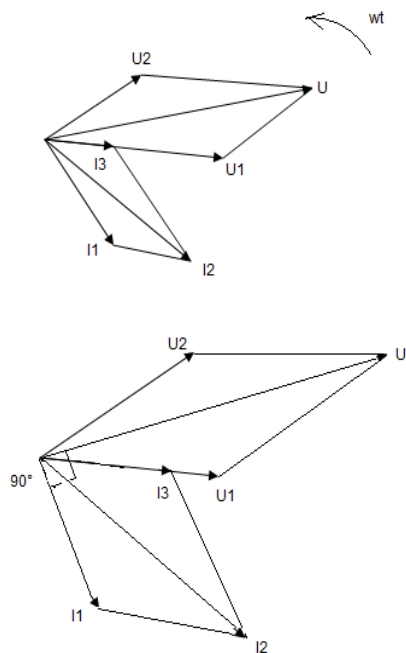
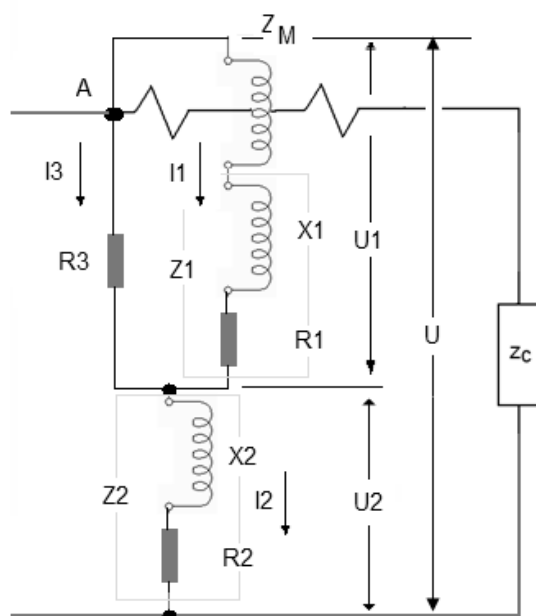
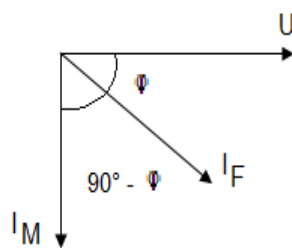
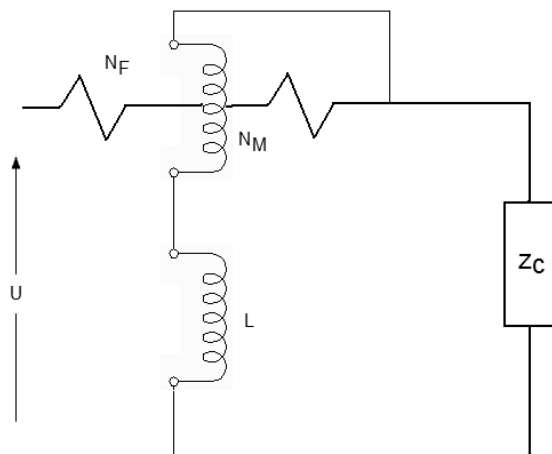
Varmetro o varímetro electrodinámico

Es de construcción similar a un vatímetro electrodinámico, la diferencia radica en que este instrumento incorpora un circuito destinado a desfazar la corriente de la rama voltimétrica 90° respecto de la tensión aplicada. Se emplean para medir la potencia reactiva.

La ecuación de equilibrio es:

$$\alpha_{equilibrio} = K \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\varphi - 90)$$
$$\alpha_{equilibrio} = K \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \text{sen } \varphi$$

$$\boxed{\alpha_{equilibrio} = K \cdot P_{react}}$$





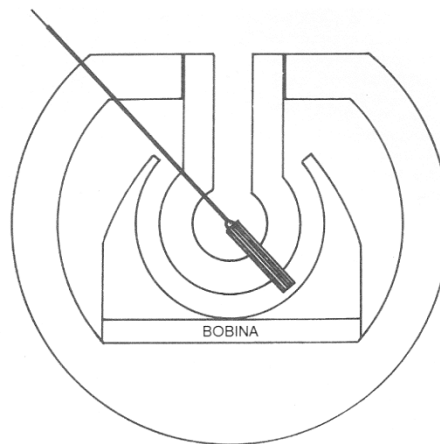
Si el ángulo entre I_1 $U < 90^\circ$ habrá que disminuir R_3 para aumentar I_3

Si el ángulo entre I_1 $U > 90^\circ$ habrá que aumentar R_3 para disminuir I_3

Instrumento ferrodinámico

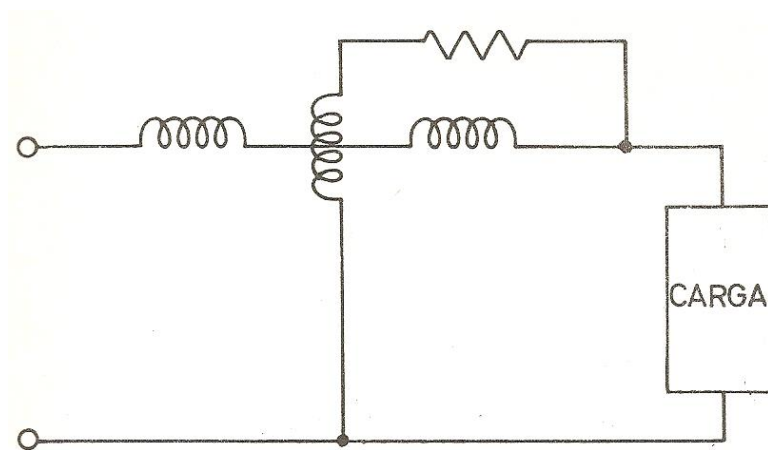
Se funda en el mismo principio que el instrumento electrodinámico, la diferencia radica en que tiene núcleo de hierro que canaliza las líneas de fuerza. De esta forma se consigue mayor flujo magnético con una corriente menor, con lo cual el instrumento se hace más sensible, es decir que se reduce el consumo propio.

El núcleo es laminado para reducir las corrientes de Foucault. Presentan la ventaja de ser más compactos que los electrodinámicos. La precisión es menor ya que se introduce error por histéresis.

