



TECNOLOGÍA ELÉCTRICA

---

# APARATOS DE MEDICIÓN DE MAGNITUDES ELÉCTRICAS

*GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA*

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTO</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>LA LEY DE OHM</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>MEDICION Y ERROR</b>	<b>8</b>
4.1.	Exactitud y precisión	9
4.2.	Cifras significativas	9
4.3.	Tipos de error	9
4.3.1.	Errores graves	9
4.3.2.	Errores sistemáticos	10
4.3.3.	Errores aleatorios	10
<b>5.</b>	<b>SISTEMAS DE UNIDADES DE MEDICIÓN</b>	<b>11</b>
5.1.	Unidades fundamentales y derivadas	11
5.2.	Sistemas de unidades	12
5.3.	Unidades eléctricas y magnéticas	14
5.4.	Sistema internacional de unidades	17
<b>6.</b>	<b>SIMBOLOGÍA</b>	<b>19</b>
<b>7.</b>	<b>PATRONES DE MEDICIÓN</b>	<b>24</b>
7.1.	Patrones de masa, longitud y volumen	24
	La unidad de volumen es una cantidad derivada y no se representa por medio de un patrón internacional.	25
7.2.	Patrones eléctricos	25
7.2.1.	Patrones de Resistencia	25
7.2.2.	Patrones de Voltaje	26
7.2.3.	Patrones de Capacitancia	26
7.2.4.	Patrones de Inductancia	27
7.3.	Patrones de temperatura e intensidad luminosa	27
7.4.	Patrones IEEE	27
<b>8.</b>	<b>INSRTUMENTOS INDICADORES ELECTROMECAÑICOS</b>	<b>28</b>
8.1.	Galvanómetro en suspensión	28
8.2.	Par y deflexión de un galvanómetro	28
8.2.1.	Comportamiento dinámico	29
8.2.2.	Mecanismos de amortiguamiento	30
8.3.	Mecanismos de bobina móvil e imán permanente	30
8.3.1.	El movimiento de d'Arsonval	30
8.3.	Amperímetro de CC	31
8.4.1.	Resistor de derivación	31

8.4.2.	Derivación de Ayrton	32
8.4.	Voltímetro de CC	33
8.5.1.	Resistencia multiplicadora	33
8.5.2.	Voltímetro de rango múltiple	33
8.6.	Sensibilidad del voltímetro	34
8.6.1.	Régimen ohms por volt	34
8.6.2.	Efecto de carga	34
8.7.	Ohmímetro tipo serie	35
8.8.	Ohmímetro tipo derivación	37
8.9.	Multímetro (VOM)	38
8.10.	Instrumentos indicadores de CA	39
8.10.1.	Electrodinamómetro	39
8.10.2.	Instrumento tipo rectificador	41
8.11.	Termoinstrumentos	43
8.12.	Electrodinamómetros en mediciones de potencia	44
8.13.	Wattthoríemtro	45
8.14.	Medidores de factor de potencia	47
9.	<b>MEDICIONES CON PUENTES</b>	48
8.4.	Puente Wheatstone	49
8.4.1.	Errores de medición	50
8.4.2.	Circuito equivalente Thévenin	50
8.5.	PUENTE KELVIN	52
8.5.1.	Efectos de los alambres de conexión	52
8.5.2.	Puente doble Kelvin	53
8.6.	PUENTE WHEATSTONE CON PROTECCIÓN	54
8.6.1.	Circuitos con protección	54
8.6.2.	Resistencia de tres terminales	55
8.7.	PUENTES DE CA Y SUS APLICACIONES	56
8.8.	PUENTE DE MAXWELL	58
8.9.	PUENTE DE HAY	59
8.10.	PUENTE DE OWEN	61
9.7.	PUENTE DE SCHERING	61
10.	<b>INSTRUMENTOS ELECTRÓNICOS PARA MEDICIÓN DE PARÁMETROS BÁSICOS.</b>	63
10.1.	Medida de corrientes eléctricas. Amperímetros	63
10.2.	Medida de tensión. Voltímetros	63
10.3.	Tenaza voltiamperimétrica	64
10.4.	Tacómetro	65

10.5.	Megohmetro	65
10.6.	Polímetro	66
10.7.	Transformadores de medida	66
10.8.	Transformadores de tensión	66
10.9.	Transformadores de intensidad	67
10.10.	Contadores de energía eléctrica	67
10.11.	Maxímetros	68
10.12.	Galvanómetro	68
10.13.	Osciloscopio	68
11.	BIBLIOGRAFÍA	70

## **1. INTRODUCCIÓN**

La importancia de los instrumentos eléctricos de medición es incalculable, ya que mediante el uso de ellos se miden e indican magnitudes eléctricas, como corriente, carga, potencial y energía, o las características eléctricas de los circuitos, como la resistencia, la capacidad, la capacitancia y la inductancia. Además permiten localizar las causas de una operación defectuosa en aparatos eléctricos en los cuales no es posible apreciar su funcionamiento en una forma visual, como en el caso de un aparato mecánico.

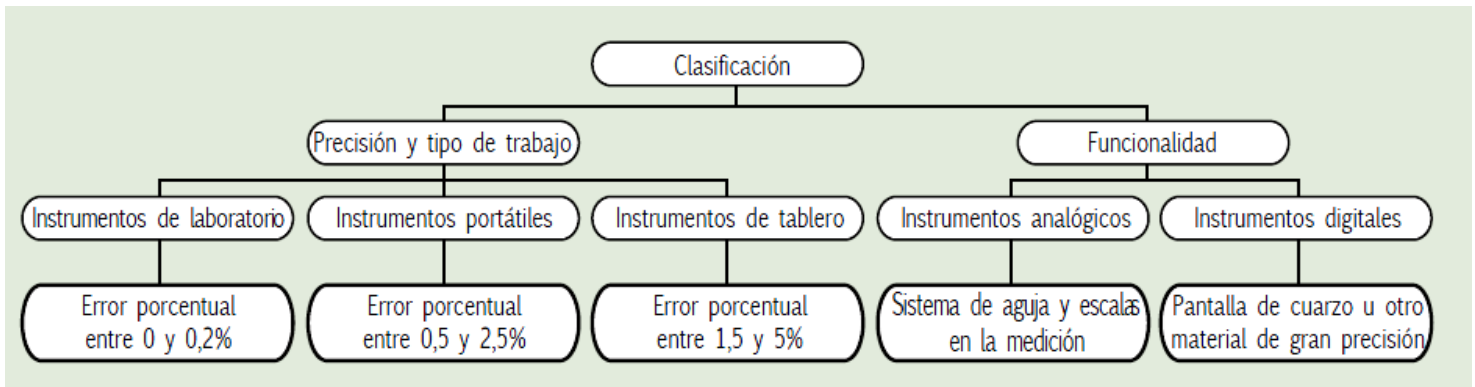
Pero cuando la seguridad constituye una preocupación, elegir un comprobador eléctrico es muy importante. Los ingenieros que analizan la seguridad de los comprobadores descubren que los equipos que fallan son sometidos a una tensión mucho mayor que la que el usuario piensa que está midiendo. Existen accidentes ocasionales cuando el comprobador, especificado para baja tensión (1000 V o menos), es utilizado para medir media tensión, tal como 4160 V. Igual de común, la “patada” eléctrica que voltea a un operario no tiene nada que ver con el uso indebido: es un pico o transitorio de alto voltaje momentáneo que impacta sobre la entrada del comprobador sin advertencia previa. Para proteger al operador contra los transitorios, se debe incorporar seguridad en los equipos de prueba.

Aunque profundizar en la seguridad del operario respecto a los aparatos de medida sea muy importante, voy a centrarme en los aparatos de medición de magnitudes eléctricas. Hablaré sobre los tipos de aparatos que existen, su clasificación, sus características y especificaciones, sobre las magnitudes eléctricas, la simbología, etc.

## **2. FUNDAMENTO**

Los instrumentos de medición son los que hacen posible la observación de cualquier fenómeno físico y su cuantificación en el proceso de medición. Al realizar una medición en el mundo real, los instrumentos no son sistemas ideales, por lo tanto, tienen una serie de limitaciones que se deben tomar en cuenta para poder juzgar si afectan de alguna manera las mediciones que se realizan, y así determinar la veracidad de las mediciones. Durante algunos años, varias sociedades técnicas y organizaciones profesionales han hecho esfuerzos para desarrollar un cuerpo de definiciones y términos que describan de una manera consistente muchas características y especificaciones que se aplican a instrumentos.

Las mediciones eléctricas se realizan con aparatos especialmente diseñados según la naturaleza de la corriente, es decir, si es alterna, continua o pulsante, y la información que estos calculan se da normalmente en una unidad eléctrica estándar: ohmios, voltios, amperios, culombios, henrios, faradios, vatios o julios. Como consecuencia, los instrumentos se clasifican por los parámetros de voltaje, tensión e intensidad:



Clasificación de los instrumentos de medición

Todos los componentes de un circuito eléctrico oponen una cierta resistencia, capacidad e inductancia. La unidad de resistencia usada es el ohmio, que es la resistencia de un conductor en el que una diferencia de potencial de 1 voltio produce una corriente de 1 amperio. Por otra parte, la capacidad de un condensador se mide en faradios: un condensador de 1 faradio tiene una diferencia de potencial entre sus placas de 1 voltio cuando éstas presentan una carga de 1 culombio. La unidad de inductancia es el henrio. Respecto a la bobina, esta tiene una autoinductancia de 1 henrio cuando un cambio de 1 amperio/segundo en la corriente eléctrica que fluye a través de ella provoca una fuerza electromotriz opuesta de 1 voltio. Un transformador, o dos circuitos cualesquiera magnéticamente acoplados, tienen una inductancia mutua de 1 henrio cuando un cambio de 1 amperio por segundo en la corriente del circuito primario induce una tensión de 1 voltio en el circuito secundario.

Dado que todas las formas de la materia presentan una o más características eléctricas es posible tomar mediciones eléctricas de un número ilimitado de fuentes.

Por otra parte, los valores eléctricos no pueden medirse por observación directa. Por ello se utiliza alguna propiedad de la electricidad para producir una fuerza física susceptible de ser detectada y medida. Por ejemplo, en el galvanómetro, el instrumento de medida inventado hace más tiempo, la fuerza que se produce entre un campo magnético y una bobina inclinada por la que pasa una corriente produce una desviación de la bobina. Dado que la desviación es proporcional a la intensidad de la corriente se utiliza una escala calibrada para medir la corriente eléctrica. La acción electromagnética entre corrientes, la fuerza entre cargas eléctricas y el calentamiento causado por una resistencia conductora son algunos de los métodos utilizados para obtener mediciones eléctricas analógicas.

Para asegurar la uniformidad y la precisión de las medidas los medidores eléctricos se calibran conforme a los patrones de medida aceptados para una determinada unidad eléctrica, como el ohmio, el amperio, el voltio o el vatio. Siguiendo este criterio, los patrones principales del ohmio y el amperio se basan en definiciones de estas unidades aceptadas en el ámbito internacional y basadas en la masa, el tamaño del conductor y el tiempo. Por lo tanto, las técnicas de medición que utilizan estas unidades básicas son precisas y reproducibles.

### 3. LA LEY DE OHM

La Ley de Ohm, postulada por el físico y matemático alemán Georg Simon Ohm, se considera el fundamento del análisis de circuitos y dice que: "la intensidad de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo". Se puede expresar mediante la fórmula:

$$I = \frac{V}{R}$$

En donde:

E = La diferencia de potencial entre los dos extremos de un elemento de resistencia (que se mide en volts).

I = La corriente eléctrica que pasa por dicho elemento de resistencia (que se mide en amperes).

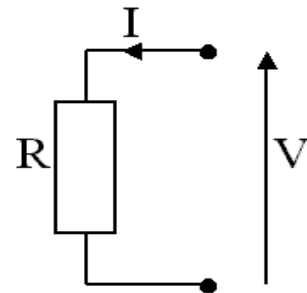
R = La resistencia de dicho elemento (que se mide en ohms).

Para producir un voltaje, primero debe existir un voltaje en la resistencia, el volt, que es la unidad de potencial y se mide con el voltímetro. El ampere es la unidad de la corriente eléctrica y se mide con un amperímetro.

Existen otras dos fórmulas útiles que se pueden derivar de la formula anterior y son:

$$R = \frac{V}{I} ; V = I \cdot R$$

Debido a la existencia de materiales que dificultan más que otros el paso de la corriente eléctrica a través de los mismos, cuando el valor de su resistencia varía, el valor de la intensidad de corriente en ampere también varía de forma inversamente proporcional. Es decir, a medida que la resistencia aumenta la corriente disminuye y, viceversa, cuando la resistencia al paso de la corriente disminuye la corriente aumenta, siempre que para ambos casos el valor de la tensión o voltaje se mantenga constante.



Una manera fácil de recordar la ley de Ohm es mediante el triángulo equilátero de la ley de Ohm

#### **4. MEDICION Y ERROR**

El proceso de medición requiere el uso de un instrumento como medio físico para determinar la magnitud de una variable. Los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humanas y permiten a las personas determinar el valor de una cantidad desconocida de la cual no podría medirse utilizando solamente las facultades sensoriales. Por lo tanto, un instrumento se puede definir así: dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable. El instrumento electrónico, como indica su nombre, se basa en principios eléctricos o electrónicos para efectuar una medición. Un instrumento electrónico puede ser un aparato sencillo y de construcción simple, como el medidor básico de corriente directa.

El trabajo de medición emplea una serie de términos, que son:

- Instrumento: es el dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable.
- Exactitud: es la aproximación con la cual la lectura de un instrumento se acerca al valor real de la variable medida.
- Precisión: es una medida del grado con el cual las mediciones sucesivas difieren una de otra.
- Sensibilidad: es la relación de la señal de salida o respuesta del instrumento respecto al cambio de la entrada o variable medida.
- Resolución: es el cambio más pequeño en el valor medido al cual responde el instrumento
- Error: desviación a partir del valor real de la variable medida.