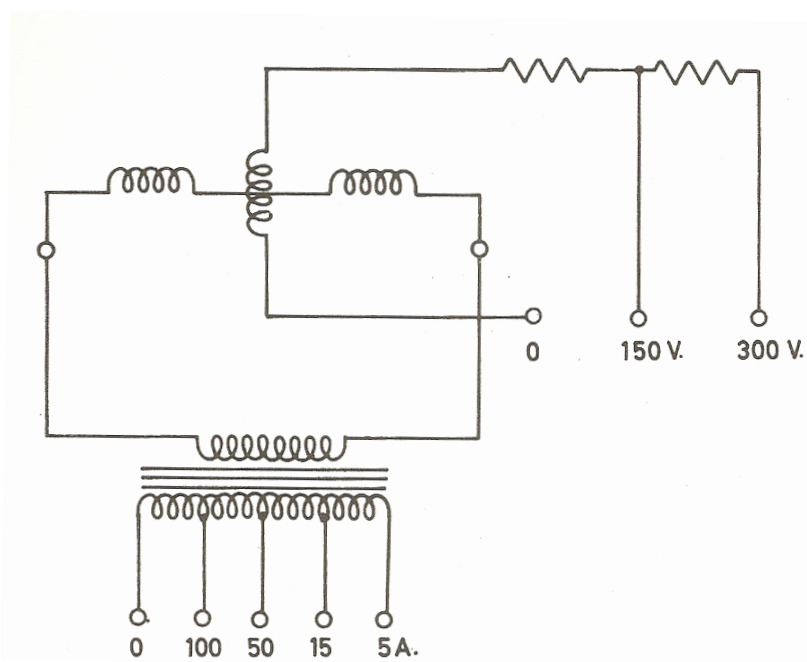




Conexión del vatímetro electrodinámico



Conexión con transformador de medición





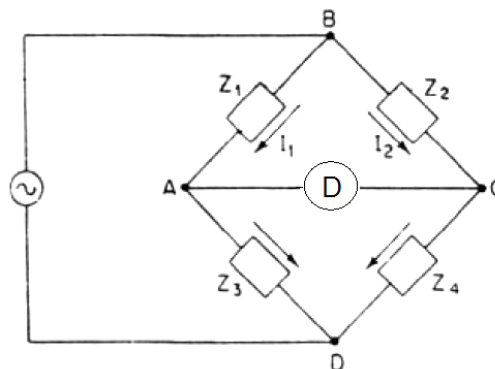
PUENTES DE CORRIENTE ALTERNA

El puente de corriente alterna es una consecuencia del puente de corriente continua y consiste en un puente de cuatro ramas, una fuente de tensión y un detector de cero.

La forma general del puente se representa en el esquema 1, las cuatro impedancias del puente son Z_1 , Z_2 , Z_3 y Z_4 . Al igual que en el puente de Wheatstone el equilibrio se alcanza cuando la respuesta del detector es cero. El ajuste para lograr el equilibrio se hace variando una o más ramas del puente.

La ecuación general de equilibrio se obtiene utilizando la notación compleja para las impedancias. Estas cantidades complejas pueden ser impedancias o admitancias, tensiones o corrientes. La condición para el equilibrio requiere que la diferencia de potencial entre A – C sea cero. Cuando la caída entre B – A es igual a la caída de tensión entre B – C, tanto en magnitud como en fase.

$$\overline{E}_{BA} = \overline{E}_{BC} \quad o \quad \overline{I}_1 \overline{Z}_1 = \overline{I}_2 \overline{Z}_2 \quad (1)$$



Esquema 1

Para la condición de equilibrio, la intensidad de corriente es:



$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_3} \quad (2)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_4} \quad (3)$$

Al sustituir las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación (1)

$$\bar{Z}_1 \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \bar{Z}_3 \quad (4)$$

o cuando se utilizan admitancias en lugar de impedancias

$$\bar{Y}_1 \bar{Y}_4 = \bar{Y}_2 \bar{Y}_3 \quad (5)$$

La ecuación 4 es la forma más conveniente para la mayoría de los casos y es la ecuación general para el equilibrio del puente de C.A. La ecuación 5 puede emplearse cuando se tienen componentes en paralelo en las ramas del puente.

La ecuación 4 establece que el producto de las impedancias de un par de ramas opuestas debe ser igual al producto de las impedancias del otro par de ramas opuestas.

Si las impedancias se escriben en forma polar, la ecuación 4 pasa a escribirse de la forma siguiente:

$$(Z_1/\theta_1).(Z_4/\theta_4) = (Z_2/\theta_2).(Z_3/\theta_3)$$

En la multiplicación de números complejos las magnitudes se multiplican y los ángulos de fase se suman, entonces la ecuación anterior puede escribirse de la siguiente manera:

$$Z_1.Z_4/(\theta_1 + \theta_4) = Z_2.Z_3/(\theta_2 + \theta_3)$$



Esta expresión muestra que dos condiciones se deben satisfacer simultáneamente cuando se equilibra el puente de C.A. La primera es que la magnitudes de las impedancias satisfagan la relación:

$$\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3$$

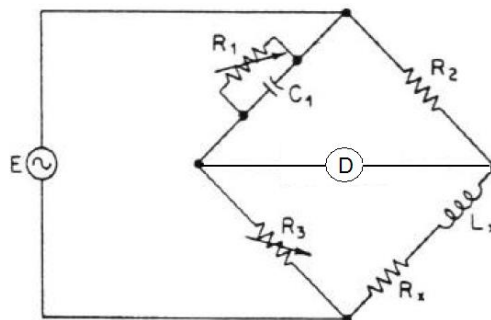
La segunda es que los ángulos de fase de las impedancias satisfagan la relación:

$$\angle \theta_1 + \angle \theta_4 = \angle \theta_2 + \angle \theta_3$$

Se expondrán a continuación las características de los puentes de Maxwell y Shering.

Puente de Maxwell

Este puente se utiliza para determinar el valor de una inductancia desconocida por medio de una capacitancia conocida. Una de las ramas de relación tiene una resistencia en paralelo con un capacitor. (Esquema 2)



Esquema 2

Desarrollo:

$$\bar{Z}_x = \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3 \cdot \bar{Y}_1$$



Donde Y_1 es la admitancia de la rama 1. De acuerdo al esquema 2, se tiene que:

$$\bar{Z}_2 = R_2; \quad \bar{Z}_3 = R_3; \quad y \quad \bar{Y}_1 = \frac{1}{R_1} + j\omega C_1$$

Con la sustitución de estos valores en la expresión precedente queda

$$\bar{Z}_x = R_x + j\omega L_x = R_2.R_3\left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1\right)$$

Separando los términos reales e imaginarios

$$R_x = \frac{R_2.R_3}{R_1}$$

y

$$L_x = R_2.R_3.C_1$$

El puente de Maxwell se limita a la medición de inductancias con factor de mérito medio ($1 < Q < 10$). Esto puede demostrarse si se considera la segunda condición de equilibrio, la cual establece que la suma de los ángulos de fase de un par de ramas opuestas debe ser igual a la suma de los ángulos de fase del otro par. Puesto que los ángulos de fase en los elementos resistivos de las ramas 2 y 3 suman 0° y la suma de los ángulos de las ramas 1 y 4 también será 0° . El ángulo de fase de una bobina de Q alto será cercano a 90° (positivos), lo cual requiere que el ángulo de fase de la rama capacitiva esté cerca de 90° (negativos). Esto significa que la resistencia de R_1 ha de ser muy grande, lo que es muy poco práctico. Las bobinas de alto Q se miden generalmente con un puente de Hay.

El puente de Maxwell tampoco es conveniente para la medición de inductancias con bajo Q ($Q < 1$) debidos a los problemas de convergencia en el equilibrio.

El procedimiento normal para equilibrar el puente de Maxwell es ajustar primero R_3 para el equilibrio inductivo y luego ajustar R_1 , para el resistivo. Después al volver al ajuste de R_3 se advierte que el equilibrio resistivo se ha modificado a un nuevo valor. Este procedimiento se repite y da una convergencia lenta hacia el equilibrio final.

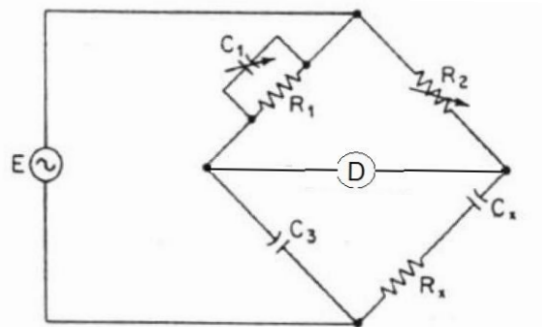


Puente de Schering

Es uno de los puentes más importantes para corriente alterna, se usa ampliamente en la medición de capacitores. Es útil para medir algunas condiciones de aislamiento, particularmente ángulos de fase cercanos a 90° .

En el esquema 3 se muestra la forma circuital del puente. La rama 1 contiene una combinación en paralelo de una resistencia y un capacitor y la rama patrón solo contiene un capacitor. Las condiciones de equilibrio requieren que la suma de los ángulos de fase de las ramas 1 y 4 sea igual a la suma de los ángulos de las ramas 2 y 3. Puesto que el capacitor patrón está en la rama 3, la suma de los ángulos de fase de las ramas 2 y 3 será $0 + 90^\circ = 90^\circ$. Para obtener un ángulo de fase de 90° , que es condición para el equilibrio, la suma de los ángulos de las ramas 1 y 4 debe ser igual a 90° .

Debido a que en las mediciones generales la cantidad desconocida tiene un ángulo de fase menor a 90° , es necesario que la rama 1 tenga un ángulo capacitivo pequeño por medio de la conexión del capacitor C_1 en paralelo con la resistencia R_1 .



Esquema 3

Las ecuaciones de equilibrio se derivan por la sustitución de los valores correspondientes a la impedancia y admitancia en la ecuación general:



$$\bar{Z}_x = \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3 \cdot \bar{Y}_1 \quad (1)$$

ó

$$R_x - \frac{j}{\omega C_x} = R_2 \cdot \left(\frac{-j}{\omega C_3} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right) \quad (2)$$

$$R_x - \frac{j}{\omega C_x} = \frac{R_2 \cdot C_1}{C_3} - \frac{j R_2}{\omega C_3 \cdot R_1} \quad (3)$$

er los términos reales e imaginarios, entonces

$$R_x = R_2 \cdot \frac{C_1}{C_3} \quad (4)$$

$$C_x = C_3 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (5)$$

Las dos variables que se eligen para el ajuste del circuito son el capacitor C1 y la resistencia R2.

El factor de potencia (FP) de una combinación serie RC se define por el coseno del ángulo de fase del circuito. Para ángulos de fase muy cercanos a 90°, la reactancia es casi igual a la impedancia y cabe aproximar el factor de potencia a:

$$FP \approx \frac{R_x}{X_x} = \omega C_x \cdot R_x$$

El factor de disipación en un circuito serie RC se define como la cotangente del ángulo de fase, por definición:

$$D = \frac{R_x}{X_x} = \omega C_x \cdot R_x$$

El factor de calidad se define como:

$$Q = \frac{X}{R}$$



El factor de disipación D , se define como el valor recíproco del factor de calidad, es decir:

$$D = \frac{1}{Q}$$

Este factor determina la calidad del capacitor, por ejemplo cuán cercano está el ángulo de fase del capacitor del valor ideal de 90° .

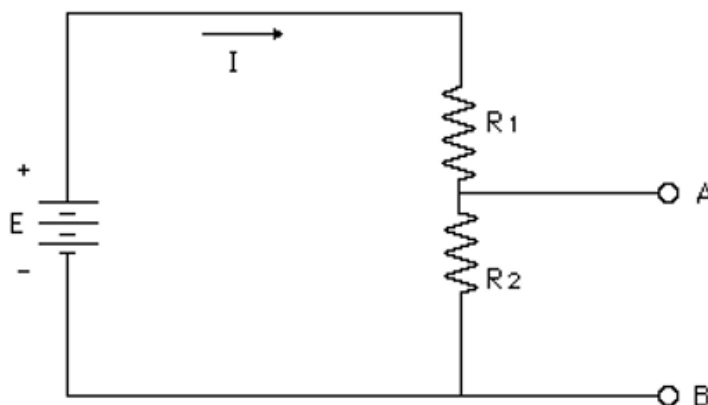


POTENCIÓMETRO DE CORRIENTE CONTINUA

La determinación experimental del valor de una tensión de corriente continua se hace generalmente utilizando un voltímetro o un osciloscopio. Ahora bien, los dos instrumentos mencionados presentan una cierta resistencia interna, más o menos alta, pero finita al fin y al cabo, y por lo tanto modifican en mayor o menor grado el circuito al que son conectados para realizar la medición. Si para una cierta medición se requiere una exactitud elevada, es necesario utilizar algún método que no modifique las características del circuito bajo estudio. Como vimos anteriormente, la forma de conseguir esto es emplear un método de detección de cero.

El *potenciómetro* es un instrumento que se basa en este método para determinar el voltaje entre dos terminales. A continuación vamos a estudiar su principio de funcionamiento.

Supongamos que tenemos un circuito como el de la Figura 1,



Queremos determinar la tensión entre los terminales A y B sin modificar en absoluto la corriente I . Debido a esta última condición, no podemos conectar entre estos puntos ningún instrumento de deflexión que tenga resistencia interna, ya que por grande que ésta sea, modificará la corriente total entregada por la fuente.

Supongamos ahora que tenemos una fuente de poder variable V_f , calibrada con mucha exactitud. Entre los terminales A y B del circuito anterior vamos a conectar dicha fuente y un galvanómetro, como podemos observar en la Figura 2.