Se puede utilizar varias técnicas para minimizar los efectos de los errores, como efectuar mediciones de precisión es más recomendable realizar una serie de ensayos que confiar en una sola observación. Alternar métodos de medición, como el uso de diferentes instrumentos en el mismo experimento, es una buena alternativa para aumentar la exactitud. Aunque estas técnicas tienden a aumentar la precisión de las mediciones mediante la reducción de errores ambientales, no evitan el error instrumental.

A continuación explicare los diferentes tipos de error en las mediciones y los métodos que generalmente se usan para expresar los errores, en términos de los valores más confiables de las mediciones de la variable de medida.



#### **4.1. Exactitud y precisión**

La exactitud se refiere al grado de aproximación al valor real de la cantidad medida. Por otra parte, la precisión es el grado de concordancia dentro de un grupo de mediciones o instrumentos.

La precisión se compone de dos características: la conformidad y el número de cifras significativas con las cuales puede realizar la medición. Aunque no haya desviaciones del valor obtenido por el aparato, el error creado por las limitaciones de escala es un error de precisión. Una buena técnica de medición requiere un continuo escepticismo respecto a la exactitud de los resultados.

#### **4.2. Cifras significativas**

Una indicación de lo preciso de las mediciones se obtiene a partir del número de cifras significativas con las cuales se expresan los resultados. Estas cifras proporcionan información real relativa a la magnitud y precisión de las mediciones de una cantidad. El aumento de la cantidad de cifras significativas incrementa la precisión de una medición. Cuando un número de mediciones independientes se toman con intención de obtener la mejor respuesta posible (la más cercana al valor real), el resultado se suele expresar con la media aritmética de las lecturas, con el posible intervalo de error, como la mayor desviación de lo obtenido. Cuando se suman dos o más mediciones con diferentes grados de exactitud, el resultado es tan exacto según lo sea la medición menos exacta. Por otra parte, el número de cifras significativas en una multiplicación se puede incrementar rápidamente, pero solo las cifras apropiadas se presentan en la respuesta.

#### **4.3. Tipos de error**

Ninguna medición se puede realizar con una exactitud perfecta, pero es importante saber cuál es la exactitud real y como se generan los diferentes errores en las mediciones. Un estudio de los errores es el primer paso al buscar modos para reducirlos con el fin de establecer la exactitud de los resultados finales.

Los errores pueden provenir de diferentes fuentes y se clasifican en tres categorías:

##### **4.3.1. Errores graves**

Se deben a fallos humanos en la lectura o en la utilización de los instrumentos, así como en el registro y cálculo de los resultados de las mediciones. Cuando el hombre participa en las mediciones se comete inevitablemente algunos errores graves. Aunque es imposible la eliminación total de éstos se debe intentar anticiparlos y corregirlos. Un error común y frecuente entre principiantes es el uso inapropiado de un instrumento.

Un gran número de errores son debidos a descuidos o malos hábitos, como lecturas inapropiadas de un instrumento, registro de los resultados en forma diferente a las lecturas obtenidas o ajuste incorrecto de los instrumentos.

Otro error grave puede ocurrir cuando el instrumento no está ajustado a cero antes de tomar la medición; entonces todas las lecturas estarán mal. Errores como estos no se pueden tratar a nivel matemático, se vitan teniendo cuidado en la lectura y registro de los datos de medición. Una buena práctica es efectuar más de una lectura de la misma cantidad, como mínimo tres.

#### 4.3.2. Errores sistemáticos

Se dividen en dos categorías:

- Los **errores instrumentales**, referentes a los defectos de los instrumentos, son inherentes a los instrumentos de medición a causa de su estructura mecánica. Una forma rápida y fácil de verificar un instrumento es compararlo con otro de las mismas características o con uno más exacto.

Estos errores se pueden evitar de varias maneras: una es seleccionar el instrumento adecuado para la medición particular, otra es aplicar los factores de corrección después de definir la cantidad del error instrumental, y la última es calibrar el instrumento con un patrón.

- Los **errores ambientales** se deben a las condiciones externas que afectan a la operación del dispositivo de medición incluyendo los efectos de cambio de temperatura, humedad, presión barométrica o de campos magnéticos y electrostáticos. Las medidas correctivas para reducir estos efectos incluyen aire acondicionado sellado y hermético en algunos componentes del instrumento, aislar el equipo de campos magnéticos, etc.

#### 4.3.3. Errores aleatorios

Se deben a causas desconocidas y ocurren incluso cuando todos los errores sistemáticos se han considerado. La única forma de compensar estos errores es aumentar el número de lecturas y usar medios estadísticos para obtener la mejor aproximación del valor real de la cantidad medida.

## 5. SISTEMAS DE UNIDADES DE MEDICIÓN

### 5.1. Unidades fundamentales y derivadas

Para especificar y hacer cálculos con cantidades físicas, estas se deben definir tanto en clase como en magnitud. La medida estándar de cada clase de cantidad física es la unidad; el número de veces que la unidad ocurre en algún valor dado de la misma cantidad es el número de medida. Por ejemplo, cuando hablamos de una distancia de 100 metros, sabemos que el metro es la unidad de longitud y que el número de unidades de longitud es cien. La cantidad física, longitud, se define por la unidad metro. Sin la unidad, el número de medida no tiene significado físico.

En la ciencia y la ingeniería se utilizan dos tipos de unidades: unidades fundamentales y unidades derivadas. Las **unidades fundamentales** en mecánica son medidas de longitud, masa y tiempo. Las medidas de las unidades fundamentales, ya sea pie o metro, libra o kilogramo, segundo u hora, son arbitrarias y se pueden seleccionar para ajustarlas a un cierto conjunto de circunstancias. Puesto que longitud, masa y tiempo son fundamentales para la mayor parte de otras cantidades físicas además de las de mecánica, son llamadas unidades fundamentales primarias. Las medidas de ciertas cantidades físicas en las disciplinas de calorimetría, electricidad y de iluminación son también representadas por las unidades fundamentales. Estas unidades se usan únicamente cuando estas clases particulares son referidas y por tanto, se definen como unidades fundamentales secundarias o auxiliares.

Todas aquellas unidades que se pueden expresar en términos de unidades fundamentales se llaman unidades derivadas. Cada unidad derivada se origina de alguna ley física que define esa unidad. Una **unidad derivada** se reconoce por sus dimensiones, las cuales se pueden definir por la fórmula algebraica completa para la unidad derivada. Los símbolos dimensionales para las unidades fundamentales de longitud, masa y tiempo son L, M y T. Las fórmulas dimensionales de las unidades derivadas son particularmente útiles para convertir las unidades de un sistema a otro.

Por conveniencia, a algunas unidades derivadas se les han dado nuevos nombres, como por ejemplo la unidad derivada de la fuerza, que en el SI es el newton (N), en lugar de utilizar el nombre dimensional correcto que es  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ .

## 5.2. Sistemas de unidades

En 1970 el gobierno francés ordenó a la directiva de la Academia Francesa de Ciencias estudiar y proponer un sistema único de pesas y medidas para reemplazar todos los sistemas existentes.

Los científicos franceses decidieron como primer principio que un sistema universal de pesas y medidas no debería depender de patrones hechos por el hombre, sino basarse en medidas permanentes provistas por la naturaleza. Por consiguiente, se escogió como unidad de longitud al metro, definiéndolo como la diezmillonésima parte de la distancia desde el polo al ecuador a lo largo del meridiano que pasa a través de París. Como unidad de masa escogieron la masa de un centímetro cúbico de agua destilada a 4 °C, a la presión atmosférica normal (760 mm Hg) y le dieron el nombre de gramo. Para la tercera unidad, la unidad de tiempo, decidieron emplear el segundo tradicional definiéndolo como 1/86400 del día solar medio.

Como segundo principio decidieron que todas las otras unidades se deberían derivar de las tres unidades fundamentales; longitud, masa y tiempo y propusieron el tercer principio con el que se propuso que los múltiplos y submúltiplos de las unidades básicas fueran en el sistema decimal, diseñando el sistema de prefijos en uso hoy en día.

Factor	Nombre	Símbolo	Factor	Nombre	Símbolo
$10^1$	deca	da	$10^{-1}$	deci	d
$10^2$	hecto	h	$10^{-2}$	centi	c
$10^3$	kilo	k	$10^{-3}$	mili	m
$10^6$	mega	M	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^9$	giga	G	$10^{-9}$	nano	n
$10^{12}$	tera	T	$10^{-12}$	pico	p
$10^{15}$	peta	P	$10^{-15}$	femto	f
$10^{18}$	exa	E	$10^{-18}$	atto	a
$10^{21}$	zetta	Z	$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y	$10^{-24}$	yocto	y

Múltiplos y submúltiplos decimales

Las propuestas de la Academia Francesa fueron aprobadas e introducidas como el Sistema Métrico de Unidades de Francia en 1795. El sistema métrico despertó considerable interés en otras partes del mundo y finalmente, en 1875, 17 países firmaron la llamada Convención del Metro, adoptando legalmente el sistema métrico de unidades. Sin embargo, aunque Gran Bretaña y Estados Unidos, firmaron la convención, reconocieron su legalidad únicamente en transacciones internacionales y no aceptaron el sistema métrico para uso domestico.

Gran Bretaña había estudiado un sistema de unidades eléctricas, y la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia decidió que el centímetro y el gramo fueran las

unidades fundamentales de longitud y masa. Se desarrolló el sistema CGS (centímetro-gramo-segundo) o sistema absoluto de unidades, utilizado por los físicos de todo el mundo. Al surgir complicaciones cuando el sistema CGS se extendió a las magnitudes eléctricas y magnéticas a causa de la necesidad de introducir una unidad más en el sistema. Por esta razón se establecieron dos sistemas paralelos:

- En el sistema electrostático CGS se dividió la unidad de carga eléctrica del centímetro, gramo y segundo, asignando el valor 1 a la permitividad del vacío según la ley de Coulomb para la fuerza entre las cargas eléctricas.
- En el sistema electromagnético CGS las unidades básicas son las mismas y la unidad de fuerza de polo magnético se deriva asignando 1 como valor de la permitividad del espacio vacío en la fórmula del cuadrado inverso para la fuerza entre polos magnéticos (ley de Ampère).

Las unidades derivadas para la corriente eléctrica y el potencial en los sistemas electromagnéticos, son el ampere y el volt, se usan en las mediciones prácticas. Estas unidades y sus correspondientes derivados, como el coulomb, ohm, henry, farad, etc., se incorporan en un tercer sistema llamado sistema práctico.

Cada uno de ellos contiene las constantes de proporcionalidad  $k^1$  y  $k^2$ . La definición estática de campo magnético tiene otra constante  $\alpha$ . Las dos primeras constantes se relacionan entre sí a través de la velocidad de la luz,  $C$  (la razón entre  $k^1$  y  $k^2$  debe ser igual a  $C^2$ ).

$k_1$	$k_2$	$\alpha$	Sistema
1	$1/c^2$	1	CGS electrostático
$c^2$	1	1	CGS electromagnético
1	$1/c^2$	$1/c$	CGS Gausiano
$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	$\frac{\mu_0}{4\pi}$	1	SI

### 5.3. Unidades eléctricas y magnéticas

Las unidades prácticas eléctricas y magnéticas, tales como el volt, ampere, ohm, henry, etc., se derivaron del sistema CGS de unidades. El **sistema electroestático CGS (CGSe)** se basa en experimentos derivados de la ley experimental de Coulomb para la fuerza entre dos cargas eléctricas. La ley de Coulomb establece que,

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Donde:

- F = fuerza entre las cargas expresada en g·cm/s<sup>2</sup>
- k = constante de proporcionalidad.
- Q<sub>1-2</sub> = cargas eléctricas expresadas en statC.
- r = separación entre las cargas expresadas en cm.

Coulomb descubrió que el factor de proporcionalidad k dependía del medio, y que variaba inversamente a su permitividad  $\varepsilon$ . Entonces la ley de Coulomb es:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\varepsilon \cdot r^2}$$

Puesto que  $\varepsilon$  es un valor numérico que depende del medio, se le asigna un valor de 1 a la permitividad del espacio vacío,  $\varepsilon_0$ , definiéndolo así como la cuarta unidad fundamental del sistema CGSe. Entonces la ley de Coulomb facilitó determinar la unidad de carga eléctrica Q en términos de sus cuatro unidades fundamentales por la relación:

$$dina = \frac{g \cdot cm}{s^2} = \frac{Q^2}{(\varepsilon_0 = 1) \cdot cm^2}$$

Por lo tanto,  $Q = cm^{\frac{3}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-1}$ , a la unidad de carga eléctrica se le dio el nombre de estatcoulomb.

La unidad derivada de carga eléctrica en el sistema CGSe de unidades permitió determinar otras unidades eléctricas por su definición de ecuaciones. Por ejemplo, la corriente eléctrica (I) se define como la velocidad del flujo de carga eléctrica y se expresa como

$$I = \frac{Q}{t} \left( \frac{estatcoulomb}{seg} \right)$$

A la unidad de corriente eléctrica en el sistema CGSe se le dio el nombre de estatampere. La fuerza de campo eléctrica, E, diferencia de potencial, V, y capacitancia, C, se derivan de su definición de ecuaciones.