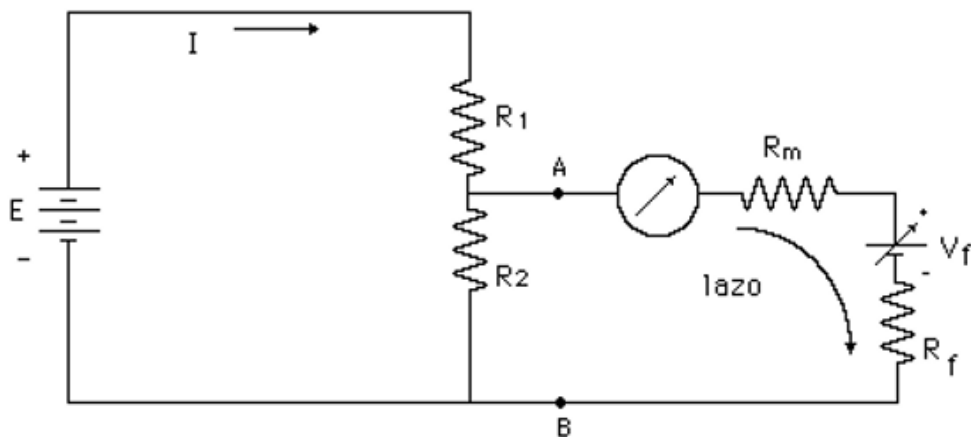


Fig. 2.- Conexión de la fuente V_f y un galvanómetro.

Si variamos la tensión V_f hasta conseguir que la corriente por el galvanómetro sea igual a cero, se cumplirá:

$$V_{AB} = V_f$$

Por lo tanto utilizando este método podemos conocer el valor de V_{AB} con la misma exactitud que el de V_f sin modificar la corriente I . Al no circular corriente por la rama donde se encuentra el galvanómetro, la resistencia interna de éste y la de la fuente de poder V_f no tienen ninguna influencia en la medición.

Ahora bien, una fuente de poder variable, calibrada con mucha exactitud, es difícil de obtener, por lo que en lugar de ella, se utiliza una fuente fija y una resistencia variable de precisión, como podemos observar en la Figura 3.

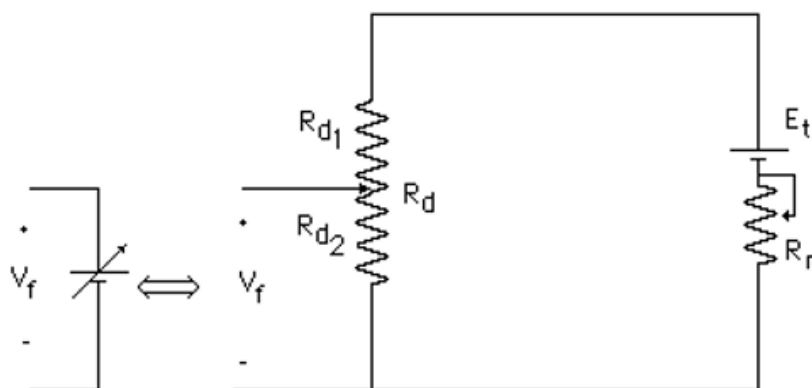


Fig. 3.- Sistema para la fuente variable



E_t es una batería fija, denominada generalmente batería de trabajo.

R_d es una resistencia de precisión con un contacto deslizable.

Por lo general esta resistencia está constituida por un alambre que tiene una resistividad por unidad de longitud conocida y uniforme a lo largo de todo el alambre. Además, anexa al alambre hay una escala calibrada en unidades de longitud, por lo que es sencillo determinar la resistencia existente entre el contacto fijo y el deslizable si conocemos la posición de éste último (mediante la escala mencionada).

R_n es una resistencia de normalización de la que hablaremos más adelante.

Según como hemos especificado el circuito, para seguir teniendo exactitud en la tensión V_f , es necesario que además de la resistencia R_d , la batería de trabajo E_t también sea de precisión. Pero esto nos limitaría a diseñar instrumentos que tuvieran como tensión máxima I de las baterías patrón existentes en el mercado, lo cual restringe mucho las posibilidades de un instrumento que puede ser de mucha utilidad en todas aquellas mediciones de tensión en las que se necesite gran exactitud.

Para ser prácticos, vamos a utilizar como batería de trabajo una batería o fuente continua de uso común, de valor apropiado para que el potenciómetro cubra la gama de valores que deseemos, y además vamos a emplear una batería patrón cuya única condición con respecto a su tensión nominal es que éste se encuentre dentro del rango de valores especificados para el potenciómetro.

Escogemos la resistencia a la que vamos a hacer corresponder la tensión de la batería patrón y colocamos el contacto deslizable en esa posición.

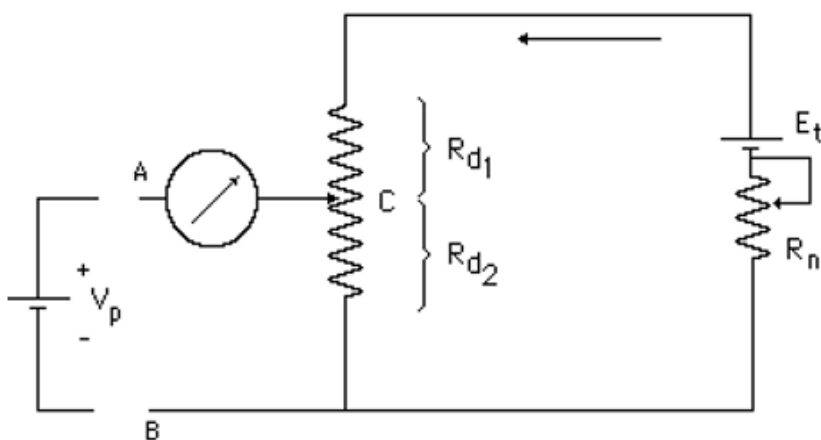


Fig. 4.- Sistema con fuente común y batería patrón.



Conectamos la batería patrón V_p entre los terminales A y B, como podemos observar en la Figura 4, y ajustamos la resistencia R_n , de forma tal que por el galvanómetro no circule corriente. De esta forma hemos fijado la tensión que va a tener el potenciómetro cuando el contacto deslizante esté en la posición C, y como la resistividad de R_d es uniforme a lo largo de toda su longitud, queda determinada automáticamente la tensión del potenciómetro en cualquier otra posición del contacto deslizante.

Como podemos observar la exactitud de la tensión entre los terminales del potenciómetro depende ahora de la resistencia R_d y de la batería patrón, y no del valor de la batería de trabajo.

Veamos un ejemplo. Si contamos con una resistencia R_d de 1 m de longitud y una resistividad de $100 \Omega/\text{cm}$, con una batería patrón de 1821 V y con una fuente de trabajo de 20 V, podemos hacer corresponder la tensión de 1 V con la posición de 10 cm.

Fig. 5.- Ajuste la tensión de referencia.

Al conectar la batería patrón y variar R_n hasta que el galvanómetro indique cero corriente, estamos fijando la corriente i , que acostumbra a llamarse corriente de trabajo. La tensión máxima que podemos medir con este potenciómetro es de 10 V.

Ahora bien, así como hemos hecho corresponder la tensión de 1 V con la posición de 10 cm, podríamos haberlo hecho con cualquier otra posición, por ejemplo con la de 20 cm., con lo cual la tensión máxima sería 5 V, o con la de 2 cm., en cuyo caso la tensión máxima sería 50 V.

Por lo tanto esta configuración del potenciómetro nos permite escoger la escala del mismo según el valor máximo que deseemos medir, siempre y cuando este valor máximo no sea superior al de la batería de trabajo. Al proceso que estamos estudiando se le llama generalmente normalización.

Cuando el potenciómetro que hemos normalizado lo utilizamos para medir una tensión, la corriente que circula por el circuito que contiene la batería de trabajo una vez que el galvanómetro indica cero corriente, es la misma corriente de trabajo fijada durante el proceso de normalización.



Podemos observar además que la escala anexa a la resistencia R_d , que está en unidades de longitud, la podemos calibrar en unidades de tensión, con lo cual la medición es directa.

El esquema completo del Potenciómetro es el mostrado en la Figura 6.

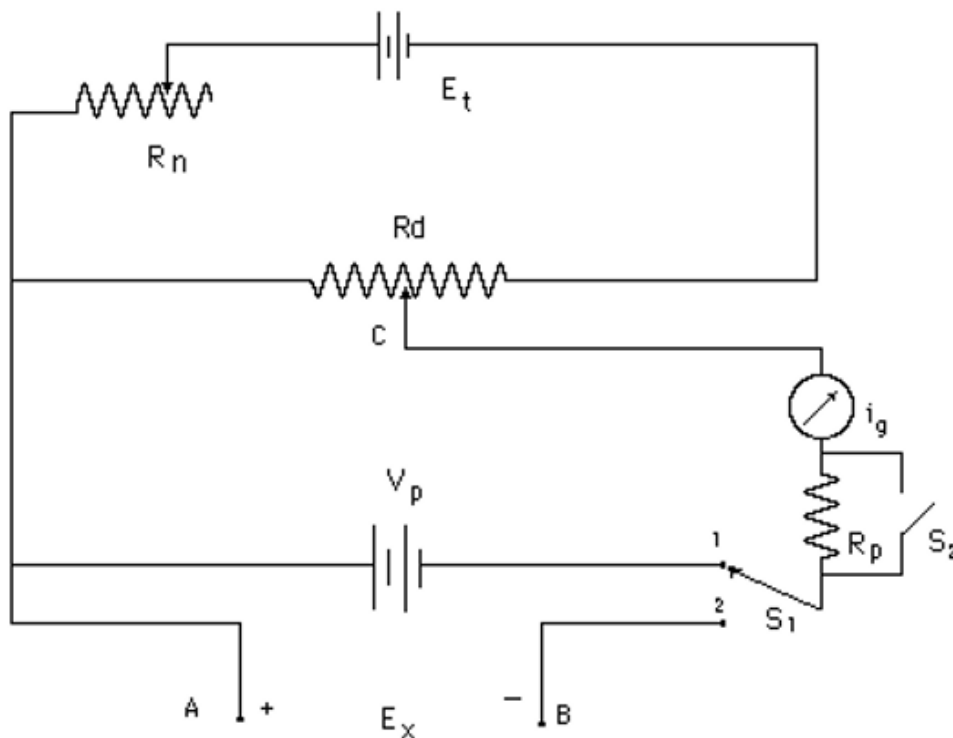


Fig. 6.- Diagrama del Potenciómetro.

Resumiendo:

- Para normalizar el Potenciómetro se coloca el interruptor S_1 en la posición 1 y el contacto deslizante en la posición escogida C , y se ajusta R_n hasta que $i_g=0$.
- Para medir una tensión incógnita E_x se coloca el interruptor S_1 en la posición 2 y se ajusta el contacto deslizante hasta que $i_g=0$. El valor del voltaje buscado se puede leer directamente sobre la escala anexa a R_d .

Cuando se miden varios voltajes con el potenciómetro, es conveniente normalizarlo antes de realizar cada medición. El interruptor S_2 , que cuando está cerrado cortocircuita la resistencia R_p , tiene la siguiente función: Por lo general el galvanómetro que se utiliza en los potenciómetros es muy sensible, por lo que al comenzar a hacer los ajustes de resistencia para obtener $i_g=0$ (bien sea durante el proceso de normalización o el de

medición), es conveniente limitar el valor de i_g con una resistencia de protección R_p , para que una corriente excesiva no dañe dicho galvanómetro.

Una vez que se está cerca del valor de resistencia para el cual se cumple la condición de equilibrio, se puede cortocircuitar R_p cerrando el interruptor S_2 , con lo cual se lleva la sensibilidad del galvanómetro a su máximo, y se pueden realizar los ajustes finales de resistencia con mucha más precisión.

El potenciómetro puede ser muy útil para medir corrientes y resistencias con mucha exactitud, utilizando métodos indirectos.

Para medir con exactitud la corriente que circula por un circuito dado, medimos con el potenciómetro la tensión en una de las resistencias cuyo valor conozcamos con mucha exactitud (o podamos determinarlo posteriormente, utilizando por ejemplo un *punteo de Wheatstone* o el mismo potenciómetro) y calculamos la corriente aplicando la ley de Ohm.

Para medir con exactitud una resistencia incógnita, montamos el circuito mostrado en la Figura 7, donde R_x es la resistencia incógnita y R_p es una resistencia patrón.

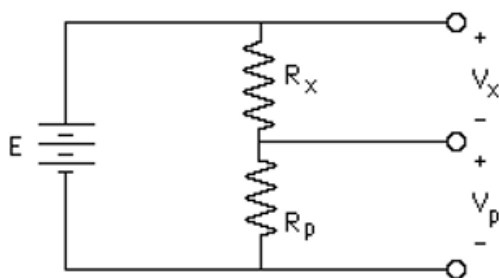


Fig. 7.- Medición de resistencias con el Potenciómetro.

A continuación medimos el voltaje sobre cada una de las resistencias utilizando el potenciómetro, y calculamos el valor de R_x aplicando la relación:

$$R_x = V_x V_p \cdot R_p$$



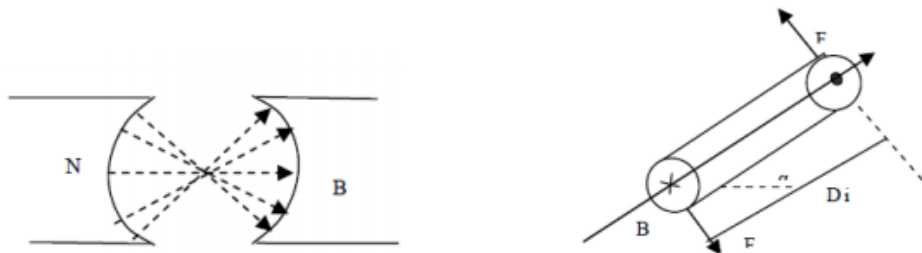
RESUMEN

Tipo de Instrumento	Construcción	Cantidad Primaria Medida	Escala	Para Medir	
IPBM	Bobina móvil en el campo radial uniforme de un imán permanente, dos resortes espirales o de torsión como conexiones y para el contramomento torsional	Valor continuo (medida aritmética)	Lineal	I y U	C.C.
IPBM con rectificador		Valor continuo	Aprox. Lineal	I y U	Sólo para cantidades alternas senoidales
Bobinas en cruz	Bobinas perpendiculares, rígidamente unidas, en el campo no uniforme de un imán permanente, dos conexiones, sin contrapar o contramomento.	$\frac{I_1}{I_2}$	No lineal	$\frac{I_1}{I_2}$	C.C. y C.A. También para cantidades alternas no senoidales
Bobina móvil con termopar	El alambre calefactor del termopar, soldado o en estrecho contacto. La tensión termoeléctrica alimenta la bobina móvil.	Valor eficaz	Casi cuadrática	I y U	C.C. y C.A. También para cantidades alternas no senoidales Altas frecuencias
Hierro dulce	Dos piezas de hierro dulce, una móvil y otra fija y resortes espirales para el contramomento.	Valor eficaz	No lineal	I y U	C.C. y C.A. También para cantidades alternas no senoidales $f < 500 \text{ Hz}$
Electrodinámico	Bobina móvil, bobina fija y dos resortes espirales o de torsión para el contramomento y la conexión, pantalla magnética.	$I_1 \times I_2 \times \cos \varphi$	Cuadrática para I y U, lineal para P	I, U, P y $\cos \varphi$	C.C. y C.A. También para cantidades alternas no senoidales
Electrostático	Una placa móvil y otra fija en el condensador.	Valor eficaz	No lineal	U (desde 100 V)	C.C. y C.A. También para cantidades alternas no senoidales



EXPANSIONES POLARES EN INSTRUMENTOS DE IPBM

A continuación se determinará la deflexión para dos tipos de expansiones polares: radial y uniforme. Campo magnético radial Campo magnético radial producido por las expansiones polares, según se representa en el esquema siguiente:



La bobina dentro de un campo magnético gira un ángulo α . La acción de una línea de inducción magnética paralela al plano de la bobina da como resultado una fuerza igual a:

$$F = ILBN$$

Donde I es la corriente que circula por la bobina, L es la longitud de la bobina, B es la inducción magnética en Tesla y N es el número de espiras de la bobina. Para el sentido de corriente indicado, la dirección de la fuerza se determina por la regla de la mano derecha.

El momento motor es:

$$Mm = FD_i = ILBND_i = KI$$

Donde D_i es el diámetro de la bobina móvil.

La constante K es:

$$K = ILBND_i$$

Si los momentos de inercia y amortiguamiento son nulos, la ecuación se reduce a:

$$Mm = D\alpha$$



La deflexión del índice es:

$$KI = D\alpha$$

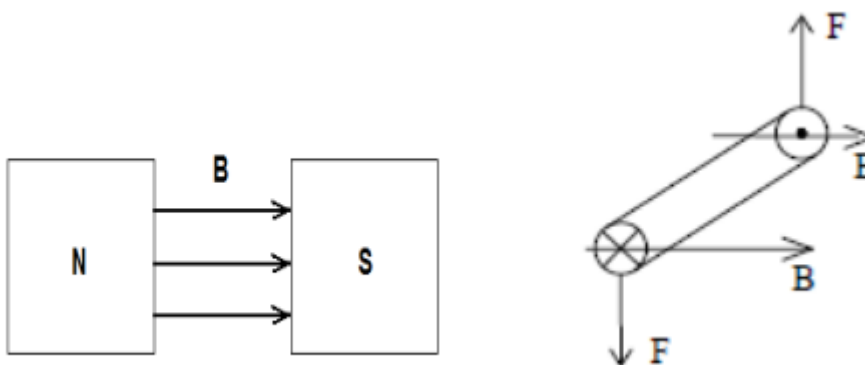
La constante amperométrica es:

$$K_A = \frac{LBND_i}{D}$$

Es evidente que la desviación del índice es directamente proporcional a la intensidad de corriente, obteniéndose una **escala distribuida linealmente**.

Existen también otras líneas de inducción magnética no paralelas al plano de la bobina, descomponiendo estas contribuciones en dirección paralela y perpendicular al plano de la bobina es posible probar que las componentes perpendiculares crean fuerzas que se eliminan de a dos y las componentes perpendiculares son colineales con la fuerza producida por la inducción magnética paralela al plano.

Campo magnético uniforme



En el esquema precedente se muestra un campo magnético de inducción B producido por expansiones polares rectas. Como en el caso anterior, la fuerza está dada por:

$$F = ILBN$$



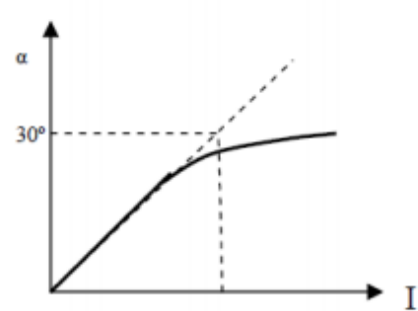
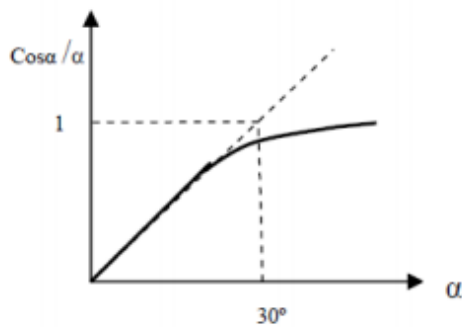
El momento motor es:

$$M_m = F D_i \cos \alpha = I L B N D_i = K I \cos \alpha = D \alpha$$

De donde,

$$\therefore \alpha = K_A I \cos \alpha$$

Para conocer el tipo de escala es conveniente estudiar la variación de $\alpha / \cos \alpha$ en función de α . **La variación es lineal hasta 30° aproximadamente**



Si se busca que α sea grande para corrientes bajas,

$$\frac{\alpha}{\cos \alpha} = K_A I$$

La constante K_A debe ser de mayor magnitud.