La base del **sistema electromagnético CGS de unidades (CGSm)** es determinada experimentalmente de la ley de Coulomb para la fuerza entre dos polos magnéticos, que establece:

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

El factor de proporcionalidad  $k$ , depende del medio en el cual se conectan los polos, el cual varía inversamente con la permeabilidad  $\mu$  magnética del medio. Al factor  $k$  se le asignó el valor 1 para la permeabilidad del espacio vacío,  $\mu_0$ , de manera que  $k = 1/\mu_0 = 1$ . Se establece entonces la permeabilidad del espacio vacío,  $\mu_0$ , como la cuarta unidad fundamental del sistema CGSm. La unidad electromagnética derivada de la fuerza polar se definió por la relación:

$$dina = \frac{g \cdot cm}{s^2} = \frac{m^2}{(\mu_0 = 1) \cdot cm^2}$$

Por lo tanto, dimensionalmente,  $m = cm^{\frac{3}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-1}$

La unidad derivada de fuerza polar magnética en el sistema CGSm determina otras unidades magnéticas, mediante la definición de sus ecuaciones:

- Densidad del flujo magnético (símbolo  $B$ ), se define como la fuerza magnética por unidad de fuerza polar. Dimensionalmente,  $B$ , es equivalente a  $cm^{\frac{-1}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-1}$  y recibe el nombre de gauss.
- Flujo magnético (símbolo  $\Phi$ ) recibe el nombre de maxwell
- Diferencia de potencial magnético o fuerza magnetomotriz (símbolo  $U$ ) se llama gilbert.

Cantidad y símbolo	Unidad SI			Factores de conversión	
	Nombre y símbolo	Definición de ecuación*		CGSm	CGSe*
Corriente eléctrica, $I$	ampere A	$F_1 = 10^{-7} l^2 \frac{dN}{dz}$		10	10/c
Fuerza electromotriz, $E$	volt V	$p = IE$		$10^{-8}$	$10^{-8}c$
Potencial, $V$	volt V	$p = IV$		$10^{-8}$	$10^{-8}c$
Resistencia, $R$	ohm $\Omega$	$R = V/I$		$10^{-9}$	$10^{-9}c$
Carga eléctrica, $Q$	coulomb C	$Q = It$		10	10/c
Capacitancia, $C$	farad F	$C = Q/V$		$10^9$	$10^9/c^2$
Intensidad de campo eléctrico, $E$	—	V/m	$E = V/l$	$10^{-4}$	$10^{-6}c$
Densidad de flujo eléctrico, $D$	—	C/m <sup>2</sup>	$D = Q/l^2$	$10^5$	$10^5/c$
Permitividad, $\epsilon$	—	F/m	$\epsilon = D/E$	—	$10^{11}/4\pi c^2$
Intensidad de campo magnético, $H$	—	A/m	$\oint H dl = nI$	$10^{34}$	—
Flujo magnético, $\Phi$	weber Wb	$E = d\Phi/dt$		$10^{-8}$	—
Densidad de flujo magnético, $B$	tesla T	$B = \Phi/l^2$		$10^{-4}$	—
Inductancia, $L, M$	henry H	$M = \Phi/I$		$10^{-9}$	—
Permeabilidad, $\mu$	—	H/m	$\mu = B/H$	$4\pi \times 10^{-7}$	—

Unidades eléctricas y magnéticas

A continuación pasaré a describir las unidades eléctricas:

**Culombio (C, unidad de carga eléctrica):** Esta unidad, que no puede derivarse de las unidades de la mecánica, fue originalmente denominada coulomb en honor a Charles Agustin De Coulomb, el primero que midió directamente la fuerza entre cargas eléctricas. Se define como la cantidad de carga eléctrica que fluye durante 1 segundo a través de la sección de un conductor que transporta una intensidad constante de corriente eléctrica de 1 amperio:

$$C = A \cdot s$$

**Voltio (V, unidad de potencial eléctrico y fuerza electromotriz):** Se define como la diferencia de potencial a lo largo de un conductor cuando una corriente con una intensidad de un amperio utiliza un vatio de potencia.

$$V = \frac{J}{C} = \frac{m^2 \cdot kg}{s^3 \cdot A}$$

**Amperio (A, corriente):** es la unidad del Sistema Internacional para la intensidad de corriente eléctrica. Fue nombrado en honor de André Marie Ampère. Un amperio es la intensidad de corriente que, al circular por dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y separados entre sí en el vacío a lo largo de una distancia de un metro, produce una fuerza entre los conductores de  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton por cada metro de conductor.

$$A = \frac{C}{s}$$

**Ohmio ( $\Omega$ , unidad de resistencia eléctrica)**

Un ohmio es la resistencia eléctrica que existe entre dos puntos de un conductor cuando una diferencia de potencial constante de 1 voltio aplicada entre estos dos puntos produce, en dicho conductor, una corriente de intensidad 1 amperio, cuando no haya fuerza electromotriz en el conductor:

$$\Omega = \frac{V}{A} = \frac{m^2 \cdot kg}{s^3 \cdot A^2}$$

**Siemens (S, unidad de conductancia eléctrica):** un siemens es la conductancia eléctrica que existe entre dos puntos de un conductor que tiene un ohmio de resistencia

$$S = \frac{1}{\Omega}$$

**Faradio (F, unidad de capacidad eléctrica):** un faradio es la capacidad de un capacitor entre cuyas armaduras aparece una diferencia de potencial eléctrico de 1 voltio cuando está cargado de una cantidad de electricidad igual a un culombio.



$$F = \frac{A \cdot s}{V} = \frac{C}{V} = \frac{C^2}{J} = \frac{C^2}{N \cdot m} = \frac{s^2 \cdot C^2}{m^2 \cdot kg} = \frac{s^4 \cdot A^2}{m^2 \cdot kg}$$

**Tesla (T, unidad de densidad de flujo magnético e inductividad magnética):** un tesla es la inducción magnética uniforme que, repartida normalmente sobre una superficie de un metro cuadrado, produce a través de esta superficie un flujo magnético total de 1 weber.

$$T = \frac{Wb}{m^2} = \frac{V \cdot s}{m^2} = \frac{kg}{s^2 \cdot A}$$

**Weber (Wb, unidad de flujo magnético):** un weber es el flujo magnético que, al atravesar un circuito de una sola espira, produce en la misma fuerza electromotriz de un voltio si se anula dicho flujo en un segundo por decrecimiento uniforme.

$$Wb = V \cdot s = T \cdot m^2 = \frac{m^2 \cdot kg}{s^2 \cdot A}$$

**Henrio (H, unidad de inductancia):** un henrio es la inductancia de un circuito en el que una corriente que varía a razón de un amperio por segundo da como resultado una fuerza electromotriz autoinducida de un voltio.

$$H = \frac{V \cdot s}{A} = \frac{m^2 \cdot kg}{s^2 \cdot A^2}$$

**Vatio (W):** el vatio es la unidad del sistema internacional de unidades (SI) para la potencia eléctrica.

$$W = \frac{J}{s} = \frac{N \cdot m}{s} = \frac{m^2 \cdot kg}{s^3}$$

#### 5.4. Sistema internacional de unidades

El sistema internacional MKSA de unidades se adoptó en 1960 que la Décimo Primera Conferencia General de Pesas y Medidas bajo el nombre de Sistema Internacional de Unidades (SI). Las seis cantidades fundamentales SI están numeradas en la tabla siguiente. Las unidades derivadas se expresan en términos de estas seis unidades básicas mediante la definición de ecuaciones.

En este Sistema (SI) las unidades de medida se dividen en tres grupos:

- Las unidades fundamentales, que son aquellas que no se componen de otras unidades
- Las unidades complementarias que son las que no se derivan de una magnitud física pero son necesarias para su comprensión

- Las unidades derivadas que son todas las que se componen de dos o más unidades fundamentales.

Podemos decir entonces, que la creación del SI es el resultado de una larga historia en donde un gran número de personas – científicos, ingenieros y políticos– han aportado su contribución, estimulados por las exigencias crecientes de una sociedad en evolución. El SI es un sistema adaptado a las necesidades de la ciencia, de la tecnología, de la industria y del comercio y su adopción implica la obligación de conformarse cuidadosamente a la notación, a los símbolos y a las reglas adoptadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas. De lo expuesto se comprende la importancia que tiene conocer los diferentes aspectos relacionados con el uso correcto del SI para expresar los resultados obtenidos en las mediciones de las diversas magnitudes físicas.

Cantidad	Símbolo de la ecuación	Dimensión	Unidad	Símbolo de la unidad
<b>Fundamental</b>				
Longitud	$l$	L	metro	m
Masa	$m$	M	kilogramo	kg
Tiempo	$t$	T	segundo	s
Corriente eléctrica	$I$	I	ampere	A
Temperatura termodinámica	$T$	$\Theta$	kelvin	K
Intensidad luminosa			candela	cd
<b>Complementarias*</b>				
Angulo plano	$\alpha, \beta, \gamma$	$[L]^0$	radián	rad
Angulo sólido	$\Omega$	$[L]^2$	esterorradián	sr
<b>Derivadas</b>				
Area	$A$	$L^2$	metro cuadrado	$m^2$
Volumen	$V$	$L^3$	metro cúbico	$m^3$
Frecuencia	$f$	$T^{-1}$	hertz	Hz (1/s)
Densidad	$\rho$	$L^{-3}M$	kilogramo por metro cúbico	$kg/m^3$
Velocidad	$v$	$LT^{-1}$	metro por segundo	m/s
Velocidad angular	$\omega$	$[L]^0T^{-1}$	radián por segundo	rad/s
Aceleración	$a$	$LT^{-2}$	metro por segundo al cuadrado	$m/s^2$
Aceleración angular	$\alpha$	$[L]^0T^{-2}$	radián por segundo al cuadrado	$rad/s^2$
Fuerza	$F$	$LMT^{-2}$	newton	N ( $kg\ m/s^2$ )
Presión, esfuerzo	$p$	$L^{-1}MT^{-2}$	newton por metro cuadrado	$N/m^2$
Trabajo, energía	$W$	$L^2MT^{-2}$	joule	J ( $N\ m$ )
Potencia	$P$	$L^2MT^{-3}$	watt	W (J/s)
Cantidad de electricidad	$Q$	TI	coulomb	C (A s)
Fuerza electromotriz, diferencia de potencial	$V$	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	volt	V (W/A)
Intensidad de campo eléctrico	$E, \varepsilon$	$LMT^{-3}I^{-1}$	volt por metro	V/m
Resistencia eléctrica	$R$	$L^2MT^{-3}I^2$	ohm	$\Omega$ (V/A)
Capacitancia eléctrica	$C$	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	farad	F (A s/V)
Flujo magnético	$\Phi$	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	weber	Wb (v s)
Intensidad de campo magnético	$H$	$L^{-1}I$	ampere por metro	A/m
Densidad de flujo magnético	$B$	$MT^{-2}I^{-1}$	tesla	T (Wb/m <sup>2</sup> )
Inductancia	$L$	$L^2MT^{-2}I^2$	henry	H (V s/A)
Fuerza magnetomotriz	$U$	I	ampere	A
Flujo luminoso			lumen	lm (cd sr)
Luminancia			candela por metro al cuadrado	$cd/m^2$
Iluminación			lux	lx (lm/m <sup>2</sup> )

Unidades fundamentales, complementarias y derivadas

## 6. SIMBOLOGÍA

Varias razones promueven el uso de los instrumentos analógicos para las mediciones eléctricas, ya sea por las características que reúnen, como por sus ventajas y múltiples aplicaciones. Presentan una amplia gama con distintos estilos de carcasa y especificaciones, sus mediciones permiten visualizar parámetros eléctricos y electrónicos, y son aparatos de gran fiabilidad bajo condiciones severas de trabajo. Entre sus beneficios se destacan su bajo costo, su precisión razonable, la facilidad de la instalación y el escaso mantenimiento, como así también la mínima capacitación que debe recibir un operario para hacer uso de estos aparatos. Sus aplicaciones van de conmutadores de alta tensión y paneles de control a sistemas de distribución, grupos electrógenos, administración de energía en general y en edificios, control de procesos y de motores, etc.

Sin embargo, los aparatos para mediciones eléctricas que poseen el mismo diseño no son fácilmente distinguibles entre sí. Para diferenciar todos estos instrumentos, es posible efectuar una clasificación mediante símbolos de validez internacional, perfectamente comprensible más allá del idioma y la ubicación geográfica.










Para ello existe una simbología normalizada (en España, mediante la norma UNE 21318-78) que tiene en cuenta una serie de parámetros que caracterizan a cada instrumento de medición eléctrica. Dichos parámetros, todos inherentes al aparato, son los siguientes:

- A. Magnitud eléctrica que mide.
- B. Clase de corriente.
- C. Seguridad en la manipulación.
- D. Posición de funcionamiento.
- E. Clase de precisión.
- F. Mecanismo de funcionamiento.

Todos estos parámetros se imprimen en la esfera de medición, generalmente, aunque no siempre, en el ángulo inferior izquierdo del aparato.

A continuación mostraré en tablas los símbolos de uso más común que podemos encontrar en los instrumentos analógicos para mediciones eléctricas, agrupados de acuerdo con la clasificación normalizada de los parámetros anteriormente citados.







**A. Magnitud eléctrica:** es la única que se imprime en forma independiente de los demás parámetros y sobre cualquier ángulo o el centro de la esfera del aparato. En la práctica, la letra que diferencia cada aparato no necesariamente está rodeada por un círculo o rectángulo.

Magnitud	Aparato	Unidad de medida	Símbolo
Voltaje o tensión	Voltímetro	voltio (V)	
Intensidad	Amperímetro	ampere (A)	
Potencia activa	Vatímetro	vatio (W)	
Potencia reactiva	Varímetro	Voltamperio reactivo (VAr)	
Resistencia	Ohmímetro	Ohmio ( $\Omega$ )	
Energía eléctrica	Contador de energía activa	Vatio hora (Wh)	
Energía eléctrica	Contador de energía reactiva	Voltamperio reactivo hora (VArh)	
Frecuencia	Frecuencímetro	Hercio (Hz)	
Desfase	Fasímetro	Cos $\varphi$	


## B. Clase de corriente

Corriente	Símbolo
Continua (CC)	—
Alterna (CA)	
Continua y alterna	
Instrumento trifásico con 1 sistema medidor	
Instrumento trifásico con 2 sistemas medidores	
Instrumento trifásico con 3 sistemas medidores	

**C. Seguridad en la manipulación:** las fallas de aislamiento pueden provocar una diferencia de potencial entre la caja del instrumento y sus partes metálicas con tierra, por eso los aparatos se someten a una tensión aplicada entre la caja y sus partes activas, que depende de la tensión nominal y se informa como tensión de prueba de aislamiento.