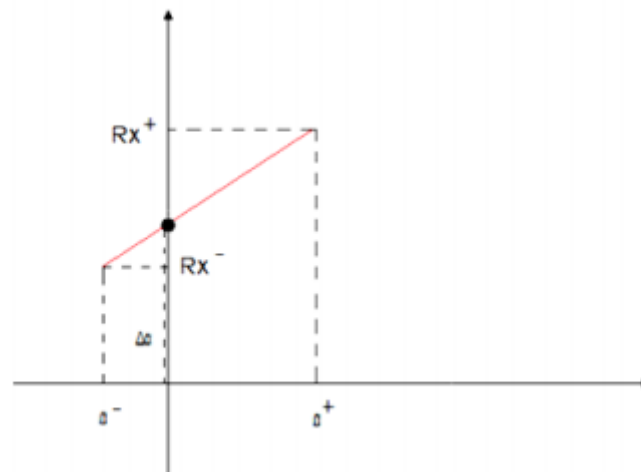
$$K_A = \frac{L B N D_i}{D}$$

Debe cumplirse:

- L y D grandes (mayor peso y tamaño)
- B grande (material más costoso)
- D pequeño (instrumento frágil)



SENSIBILIDAD DEL PUENTE WHEATSTONE



R_x varía linealmente con α

Expresión para determinar la sensibilidad:

$$S = \frac{\Delta \alpha}{\Delta R_x} = \frac{\alpha^+ - \alpha^-}{R_{x^+} - R_{x^-}}$$

$$R_{x^*} = \frac{\Delta \alpha}{S}$$

Variación de la resistencia debido a la dificultad de apreciaciones de fracciones pequeñas.

Expresión para determinar el error:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_{x^*}}{R_x}$$



Puente de 4 décadas

Ejemplo Los valores más próximos al equilibrio son:

- 1956 Ω 7 divisiones α^+
- 1955 Ω -3 divisiones α^-

La sensibilidad es:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta R} = \frac{10 \text{ div}}{1 \Omega}$$
$$\Delta R_x = \frac{-\alpha^-}{S}$$
$$= \frac{-(-3 \text{ div})}{\frac{10 \text{ div}}{\Omega}} = 0,3 \Omega$$

Por interpolación:

$$R_x = R_x + \Delta R_x = 1955 \Omega + 0,3 \Omega = 1955,3 \Omega$$

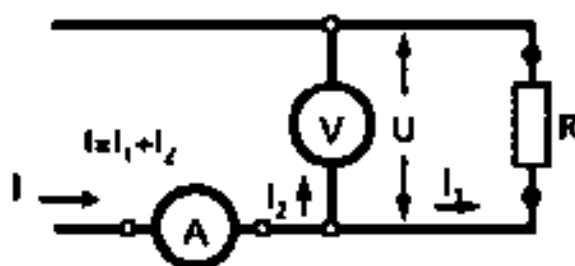


FUNDAMENTOS BÁSICOS DE METROLOGÍA ELÉCTRICA

Circuitos de medición

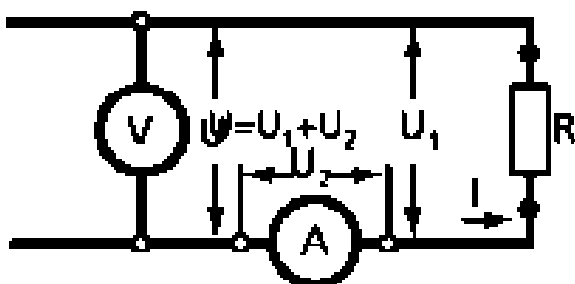
Existen dos circuitos de medición básicos:

1- Tensión bien medida (TBM)



En este caso el amperímetro (A) mide con error, debido a que existe una corriente derivada por la rama donde está conectado el voltímetro (V). El voltímetro mide correctamente la tensión en la carga (R).

2- Corriente bien medida (CBM)

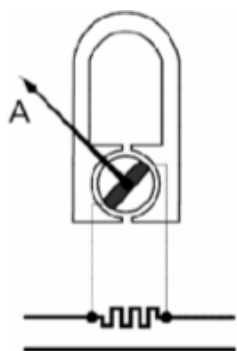


En este caso el voltímetro (V) mide con error, ya que existe una caída de tensión en el amperímetro (A). La tensión medida no corresponde únicamente a la tensión sobre la carga. El amperímetro mide la intensidad de corriente de manera correcta.

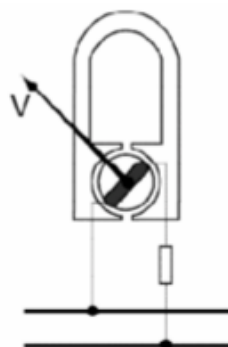


Ampliación del alcance en circuitos de corriente continua

En la imagen se observa la ampliación del rango de medición para un instrumento IPBM como amperímetro (izquierda) y como voltímetro (derecha).



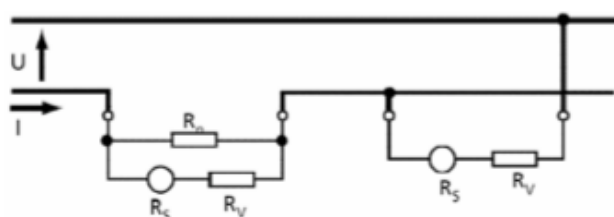
Instrumento magnetoeléctrico para medición en corriente continua utilizado como amperímetro



Instrumento magnetoeléctrico para medición en corriente continua utilizado como voltímetro

A la resistencia utilizada en conjunto con el amperímetro, se la denomina *shunt* y tiene como característica el poder de amplificación (n). A la resistencia que se emplea con el voltímetro para ampliar su rango de medición, se la denomina *multiplicadora* y su característica es el factor de multiplicación (m). El material que se utiliza para la construcción es manganina o constantán. Su valor no se ve afectado por la temperatura (coeficiente α negativo). El procedimiento de cálculo de estas resistencias auxiliares, se desarrollará en clase.

En la siguiente figura se muestran las conexiones y los circuitos internos. En ambos circuitos se conecta una resistencia R_v delante de la bobina móvil (cuya resistencia R_s depende de la temperatura, por ser de alambre de cobre). La resistencia R_v preconnectada es mucho mayor que la de R_s .



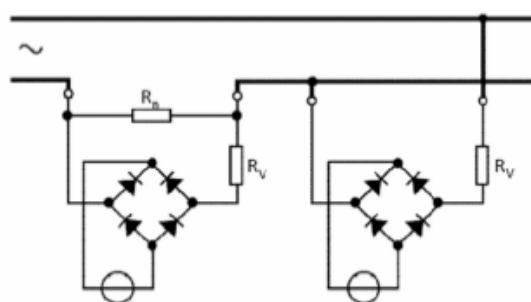
R_v = Resistencia en serie
 R_s = Resistencia de la bobina móvil
 R_n = Resistencia en paralelo



De este modo se consigue mantener dentro de los límites admisibles el error debido a las variaciones de la temperatura.

- En los amperímetros con una resistencia $R_S \sim 1.8 \Omega$, se dispone otra resistencia R_V de forma que $R_S + R_V$ sea, por ejemplo, igual a 6Ω .
- En los voltímetros, la resistencia pre-conectada R_V está dimensionada generalmente de tal manera que la resistencia total interna sea igual a un valor de $1/I$ característico de un instrumento de $1000 \Omega/V$ aproximadamente.
- En los aparatos destinados a fines especiales, por ejemplo para mediciones en circuitos de válvulas o tensiones de pH, dicha resistencia puede ser considerablemente mayor.