Tensión de prueba	Símbolo
500 V	
1000 V	
2000 V	
3000 V	
5000 V	
No sujeto a prueba	















#### D. Posición de funcionamiento

Posición	Símbolo
Vertical	
Horizontal	
Inclinada	

**E. Clase de precisión:** se simboliza mediante un número que indica el error porcentual que comete el aparato. La precisión se caracteriza por el error reducido, que es el cociente, expresado en tanto por ciento, entre el error absoluto del instrumento y el valor máximo que puede medirse con el aparato (es decir, el alcance).

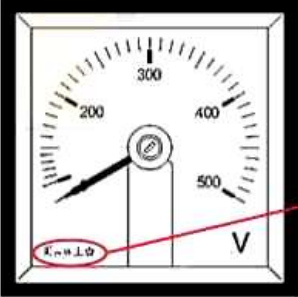
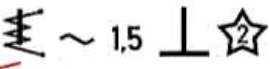
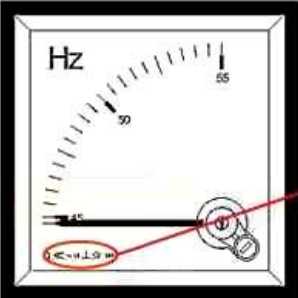
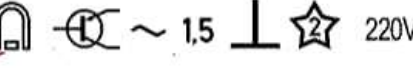
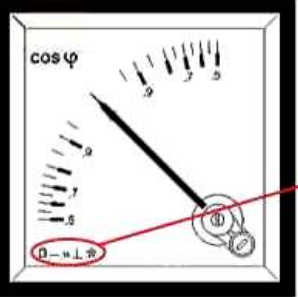
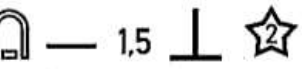
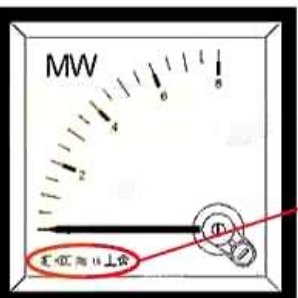

Clase	Límite de error	Aplicación	Símbolo
0,1	$\pm 0,1 \%$	Instrumentos de gran precisión para investigación	0,1
0,2	$\pm 0,2 \%$		0,2
0,5	$\pm 0,5 \%$	Instrumentos de precisión para laboratorio	0,5
1	$\pm 1 \%$	Instrumentos de medidas portátiles de CC	1
1,5	$\pm 1,5 \%$	Instrumentos de tableros y portátiles de CA	1,5
2,5	$\pm 2,5 \%$	Instrumentos de tableros	2,5
5	$\pm 5 \%$		5

**F. Mecanismo de funcionamiento:** sólo se incluyen algunos símbolos, sin considerar los que distinguen logómetros (instrumentos medidores de cocientes).

Mecanismo	Símbolo	Mecanismo	Símbolo
Bobina móvil		Vibratorio	
Hierro móvil		Térmico	
Imán móvil		Bimetálico	
Electrodinámico sin hierro		Electroestático	
Electrodinámico con circuito de hierro		Inducción	
Dispositivo electrónico en un circuito de medida		Dispositivo electrónico en circuito auxiliar	
Termopar aislado		Termopar no aislado	

## Aplicaciones prácticas

Los instrumentos mostrados presentan su simbología impresa en el ángulo inferior izquierdo (rodeada con una marca roja y ampliada en la columna siguiente de la tabla) y la letra que simboliza la magnitud eléctrica que miden se localiza en distintos ángulos de la esfera.

Instrumento	Zona de símbolos ampliada	¿De qué se trata?
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltímetro</li> <li>• Mecanismo de hierro móvil</li> <li>• Para corriente alterna</li> <li>• Clase 1,5</li> <li>• Posición de trabajo vertical</li> <li>• Tensión de prueba 2000 V</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frecuencímetro</li> <li>• Mecanismo de bobina móvil</li> <li>• Dispositivo electrónico en un circuito de medida</li> <li>• Para corriente alterna</li> <li>• Clase 1,5</li> <li>• Posición de trabajo vertical</li> <li>• Tensión de prueba 2000 V</li> <li>• Rango de voltaje 220 V</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fasímetro</li> <li>• Mecanismo de bobina móvil</li> <li>• Para corriente continua</li> <li>• Clase 1,5</li> <li>• Posición de trabajo vertical</li> <li>• Tensión de prueba 2000 V</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Megavatímetro</li> <li>• Mecanismo de hierro móvil</li> <li>• Dispositivo electrónico en un circuito de medida</li> <li>• Instrumento trifásico con un sistema medidor</li> <li>• Clase 1,5</li> <li>• Posición de trabajo vertical</li> <li>• Tensión de prueba 2000 V</li> </ul>

## 7. PATRONES DE MEDICIÓN

Un patrón de medición es una representación física de una unidad de medición. Una unidad se realiza con referencia a un patrón físico arbitrario o a un fenómeno natural que incluye constantes físicas y atómicas. Se han desarrollado patrones semejantes para otras unidades de medición, incluyendo patrones para las unidades fundamentales, así como para algunas unidades mecánicas y eléctricas derivadas.

Además de unidades fundamentales y derivadas de medición, hay diferentes tipos de patrones de medición, clasificados por su función y aplicación en las siguientes categorías:

- **Patrones internacionales:** se definen por acuerdos internacionales. Representan ciertas unidades de medida con la mayor exactitud que permite la tecnología de producción y medición. Los patrones internacionales se evalúan y verifican periódicamente con mediciones absolutas en términos de las unidades fundamentales.
- **Patrones primarios:** los patrones primarios representan unidades fundamentales y algunas de las unidades mecánicas y eléctricas derivadas, se calibran independientemente por medio de mediciones absolutas en cada uno de los laboratorios nacionales. Una de las principales funciones de los patrones primarios es la verificación y calibración de los patrones secundarios.
- **Patrones secundarios:** son los patrones básicos de referencia que se usan en los laboratorios industriales de medición.
- **Patrones de trabajo:** son las herramientas principales en un laboratorio de mediciones. Se utilizan para calibrar y verificar la exactitud y comportamiento de las mediciones efectuadas en las aplicaciones industriales.

### 7.1. Patrones de masa, longitud y volumen

La unidad de masa métrica se definió como la masa de un decímetro cúbico de agua a una temperatura de máxima densidad. La representación material de esta unidad es el Kilogramo Patrón Internacional.

Los patrones secundarios de masas, tienen una precisión de 1 ppm (parte por millón) y pueden verificarse con los patrones primarios de la NBS.

La libra (lb), establecida por la Weights and Measures Act, de 1963, se define como 0.45359237 kg exactamente.

La unidad métrica de longitud, el metro, se definió como la  $1/10^4$  parte del cuadrante meridiano que pasa por París.

La yarda se define como 0.9144 metros y una pulgada es 25.4 mm, ya que los patrones de unidades inglesas para medición se basan en patrones métricos.



Los patrones de trabajo industriales de longitud más utilizados son bloques de medida de precisión hechos de acero. Estos bloques tienen dos superficies planas paralelas, a una distancia de separación especificada, con una tolerancia en exactitud en el intervalo de 0'5-0'25 micrones.

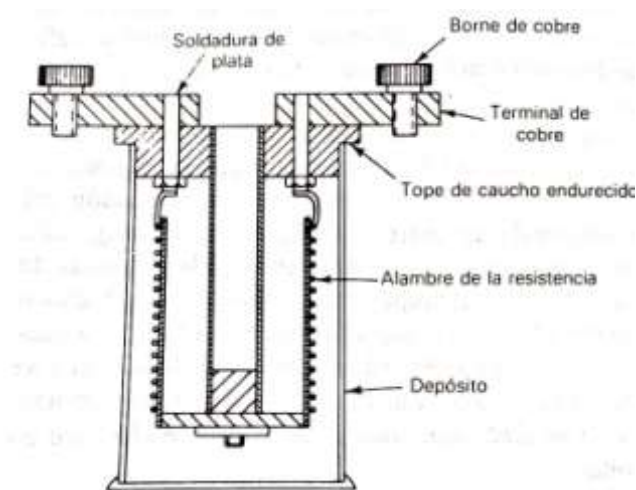
La unidad de volumen es una cantidad derivada y no se representa por medio de un patrón internacional.

## 7.2. Patrones eléctricos

El Sistema Internacional de Unidades (SI) define el ampere (unidad fundamental de corriente eléctrica) como la corriente constante que, al mantenerse a través de dos conductores paralelos de longitud infinita y sección circular despreciable alejados éstos 1 metro en el vacío, produce entre estos dos conductores una fuerza igual a  $2 \cdot 10^{-7}$  newton por metro de longitud. El ampere absoluto es actualmente la unidad fundamental de corriente eléctrica en el SI y se acepta a nivel internacional.

El voltaje, la corriente y la resistencia están relacionados por la ley de Ohm de proporcionalidad constante. La especificación de dos cantidades cualesquiera determina la tercera. Dos tipos de patrones materiales forman una combinación, la cual sirve para mantener el amere con alta precisión durante largos periodos: la resistencia patrón y la celda patrón (para voltaje).

### 7.2.1. Patrones de Resistencia



*Vista seccional de una resistencia patrón de doble pared*

El valor absoluto del ohm en el sistema SI se define en términos de las unidades fundamentales de longitud, masa y tiempo. La resistencia patrón es una bobina de alambre de alguna aleación, como la manganina, la cual tiene una elevada resistividad eléctrica y un bajo coeficiente de temperatura-resistencia. La bobina resistiva se coloca en un depósito de doble pared para prevenir cambios de resistencia debido a las condiciones de la atmósfera

Cuando el alambre seleccionado para la resistencia proporciona un valor casi constante en una amplia escala de temperatura, el valor exacto de la resistencia a cualquier temperatura se puede calcular a partir de la expresión

$$R_t = R_{25^{\circ}C} + \alpha(t - 25) + \beta(t - 25)^2$$

donde

$R_t$  = resistencia a la temperatura ambiente, t.

$R_{25C}$  = resistencia a 25 grados C-

$\alpha, \beta$  = coeficientes de temperatura.

### 7.2.2. Patrones de Voltaje

El mejor método para transferir el volt del patrón basado en la unión de Josephson a patrones secundarios para la calibración es la celda patrón. Este dispositivo se conoce como celda Weston normal o saturada. La celda Weston tiene un electrodo positivo de mercurio y uno negativo de amalgama de cadmio. El electrolito es una solución de sulfato de cadmio.

Hay dos tipos de celda Weston: la celda saturada, en la cual el electrolito está saturado a todas las temperaturas por los cristales del sulfato de cadmio que cubren los electrodos, y la celda no saturada, en la cual la concentración de sulfato de cadmio produce saturación a 4 °C.

Los patrones secundarios y de trabajo más portátiles se encuentran en las celdas Weston sin saturar. Estas son de construcción similar a las celdas normales pero requieren el control de temperatura exacto.



*Patrón de transferencia de CC*

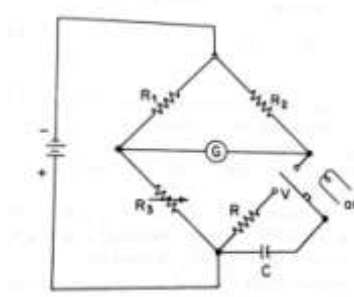
Los patrones de trabajo de laboratorios más versátiles se han desarrollado con exactitudes comparables a las de las celdas patrón. Un patrón de voltaje para laboratorio de múltiples propósitos, llamado patrón de transferencia, se basa en la operación de un diodo Zener como elemento de referencia de voltaje. El instrumento consiste en una

fuente de voltaje controlada por un Zener colocada en un ambiente de temperatura controlada para mejorar su estabilidad durante largo tiempo, y un divisor de voltaje de salida de precisión.

### 7.2.3. Patrones de Capacitancia

La unidad de capacitancia (farad) puede medirse con un puente conmutable de CC de Maxwell, donde la capacitancia se calcula a partir de las ramas resistivas del puente y la frecuencia de la conmutación CC. Los capacitores patrón suelen construirse de placas metálicas intercaladas con aire como material dieléctrico. El área de las placas y la distancia entre éstas se deben conocer con exactitud; la capacitancia puede determinarse a partir de estas dimensiones básicas.

#### 7.2.4. Patrones de Inductancia



*Método de cd  
conmutado para medir*

El patrón de inductancia primaria se deriva del ohm y del farad en lugar de los inductores construidos geoméricamente para la determinación del valor absoluto del ohm. Un conjunto típico de patrones de inductancia fijos incluye valores de aproximadamente 100  $\mu H$  a 10H, con una exactitud garantizada de 1% a la frecuencia de operación especificada. La exactitud de inductancia mutua típica es del 2.5% y el rango de valores de inductancia va de 0 a 200 mH.

#### 7.3. Patrones de temperatura e intensidad luminosa

La temperatura termodinámica es una de las cantidades básicas del SI y su unidad es el Kelvin. Las temperaturas en esta escala se designan como K y se denotan por el símbolo T. La magnitud del Kelvin se define como la temperatura termodinámica del punto triple del agua que ocurre exactamente a 273.16 K. El punto triple del agua es la temperatura de equilibrio entre el hielo, el agua líquida y el vapor de agua.

La escala Celsius tiene dos puntos fijos fundamentales; el punto de ebullición del agua a 100 ° C y el punto triple del agua a 0.01 ° C, ambos se establecen a la presión atmosférica. La conversión entre la escala Kelvin y la escala Celsius sigue la relación:

$$t(^{\circ}C) = T(K) - T_0$$

donde  $T_0 = 273.15^{\circ}C$ .

El termómetro patrón primario es un termómetro resistente de platino con una construcción especial donde el alambre de platino no está sujeto a esfuerzos.

El patrón primario de intensidad luminosa es un radiador total a la temperatura de solidificación de platino (2042 K aproximadamente). La candela se define como un sesentavo de la intensidad luminosa por  $cm^2$  del radiador total.

#### 7.4. Patrones IEEE

El Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) publica y conserva un conjunto de diferentes tipos de patrones. Estos patrones no están físicamente disponibles para comparación y verificación de patrones secundarios; se trata de procedimientos patrones, nomenclaturas, definiciones, etc.

Grupo importante de patrones IEEE es el método de prueba patrón para probar y evaluar varios sistemas y componentes electrónicos. Los patrones del IEEE tienen un directorio de osciloscopios de laboratorio donde se especifican los controles, funciones, etc.

## 8. INSTRUMENTOS INDICADORES ELECTROMECAÑICOS

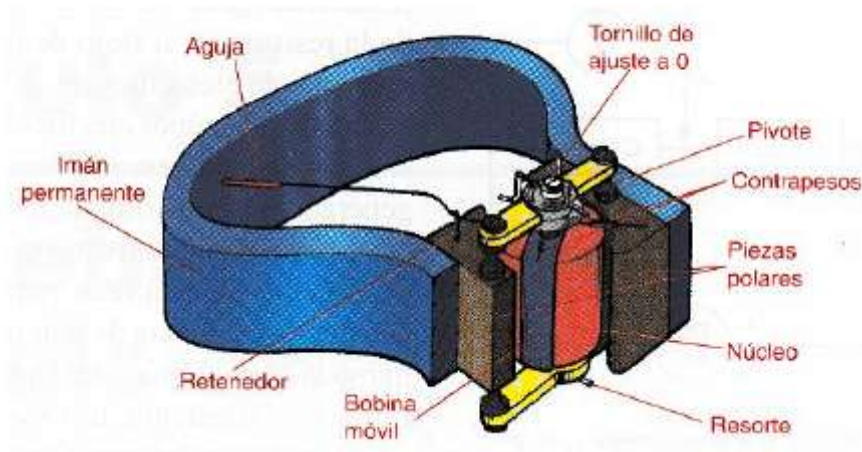
### 8.1. Galvanómetro en suspensión

Los primeros medidores de corriente directa requerían un galvanómetro de corriente de suspensión. Una bobina con alambre fino es suspendida en un campo magnético que produce un imán permanente. De acuerdo con las leyes fundamentales de fuerzas electromagnéticas, la bobina gira en el campo magnético cuando en ella circule una corriente eléctrica. El filamento fino de suspensión de la bobina alimenta de corriente a la bobina, y la elasticidad del filamento ejerce un par moderado en sentido opuesto a la rotación de la bobina. Esta continúa en deflexión hasta que el par electromagnético equilibre el contrapar mecánico de la suspensión. Así la deflexión de la bobina es una medida de la magnitud de la corriente que circula por la bobina. Un espejo sujeto a la bobina defleca un rayo de luz, que empuja un punto luminoso amplificado que se mueve en una escala a cierta distancia del instrumento. El efecto óptico es similar al de una aguja de gran longitud y masa cero.

### 8.2. Par y deflexión de un galvanómetro

Los principios que rigen la operación del Galvanómetro se aplican a equipos de versión más modernas, tal como el mecanismo de bobina móvil e imán permanente.

La figura muestra las partes del Galvanómetro de suspensión, aquí se tiene la bobina que se encuentra suspendida en un campo magnético de un imán permanente, esta vez en forma de herradura.



*Detalles de construcción de un galvanómetro PMMC de imán externo.*

La bobina es suspendida de tal manera que puede girar libremente en el campo magnético. Cuando la corriente fluye por la bobina, se desarrolla un par electromecánico (EM) y la bobina gira. El par EM es contrarrestado por el par mecánico de los resortes de control sujetos a la bobina móvil. Cuando los pares se equilibran, la

posición angular de la bobina es indicada por una aguja con respecto a una referencia fija llamada escala.

La ecuación del par desarrollado que se deriva de las leyes básicas para el par electromagnético es:  $T = B \cdot A \cdot I \cdot n$

donde,

$B$  = densidad de flujo en el entrehierro (webers/  $m^2$ )

$T$  = par ( $N \cdot m$ )

$A$  = área efectiva de la bobina ( $m^2$ )

$I$  = corriente en la bobina móvil (A)

$N$  = número de vueltas de alambre a la bobina

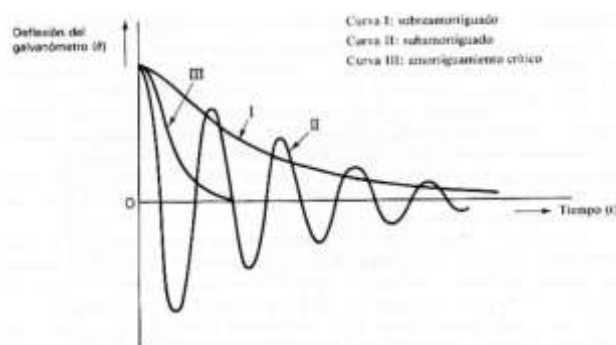
### 8.2.1. Comportamiento dinámico

El comportamiento dinámico de un galvanómetro se puede observar mediante interrupciones repentinas de la corriente aplicada, de manera que la bobina regresará de su posición deflectada a su posición cero. Las oscilaciones se reducen de manera gradual debido al amortiguamiento del elemento móvil y finalmente la aguja llega a su estado de reposo en cero.

Tres cantidades caracterizan el movimiento de la bobina móvil en el campo magnético:

- El momento de inercia ( $J$ ) de la bobina móvil sobre el eje de rotación.
- El par opuesto ( $S$ ) desarrollado por la suspensión de la bobina.
- La constante de amortiguamiento ( $D$ ).

La ecuación diferencial que relaciona estos tres factores tiene tres posibles soluciones, y cada una describe el comportamiento dinámico de la bobina en función del ángulo de deflexión  $\theta$ . Estas respuestas se conocen como:



*Comportamiento dinámico del galvanómetro*

**I. Sobreamortiguado**, es aquel donde la bobina regresa lentamente a su posición estable sin sobrepaso ni oscilaciones.

**II. Subamortiguado** es aquel donde el movimiento de la bobina está sujeto a las oscilaciones senoidales amortiguadas.

**III. Críticamente amortiguado** en el cual la aguja regresa con rapidez a su posición estable, sin oscilaciones.

Idealmente, la respuesta del galvanómetro debería hacer que la aguja llegara a su posición final sin sobretiro; de esta forma el movimiento sería críticamente amortiguado. En la práctica, el galvanómetro es un tanto subamortiguado, lo que causa un sobretiro de la aguja poco después de llegar al reposo.

### 8.2.2. Mecanismos de amortiguamiento

El amortiguamiento del galvanómetro se logra por dos medios: mecánico y electromagnético. El amortiguamiento mecánico es producido principalmente por el movimiento de la bobina a través del aire que la rodea lo que es independiente de la corriente eléctrica que circule por la bobina. La fricción del movimiento en sus cojinetes y la flexión de los resortes de suspensión causada por la bobina giratoria también contribuyen a los efectos de amortiguamiento mecánico. El amortiguamiento electromagnético es causado por los efectos inducidos en la bobina móvil conforme gira en el campo magnético, dado que la bobina forma parte de un circuito eléctrico cerrado.

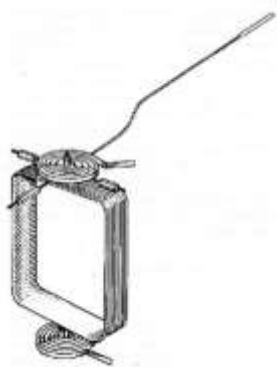
En general el PMMC se construye con el menor amortiguamiento posible, y luego de acuerdo a la necesidad se aumenta el mismo. Esto se logra por ejemplo conectando una resistencia a través de la bobina, en ésta se genera un par opuesto que amortigua el elemento móvil.

Para cualquier galvanómetro se puede encontrar un valor de este resistor que logre el amortiguamiento crítico (Resistencia externa de amortiguamiento crítico).

## 8.3. Mecanismos de bobina móvil e imán permanente

### 8.3.1. El movimiento de d'Arsonval

Entre las piezas polares se encuentra un cilindro de hierro dulce, que sirve para proveer un campo magnético uniforme en el entrehierro, entre las piezas polares y el cilindro. La bobina está devanada en un marco de metal ligero y montada de tal forma que puede girar libremente en el entrehierro. La aguja se encuentra unida a la bobina y se mueve en una escala graduada, que indica la deflexión angular de la bobina y, por lo tanto, la corriente que circula por ésta.

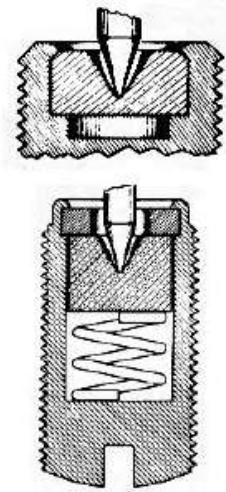


Dos resortes conductores de fósforo-bronce proporcionan la fuerza calibrada opuesta al par de la bobina-móvil. Es esencial el comportamiento constante de los resortes para mantener la exactitud del instrumento. La corriente es conducida hacia y desde la bobina por los resortes de control.

Bobina móvil para un galvanómetro PMMC

El sistema móvil completo se encuentra en equilibrio estático para todas las posiciones de deflexión por medio de tres contrapesos de balance. Los resortes, pivotes y aguja están ensamblados en la estructura de la bobina por medio de las bases de los pivotes, y el elemento de la bobina móvil se encuentra sostenido por asientos tipo "joya".

El pivote, que se asienta en el hueco de la joya, puede tener un radio en la punta de 0,01 a 0,02 mm, según el peso del mecanismo y la vibración del instrumento. El radio del hueco en la joya es ligeramente mayor que el radio del pivote, por lo que el área de contacto es circular y de unos pocos micrones. Las presiones originadas por las aceleraciones relativamente moderadas (como las sacudidas o caídas del instrumento) pueden dañar el pivote. Los instrumentos con protección especial utilizan asientos de joya con resortes traseros. Un resorte lo sostiene en posición normal; pero puede moverse axialmente cuando el golpe llega a ser excesivo.



### 8.3. Amperímetro de CC

#### 8.4.1. Resistor de derivación

El movimiento básico de un amperímetro CC es un galvanómetro IPBM. Puesto que el devanado de la bobina del movimiento básico es pequeño y ligero, sólo puede conducir corrientes muy pequeñas. Cuando se miden corrientes elevadas es necesario desviar la mayor parte de la corriente por una resistencia, llamada de derivación (shunt). La resistencia de derivación se calcula aplicando un análisis convencional de circuitos, donde:

$R_m$  = resistencia interna del movimiento (la bobina)

$R_s$  = resistencia de derivación o shunt

$I_m$  = corriente de deflexión a plena escala del movimiento ( $I_{fsd}$ )

$I_s$  = corriente de derivación

$I$  = corriente a plena escala del amperímetro incluyendo la de derivación.

Ya que la resistencia de derivación está en paralelo con el movimiento del medidor, el voltaje a través de la resistencia y el movimiento deben ser iguales, por lo tanto se puede escribir

$$V_{derivacion} = V_{movimiento}$$

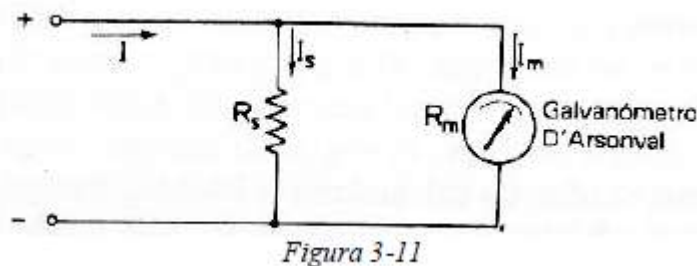
O

$$I_s R_s = I_m R_m \rightarrow R_s = \frac{I_m R_m}{I_s}$$

Como  $I_s = I - I_m$ , se puede escribir

$$R_s = \frac{I_m R_m}{I - I_m}$$

Para cada valor de corriente necesaria a escala completa del medidor, se puede calcular el valor de la resistencia de derivación (shunt) requerida.



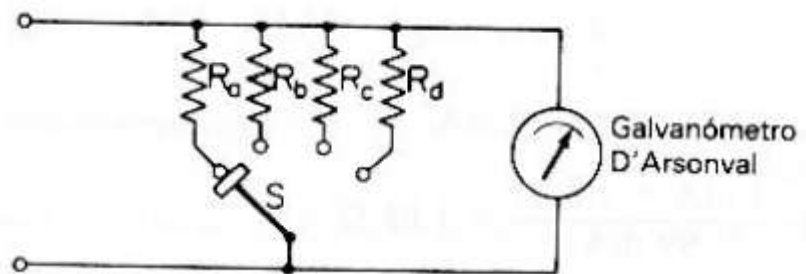
*Circuito de un amperímetro básico de cd*

*Figura 3-11*

#### 8.4.2. Derivación de Ayrton

La escala de corriente del amperímetro CC se puede extender mediante varias resistencias de derivaciones, seleccionadas por un interruptor de rango. Tal medidor se llama amperímetro multirango. El circuito tiene cuatro derivaciones,  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  y  $R_d$ , que se pueden colocar en paralelo con el movimiento para dar cuatro escalas de corrientes diferentes. El interruptor  $S$  es de multiposición, del tipo que hace conexión antes de desconectar, de manera que el movimiento no se vea afectado cuando el circuito se queda sin protección, sin derivación, al cambiar de rango.

*Diagrama esquemático de un amperímetro multirango simple.*



La derivación universal o de Ayrton elimina las posibilidades de tener el medidor sin ninguna derivación en el circuito. Esta ventaja se obtiene a expensas de llegar a tener una resistencia total del medidor ligeramente mayor.