Los instrumentos provistos de rectificadores reaccionan a la media aritmética de los valores de la magnitud de medida. Sin embargo, la indicación depende fundamentalmente de las armónicas ya que la escala está graduada para los valores efectivos de la tensión y la corriente sinusoidales.



Conexiones de amperímetros y voltímetros con sistema de medida de bobina móvil y rectificadores

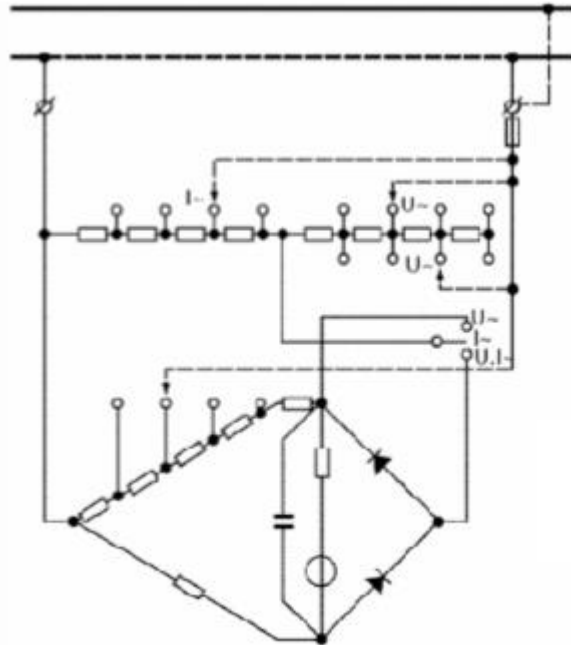
R_V = Resistencia en serie
 R_n = Resistencia en paralelo

Multímetros IPBM

Los instrumentos de campo provistos de bobina móvil y rectificadores de medida son, por regla general, múltiples. En la siguiente figura se muestra el circuito básico de un aparato de este tipo.



Circuito de un multímetro analógico IPBM



A diferencia de los instrumentos IPBM, los de **hierro móvil** se emplean en mediciones de corriente alterna de baja clase, siendo el caso más usual la instalación en tableros eléctricos o pupitres de trabajo. El consumo propio de los instrumentos de hierro móvil es generalmente mayor que el de los instrumentos de bobina móvil de iguales dimensiones, y la graduación de su escala no es lineal. Son robustos y más económicos. Además, como se ha demostrado, responden a verdadero valor eficaz.

Los instrumentos analógicos tienen la ventaja de mostrar un rango de valores, desde el cero de la escala al máximo valor de ésta, lo que a un golpe de vista resulta práctico para obtener información del estado de un fenómeno. Tomemos por caso, un operario que observa una celda de media tensión, encontrará un instrumento de panel (tipo hierro móvil) como amperímetro o voltímetro; la simple visualización del índice ofrece información sobre la instalación: valor cero – primer tercio de escala – dos tercios de escala – máximo o fuera de rango.



Glosario de términos

- **Margen de señalización:** Es el correspondiente a la magnitud eléctrica de entrada de un instrumento de medida. Puede diferir del margen de medida en los dispositivos provistos de resistencias en serie y en paralelo, transformadores o amplificadores de medida.
- **Sensibilidad:** Corresponde al aparato de medida, viene dada por la relación existente entre la variación de las indicaciones (no la del ángulo de desviación) y la modificación de la magnitud de medida ocasionada por aquellas. En la mayoría de los casos, a mayor sensibilidad corresponde un menor consumo propio.
- **Umbral de medida:** Variación de la magnitud de medida que ocasiona, de forma reproducible, un cambio mínimo apreciable en la indicación. Los datos respecto de estos valores suelen ser muy ambiguos en la mayoría de los casos.
- **Punto cero mecánico:** Es el que señala el índice del instrumento de medida en estado de reposo. No tiene que ser necesariamente un punto de la escala. No es necesario que el punto cero de la escala coincida con el punto cero mecánico.
- **Margen de medida:** (de un instrumento indicador o registrador). Viene dado por el margen de valores de la magnitud de medida, dentro del cual el aparato se atiene a los límites de error definidos por la clase correspondiente
- **Margen de indicación:** Comprende toda la escala del instrumento, puede ser más amplio que el margen de medida. Por ejemplo, al principio de la escala cuando la característica no es lineal o al final de la misma tratándose de márgenes de sobrecarga.
- **Medición analógica:** En éstas se puede representar y registrar de forma continua cualquier valor de la magnitud de medida, dentro del margen previsto. Por consiguiente, la señal de medida puede asumir cualquier valor que esté comprendido dentro del margen de señales que corresponda al de la medida.
- **Medición digital:** En éstas se pueden representar únicamente y de forma discontinua, valores discretos de la magnitud de medida con una graduación más o menos fina. El valor de medida viene dado por la suma de pequeños valores parciales y se emite con ayuda de indicadores de cifras o impresores. Como la mayor parte de las magnitudes de medida pueden variar de forma continua, hay



que cuantificarlas primeramente, es decir, dividir las en escalones a los que se ha asignado una señal de medida discreta. Sólo algunos procesos de cómputos, tales como la medida de radiación (cuantos), proporcionan de por sí resultados cuantificados.

La ventaja principal de los métodos de medición digital radica en la posibilidad de almacenar las señales de medida cuantificadas y procesarlas sin que se produzcan errores adicionales.

No siempre es conveniente tender a alcanzar la mayor precisión posible, ya que por lo general los instrumentos resultan tanto más costosos cuanto mayor sea su calidad y, en ocasiones, aumenta su sensibilidad a las perturbaciones. Además, es necesario poner mucha atención en su manejo y al leer los valores indicados, si es que se pretende aprovechar realmente sus propiedades. No siempre el instrumento de medición más costoso es el adecuado. Por ejemplo, si se pretende realizar una medición del valor de resistencia en una aplicación industrial, podrá utilizarse un óhmetro analógico o digital. En cambio, para mediciones de valores bajos de resistencia y en condiciones especiales, como las de ensayos de calibración en laboratorio, se empleará un método de cero.



BIBLIOGRAFÍA

- Packman, E. (1972), Mediciones eléctricas. Buenos Aires: Arbó.
- Miraglia, C. (1981) Instrumentos para mediciones eléctricas. Buenos Aires: Glem.
- Karcz, A. (1971), Electrometría. Tomos I - II. Buenos Aires: Eudeba
- Sobrevila, M. (1986), Ingeniería de la energía eléctrica – Libro III Medidas. Buenos Aires: Marymar
- Apuntes de Cátedra – Medidas Electrónicas I UTN – FRM (2007)

Contacto

Lic. Prof. Ricardo Germán Defrance

ricardo.defrance@inspt.utn.edu.ar

Nota

Este material fue preparado exclusivamente para servir de apoyo de las clases teóricas de la materia Laboratorio de Mediciones.