#### Precauciones para el uso:

Tomar las siguientes precauciones cuando se use un amperímetro en un trabajo de medición:

- No conectar un amperímetro a través de una fuente de fem. ya que por su baja resistencia circularía una corriente dañina muy alta que puede destruir el delicado movimiento. Siempre se conecta el amperímetro en serie con una carga capaz de limitar la corriente.
- Obsérvese la polaridad correcta. La polaridad inversa causa que el medidor defleccione contra el mecanismo de tope y esto podría dañar la aguja.
- Cuando se utiliza un medidor multirango, primero se usa la escala de corriente más alta; luego se disminuye la escala de corriente hasta obtener la deflexión



adecuada. Para incrementar la exactitud de la medición, se emplea una escala que dé una lectura tan cercana a la escala completa tanto como sea posible.

#### 8.4. Voltímetro de CC

##### 8.5.1. Resistencia multiplicadora

La adición de una resistencia en serie o multiplicador convierte al movimiento básico d'Arsonval en un voltímetro de CC. La resistencia multiplicadora limita la corriente a través del movimiento de forma que no exceda el valor de la corriente de deflexión a plena escala ( $I_{fsd}$ ). Un voltímetro de cc mide la diferencia de potencial entre dos puntos en un circuito de cc y por lo tanto se debe conectar a través de una fuente fem o de un componente del circuito. En este tipo de conexión se debe observar la polaridad.

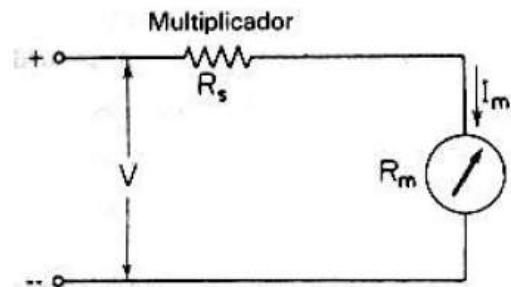
El valor de la resistencia multiplicadora necesaria para la escala de voltaje se calcula en base a la figura siguiente, donde:

$I_m$  = corriente de deflexión a plena escala del movimiento ( $I_{fsd}$ )

$R_m$  = resistencia interna del movimiento

$R_s$  = resistencia multiplicadora o serie

$V$  = voltaje a plena escala del instrumento

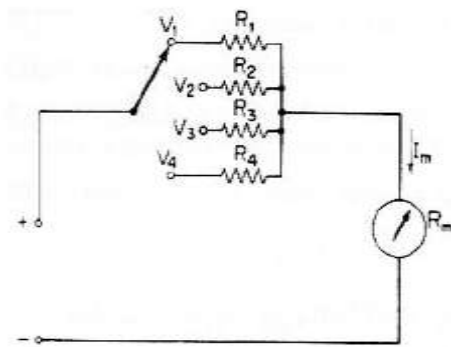


Circuito de voltímetro básico de cd

Para el circuito de la figura,

$$V = I_m(R_s + R_m) \rightarrow R_s = \frac{V - I_m \cdot R_m}{I_m} = \frac{V}{I_m} - R_m$$

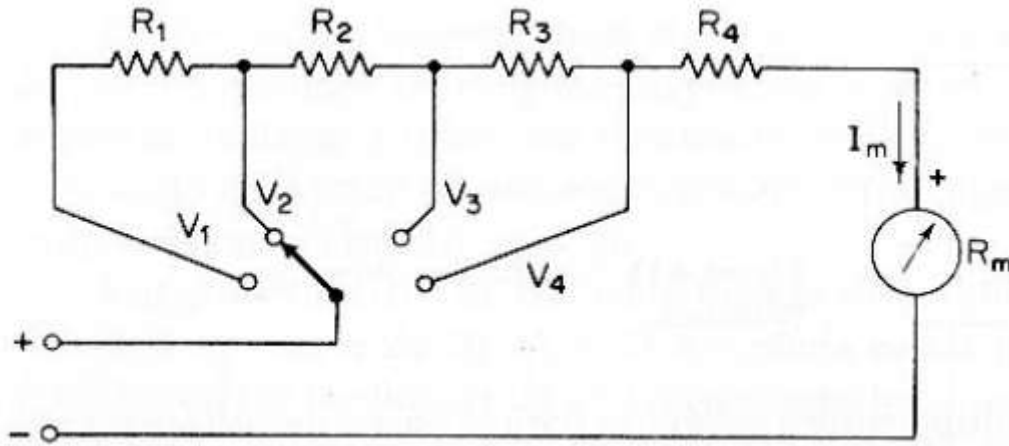
##### 8.5.2. Voltímetro de rango múltiple



La suma de varias resistencias multiplicadoras, junto con un interruptor de rango, provee al instrumento de varias escalas de trabajo. La figura siguiente muestra un voltímetro multirango con un interruptor de cuatro posiciones y cuatro resistencias multiplicadoras,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$ , para las escalas de voltaje  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ , y  $V_4$ , respectivamente. Los valores de las resistencias multiplicadoras se calculan con el método de sensibilidad.

Una variación del circuito de la figura se presenta en la siguiente a esta, donde las resistencias multiplicadoras están conectadas en serie y el selector de escala conmuta

la cantidad apropiada de resistencia en serie con el movimiento. Este sistema presenta la ventaja de que todos los resistores multiplicadores, excepto el primero, tienen resistencias normalizadas y se pueden obtener comercialmente con tolerancia de precisión.



Modelo practico de resistencias multiplicadoras en un voltímetro multirango

## 8.6. Sensibilidad del voltímetro

### 8.6.1. Régimen ohms por volt

La sumatoria de las resistencias respecto a la escala seleccionada en un voltímetro multirango siempre es una constante, ésta a menudo se conoce como sensibilidad S o cifra ohms/volt de un voltímetro. S es esencialmente el recíproco de la corriente de deflexión a plena escala del movimiento básico, esto es:

$$S = \frac{1}{I_{fsd}} \left( \frac{\Omega}{V} \right)$$

Con el concepto de sensibilidad S de un voltímetro se introduce una ventaja para el cálculo de la resistencia multiplicadora en un voltímetro de cc, donde:

S = sensibilidad o cifra ohm/volt del voltímetro  $\left( \frac{\Omega}{V} \right)$

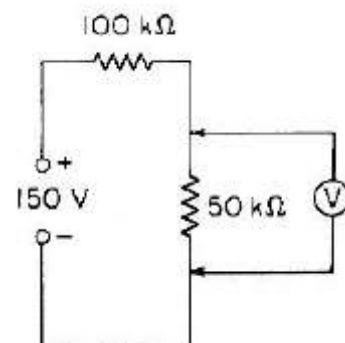
V = escala de voltaje, seleccionado con el interruptor de rango

Rm = resistencia interna del movimiento (más la resistencia de rango en serie)

Rs = resistencia multiplicadora

### 8.6.2. Efecto de carga

La cifra O/V de un voltímetro de cc es un factor importante cuando se selecciona un medidor para determinadas mediciones de voltaje. Un medidor de baja cifra O/V puede dar lecturas correctas cuando se miden voltajes en circuitos de baja resistencia; pero éste produce lecturas erróneas en circuitos de alta



resistencia. Cuando se conecta un voltímetro, a través de dos puntos en un circuito altamente resistivo, actúa como un derivador para esa parte del circuito y por lo tanto reduce la resistencia equivalente en esa parte del circuito. El medidor indicará un voltaje menor del que realmente existe antes de conectar el medidor. A este efecto se le llama efecto de carga del instrumento; y lo causan principalmente instrumentos de baja sensibilidad o cifra O/V. El error asociado a este efecto se denomina error de inserción.

#### Precauciones para el uso

Se deben observar las siguientes precauciones generales cuando se utilice un voltímetro:

9. Obsérvese la polaridad correcta; ya que si es incorrecta origina que el medidor deflecte contra el mecanismo de tope y esto puede dañar la aguja.
10. Conéctese el voltímetro en paralelo con el circuito o componente cuyo voltaje se va a medir.
11. Cuando se emplee un voltímetro de escala múltiple, hay que utilizar la escala de mayor voltaje y posteriormente disminuirla hasta tener una lectura lo más cercana a la parte superior de la escala.
12. Considere el efecto de carga. Este se puede minimizar seleccionando la escala de voltaje más alta (y mayor sensibilidad) como sea posible. Además la exactitud

### **8.7. Ohmímetro tipo serie**

El óhmetro tipo serie consta de un galvanómetro o movimiento D'Arsonval conectado en serie con una resistencia y una batería, con un par de terminales a los cuales se conecta la resistencia desconocida. La corriente que circula a través del galvanómetro depende de la magnitud de la resistencia desconocida y la indicación del medidor es proporcional a su valor. La figura siguiente muestra los elementos de un óhmetro en tipo serie de una sola escala.

$R_1$  = resistor limitador de corriente

$R_2$  = resistor de ajuste a cero

$E$  = batería interna

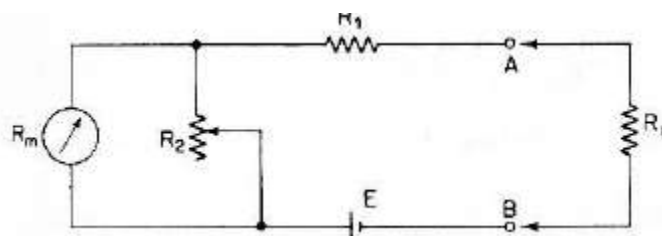
$R_m$  = resistencia interna del galvanómetro D'Arsonval

$R_x$  = resistor desconocido

Cuando la resistencia desconocida  $R_x = 0$  (terminales A y B en cortocircuito), circula corriente máxima en el circuito. En estas condiciones, la resistencia de derivación  $R_2$  se ajusta hasta que el galvanómetro indique la corriente a escala completa (Ifsd). La posición de la aguja para la corriente de escala completa se marca con "00". En forma similar, cuando

$R_x = \infty$  (terminales A y B abiertas) la corriente en el circuito es cero y el galvanómetro indica cero corriente, esta posición se marca con " $\infty$ " en la escala.

El óhmetro tipo serie tiene ciertas desventajas. La más



importante se relaciona con la disminución del voltaje de la batería interna, de forma que la corriente a escala completa disminuye y el medidor no lee "0" cuando A y B están en cortocircuito. La resistencia de derivación R2 en la figura provee un ajuste para contrarrestar el efecto de la descarga de la batería.

Una cantidad conveniente al uso en el diseño de un óhmetro tipo serie es el valor de Rx que origina media deflexión en el medidor. A esta posición, la resistencia a través de los terminales A y B se define como la resistencia de media escala Rh.

El circuito es analizable a partir de la corriente a escala completa  $I_{fsd}$  y la resistencia de media escala Rh, se puede calcular los valores de R1 y R2.

Al introducir Rh en el circuito se reduce la corriente a  $\frac{1}{2}I_{fsd}$ , y la resistencia desconocida debe ser igual a la resistencia interna total del óhmetro.

$$R_h = R_1 + \frac{R_2 R_m}{R_2 + R_m}$$

La resistencia total que se presenta a la batería es igual a 2Rh, y la corriente necesaria para la deflexión a media escala es

$$I_h = \frac{E}{2R_h}$$

Para producir la deflexión a plena escala, la corriente por la batería se debe duplicar

$$I_t = I_2 + I_{fsd} = 2I_h = \frac{E}{R_h}$$

La corriente de derivación a través de R2 es

$$I_2 = I_t - I_{fsd}$$

El voltaje en la resistencia de derivación (E2) es igual al voltaje en el galvanómetro

$$E_2 = E_m \text{ ó } I_2 R_2 = I_{fsd} R_m$$

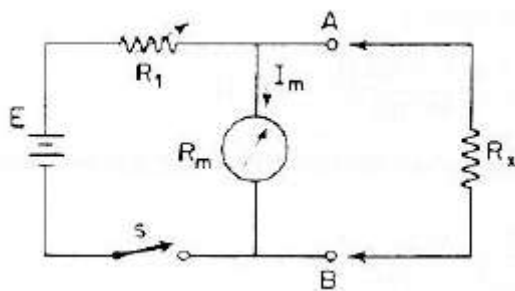
Al sustituir las ecuaciones y multiplicar por  $\frac{R_h}{R_h}$  se obtiene

$$R_1 = R_h - \frac{R_2 R_m}{R_2 + R_m} = R_h = R_h - \frac{I_{fsd} R_m R_h}{E}$$

### 8.8. Ohmímetro tipo derivación

Este consiste de una batería en serie con una resistencia de ajuste  $R_1$ , y un galvanómetro D'Arsonval. La resistencia desconocida se conecta a través de las terminales A y B, en paralelo con el medidor. Para este circuito es necesario tener un interruptor que desconecte la batería cuando no se use el instrumento. Cuando la resistencia desconocida  $R_x = 0\Omega$  (A y B están en cortocircuito), la corriente del medidor es cero. Si la resistencia desconocida  $R_x = \infty$  (A y B están abiertas), la corriente circulará únicamente a través del medidor; y con la apropiada selección del valor de  $R_1$ , se puede hacer que la aguja marque escala completa. De esta forma, el óhmetro tiene la marca "cero" en el lado izquierdo de la escala (no circula corriente) y la marca "infinito" en el lado derecho de la escala (corriente de deflexión a plena escala).

El óhmetro tipo derivación es adecuado para medir valores bajos de resistencia.



El diagrama del circuito de un óhmetro tipo derivación se muestra en figura anterior. Donde:

$E$  = batería interna

$R_1$  = resistor limitador de corriente

$R_m$  = resistencia interna del galvanómetro D'Arsonval

Cuando  $R_x = \infty$ , la corriente a escala completa del medidor es

$$I_{fsd} = \frac{E}{R_1 + R_m} \rightarrow R_1 = \frac{E}{I_{fsd}} - R_m$$

Para cualquier valor de  $R_x$  conectado a través de los terminales A y B, la corriente por el medidor decrece y está dada por

$$I_m = \frac{E}{R_1 + \frac{R_m R_x}{R_m + R_x}} \cdot \frac{R_x}{R_m + R_x}$$

$$I_m = \frac{E \cdot R_x}{R_1 \cdot R_m + R_x(R_1 + R_m)}$$

La corriente del medidor para cualquier valor de  $R_x$ , expresada como una fracción de la corriente a escala completa es

$$s = \frac{R_x}{R_x + R_p}$$

Para determinar los valores sobre la escala para un valor de  $R_1$ , la lectura de media escala se puede encontrar igualando las ecuaciones anteriores entonces al despejar  $R_h$  obtenemos

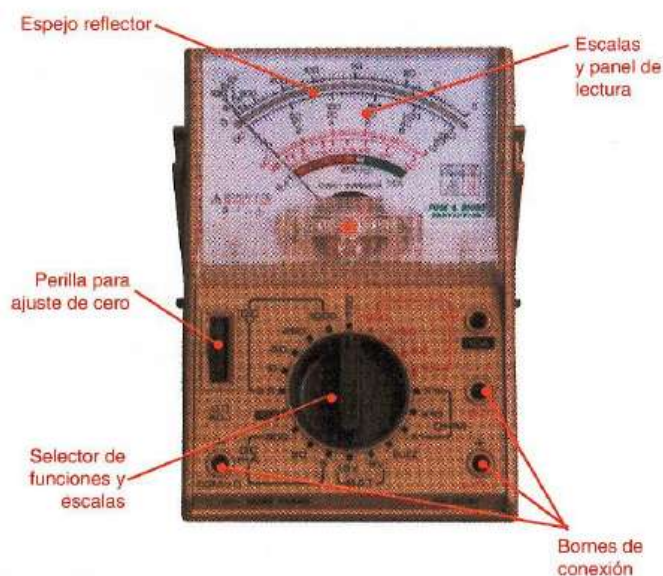
$$R_h = \frac{R_1 R_m}{R_1 + R_m}$$

El análisis muestra que la resistencia de media escala está determinada por el resistor limitador  $R_1$  y la resistencia interna del galvanómetro  $R_m$ . La resistencia limitadora,  $R_1$ , a su vez, está determinada por la resistencia del medidor  $R_m$ , y por la corriente de deflexión a plena escala  $I_{fsd}$ .

El óhmetro tipo derivación es muy útil para la medición de resistencias de valores muy bajos.

### 8.9. Multímetro (VOM)

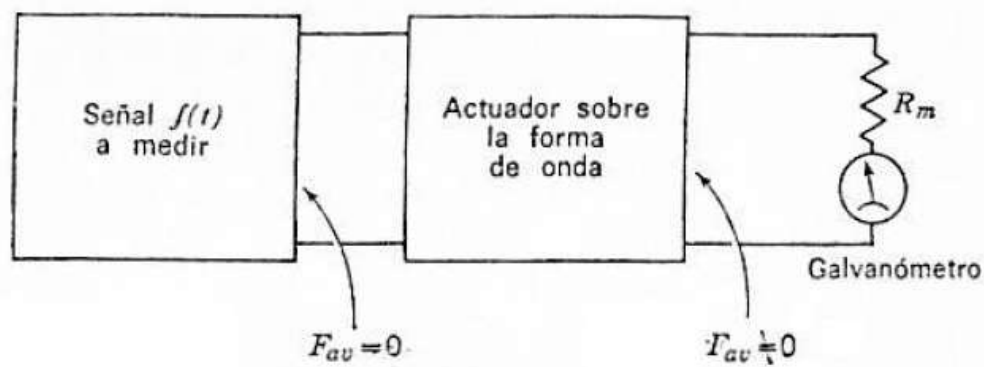
El amperímetro, el voltímetro y el óhmetro utilizan el galvanómetro D'Arsonval. La diferencia entre los tres es el circuito utilizado con el movimiento básico. Es por lo tanto lógico que se puede diseñar un instrumento para realizar las tres funciones de medición; este dispositivo, tiene un interruptor de función que selecciona el circuito apropiado al galvanómetro D'Arsonval y es llamado comúnmente multímetro o medidor-volt-ohmmiliampere (VOM). La siguiente figura muestra un multímetro comercial.



### 8.10. Instrumentos indicadores de CA

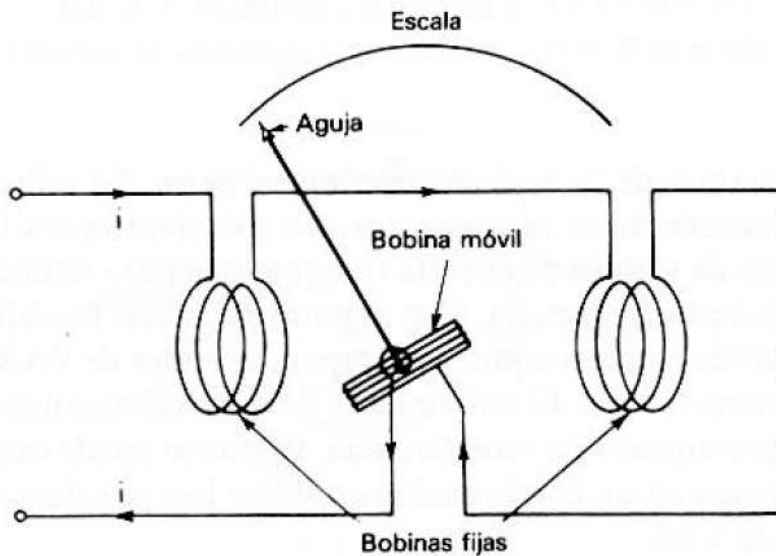
En una gran cantidad de procesos, es necesario realizar medidas eléctricas de formas de onda no sinusoidales. Las propiedades de estas señales son importantes para el diseño y análisis de instrumentos y sistemas de medidas. Un error común al realizar una medida es despreciar la influencia de la forma de onda de la señal en las lecturas del instrumento. Para poder realizar un análisis correcto de las mediciones realizadas sobre señales no sinusoidales es necesario definir algunos conceptos básicos.

El instrumento de D'Arsonval responde al valor promedio o de CC de la corriente que circula por la bobina móvil. Si el galvanómetro conduce una corriente alterna con medios ciclos positivos y negativos, el par producido será en una dirección para el ciclo positivo y en la otra para el negativo, dándonos una deflexión media de cero con lo cual el indicador de D'Arsonval o vibra en torno a cero o indica cero permanentemente.



#### 8.10.1. Electrodinamómetro

El electrodinamómetro se utiliza en voltímetros y amperímetros de CA muy exactos, no solamente para la medición de señales de alta frecuencia de la línea de energía sino también para señales que se encuentren en rangos bajos de audiofrecuencia. El par producido en este instrumento procede de las fuerzas magnéticas entre bobinas que conducen corrientes, una de las cuales es giratoria. Una bobina fija, dividida en dos porciones, produce el campo en el volumen que ocupa la bobina móvil. El montaje completo está rodeado por un blindaje laminado para proteger el instrumento de los campos magnéticos exteriores que puedan afectar su operación. El amortiguamiento se logra mediante aletas de aluminio que se mueven en cámaras de aire.



Para entender la operación del instrumento conviene recordar las expresiones del par desarrollado por una bobina suspendida en un campo magnético.

$$T = B \cdot A \cdot I \cdot N$$

Esta ecuación indica que el par que deflexa la bobina móvil es directamente proporcional a las constantes de la bobina ( $A$  y  $N$ ), la densidad de flujo magnético en el cual la bobina se mueve ( $B$ ), y a la corriente que circula por la bobina. En el electrodinamómetro la densidad de flujo ( $B$ ) depende de la corriente que circula a través de la bobina fija y por lo tanto es directamente proporcional a la corriente de deflexión ( $I$ ). Puesto que las dimensiones de la bobina y su número de vueltas son cantidades fijas para un medidor dado, el par desarrollado es una función de la corriente al cuadrado ( $I^2$ ).

+mentando el espaciamiento progresivamente hacia los valores más altos de corriente. Para utilizarlo en CA, el par desarrollado en cualquier instante es proporcional a la corriente instantánea al cuadrado ( $i^2$ ).

El electrodinamómetro presenta ciertas desventajas. Una de ellas es su alto consumo de energía, como consecuencia directa de su construcción. La corriente medida, además de circular por la bobina móvil debe proporcionar el flujo de campo. Para obtener suficiente campo magnético fuerte, se requiere una alta fmm (fuerza magnetomotriz) y la fuente debe suministrar corriente y potencia altas. La densidad de flujo baja de un electrodinamómetro afecta de inmediato el par producido y, por lo tanto, la sensibilidad del instrumento es generalmente muy baja.

La adición de una resistencia en serie convierte al electrodinamómetro en un voltímetro, el cual otra vez puede usarse para medir voltajes de CC y CA. La sensibilidad de un voltímetro electrodinamómetro es baja, del orden de 10 a 30 W/V (comparada con 20W/V de un medidor D'Arsonval). La reactancia y la resistencia de la bobina también se incrementan cuando aumenta la frecuencia, limitando la aplicación del voltímetro electrodinamómetro a rangos de frecuencias bajas. Es muy exacto para



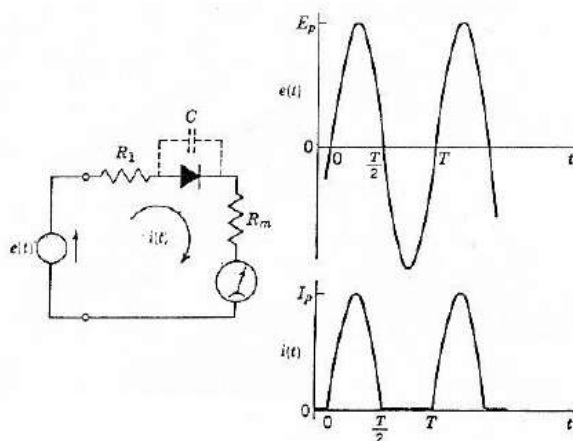
la medición de señales a la frecuencia de la línea de energía y por lo general se utiliza como un patrón secundario. No es un instrumento económico.

El movimiento electrodinámico se puede utilizar como un amperímetro, sin embargo es difícil diseñar una bobina móvil que pueda conducir más de aproximadamente 100 mA. Para evitar esta limitación se puede emplear una derivación que permite construir amperímetros para corrientes de hasta 20 A.

### 8.10.2. Instrumento tipo rectificador

La medición de CA mediante el uso de un rectificador que convierte la CA en CC unidireccional es muy eficaz, ya que un movimiento de CC por lo general tiene mayor sensibilidad que un instrumento electrodinámico o medidor de hierro móvil.

En términos generales los instrumentos tipo rectificador usan un galvanómetro IPBM en combinación con algún arreglo rectificador. El elemento rectificador consiste por lo común en un diodo de germanio o silicio. Los diodos de germanio tienen un voltaje pico inverso (PIV) de 300 V y un régimen de corriente de alrededor de 100 mA. Los diodos rectificadores de silicio son de baja corriente tienen un PIV superior a 1000 V y un régimen de corriente del orden de 500 mA.



Según su construcción podemos encontrar tres grandes tipos de instrumentos rectificadores, simples, dobles y de puente. Un sencillo voltímetro rectificador simple se puede construir conectando un rectificador en serie con un instrumento de D'Arsonval y una resistencia externa  $R_1$ . Supongamos que se aplica un voltaje sinusoidal,  $e(t) = E_p \sin \omega t$  a los terminales de este instrumento. Cuando  $e(t)$  es una caída de tensión en la dirección de la flecha de la figura, el rectificador sufre una tensión directa y su resistencia es baja. Esto permite pasar una corriente sustancial a través del instrumento durante el semiciclo positivo de  $e(t)$ . En un rectificador ideal la resistencia directa es cero e  $i(t)$  es proporcional a la tensión aplicada a los terminales del instrumento en el intervalo

$0 < t < T/2$ . La resistencia directa de un rectificador real es función de la corriente, generalmente decreciente al aumentar  $i(t)$ . Por lo tanto, la corriente en el instrumento no es necesariamente un tramo sinusoidal, entonces  $i(t)$  viene dada aproximadamente por

$$i(t) = \frac{E_p}{R} \sin \omega t \rightarrow 0 < t < \frac{T}{2}$$

donde  $m R = R_1 + R_m$

Cuando  $e(t)$  se encuentra en el semiciclo negativo, en el intervalo  $T/2 < t < T$ , el rectificador soporta un voltaje inverso y presenta alta resistencia. Es obvio que el valor medio, o valor de CC del trozo de senoide, es la mitad del valor medio de la onda sinusoidal rectificadora, para la cual se halló por integración que  $F_{av}=2F_p/p$ .

La deflexión del instrumento depende únicamente de la componente continua de los trozos sinusoidales. Por tanto, la deflexión viene dada por

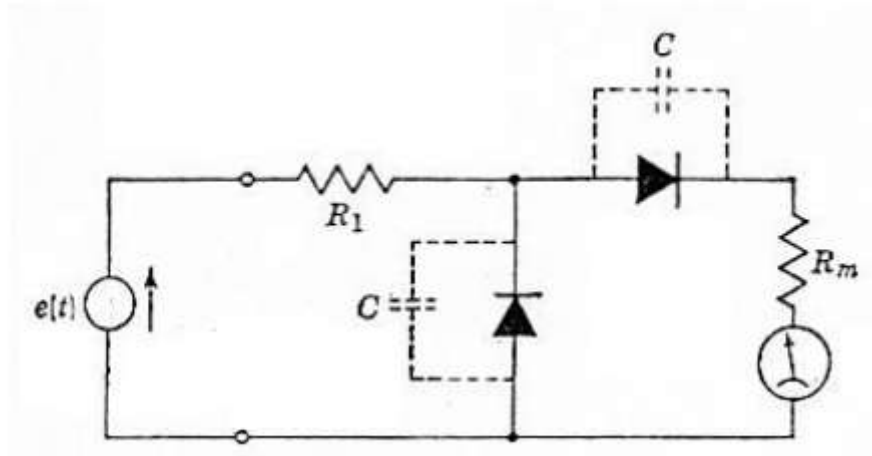
$$\theta = \frac{I_p}{\pi K} = \frac{E_p}{\pi K R}$$

y es proporcional al valor de pico del voltaje aplicado.

La dificultad principal de este voltímetro surge en los semiciclos negativos de  $e(t)$ . El voltaje inverso que soporta el rectificador es igual a  $e(t)$ , pues la corriente es esencialmente cero. Algunos rectificadores no toleran un voltaje inverso apreciable. De modo que el rectificador de figura puede quedar destruido por los ciclos negativos de  $e(t)$ .

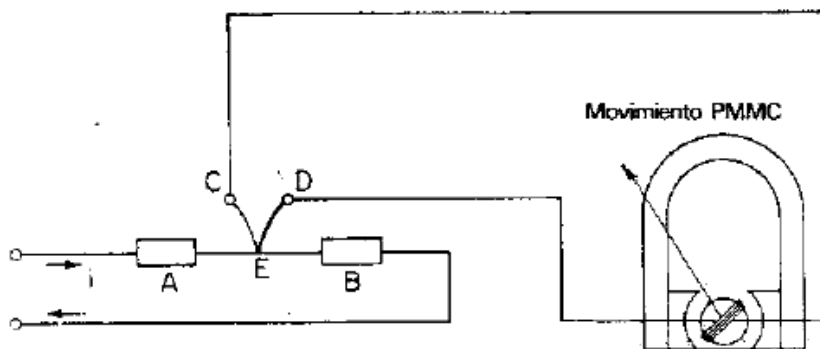
La capacidad  $C$ , inherente al rectificador, constituye otra dificultad. Al aumentar la frecuencia de  $e(t)$ , la reactancia de  $C$  se hace pequeña en relación con la resistencia inversa del rectificador. Esto permite el paso de la corriente en los semiciclos negativos de  $e(t)$ , en los que se desea corriente cero. Por tanto, la presencia de  $C$  tiende a anular la acción rectificadora a altas frecuencias.

El peligroso voltaje inverso aplicado al rectificador se puede eliminar añadiendo un segundo rectificador en paralelo con el instrumento y su rectificador en serie. Con la polaridad que indica la flecha, se observa que el rectificador en paralelo no afecta apreciablemente al circuito en los semiciclos positivos de  $e(t)$ , pues experimenta un voltaje inverso y presenta alta resistencia. En los semiciclos negativos de  $e(t)$  el rectificador en paralelo experimenta un voltaje directo que produce baja resistencia. La baja resistencia desacopla al instrumento y prácticamente conduce toda la corriente durante los semiciclos negativos. Esto es una acción positiva que asegura una corriente pequeña en el instrumento. Resulta que los rectificadores se protegen mutuamente de un voltaje inverso excesivo y al propio tiempo producen una corriente semidireccional en el instrumento. Esta modificación al instrumento rectificador simple es la que se conoce como instrumento rectificador doble.



### 8.11. Termoinstrumentos

Esta combinación se llama instrumento de termopar, ya que su operación se basa en la acción de un elemento termopar. Cuando dos metales diferentes están unidos en sus extremos, se genera un voltaje en la unión de ambos. Este voltaje aumenta en proporción a la temperatura de unión.



En la figura, CE y DE representan los dos metales diferentes, unidos en el punto E; se dibujan con una línea delgada y gruesa para indicar que son de diferente material. La diferencia de

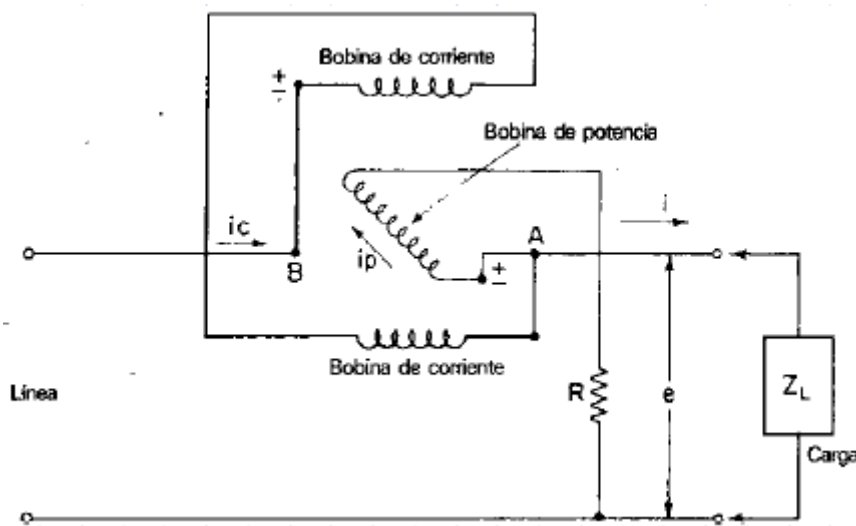
potencial entre C y D depende de la temperatura de la llamada unión fría, E;

Un aumento de la temperatura produce un incremento de voltaje y esto representa una ventaja del termopar. El elemento calefactor, AB, que está en contacto mecánico con la unión de los dos metales en el punto E, forma parte del circuito en el cual se mide la corriente. AEB se conoce como unión caliente. La energía calorífica generada por la corriente en el elemento calefactor aumenta la temperatura de la unión fría e incrementa el voltaje generado a través de las terminales C y D. Esta diferencia de potencial origina una corriente de CC por el instrumento indicador del PMMC. El calor generado por la corriente es directamente proporcional a su cuadrado ( $I^2R$ ) y el aumento de temperatura (y así mismo la generación de voltaje de CC) es proporcional al cuadrado de la corriente rms.

Por lo tanto, la deflexión del instrumento indicador seguirá una relación de ley cuadrática, causando que las marcas estén muy juntas en el extremo inferior de la escala y más espaciadas en el extremo superior.

### 8.12. Electrodinamómetros en mediciones de potencia

El movimiento electrodinamómetro se utiliza frecuentemente en las mediciones de potencia. Sirve para indicar tanto la potencia de CC como de CA para cualquier onda de voltaje y corriente. El electrodinamómetro utilizado como voltímetro o amperímetro tiene las bobinas fijas y la móvil conectada en serie, de esta forma reaccionan al efecto de la corriente al cuadrado. Cuando se utilizan como medidor de potencia monofásico, las bobinas están conectadas en diferente forma.



Las bobinas fijas o bobina de campo, que aparecen aquí como dos elementos separados, están conectados en serie y llevan una corriente de línea total. La bobina móvil, colocada en el campo magnético de las bobinas fijas, está conectada en serie con una resistencia limitadora de corriente a través de la línea de potencia, en la cual circula una pequeña corriente.

Los watímetros tienen una terminal de voltaje y una terminal de corriente marcadas “±”. Cuando la terminal de corriente marcada se conecta a la línea de entrada y la terminal de voltaje marcada se conecta a la línea en donde la bobina de corriente se conecta, la aguja del medidor se moverá en sentido correcto cuando la energía se conecta a la carga. Si por cualquier razón, el medidor marcara hacia atrás se deben invertir las conexiones de corriente (no las de voltaje).

El wattímetro electrodinamómetro consume determinada energía para el mantenimiento de su campo magnético, pero por lo general es muy pequeña en comparación con la potencia de la carga y se puede despreciar. Con la bobina de potencial conectada al punto A de la figura anterior, el voltaje de carga es medido correctamente, pero la corriente a través de las bobinas de campo es mayor. El wattímetro por lo tanto da una lectura mayor por la cantidad de potencia perdida en el circuito de potencial. Sin embargo, si la bobina de potencial se conecta al punto B de la figura anterior, la bobina de campo mide la corriente de carga correcta, pero el voltaje a través de la bobina de potencial es mayor por la cantidad que cae en la bobina de campo. El wattímetro nuevamente dará una lectura mayor, pero ahora por la cantidad de  $I^2R$  perdida en los devanados del campo. La elección de la conexión correcta

depende del caso. En términos generales, la conexión de la bobina de potencial al punto A es conveniente cuando se tienen cargas de alta corriente y bajo voltaje; la conexión en el punto B se utiliza en cargas de baja corriente y alto voltaje.

La dificultad de colocar la conexión de la bobina de potencial se supera en el wattímetro compensado mostrado en la siguiente figura. La bobina de corriente consiste en dos devanados, cada uno con el mismo número de vueltas. Uno está construido con alambre grueso y conduce la corriente de carga, más la corriente de la bobina de potencial. El otro devanado se construye con alambre delgado y solo circula la corriente de la bobina de voltaje. Esta corriente va en dirección opuesta a la corriente en el devanado de alambre grueso, con lo que su flujo se opone al flujo principal, por lo que el efecto de la corriente que circula por la bobina de potencial se cancela y el wattímetro indica la potencia correcta.

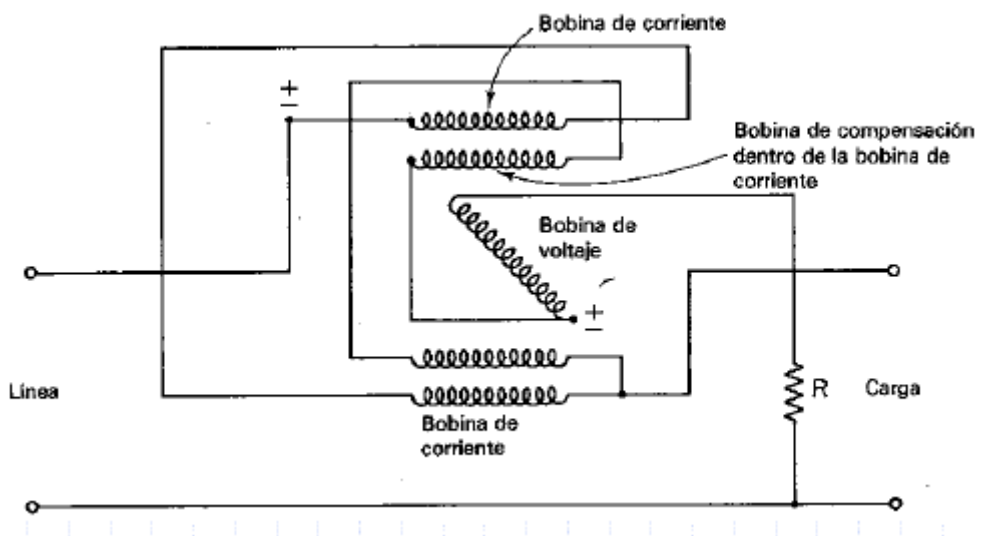
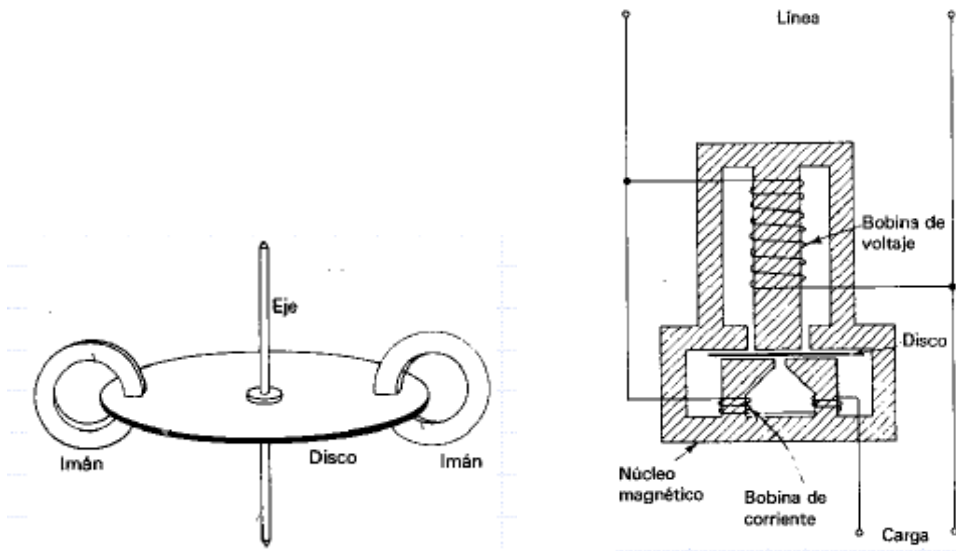


Diagrama de un wattímetro compensado en el cual el efecto de la corriente en la bobina potencial es cancelado por la corriente en el devanado de compensación

### 8.13. Watthoríemtro

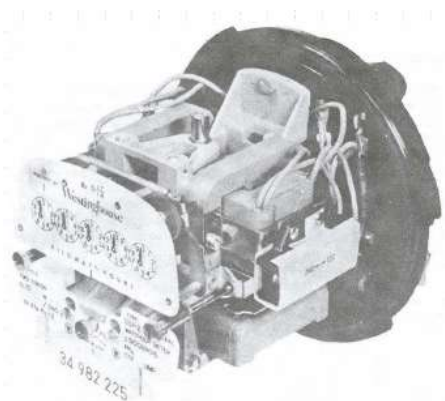
El watthorímetro se utiliza en la medición comercial de la energía eléctrica. En la figura se muestran los elementos principales de un wattorímetro monofásico.

La bobina de corriente se conecta en serie con la línea y la bobina de voltaje se conecta a través de la línea. Ambas bobinas son devanadas en un marco metálico de diseño especial, con lo que se tiene dos circuitos magnéticos. Un disco de aluminio ligero se suspende en el entrehierro del campo de la bobina de corriente, el cual produce corrientes inducidas que circulan en el disco. La reacción de las corrientes inducidas y el campo de la bobina de voltaje crean un par (acción de motor) en el disco, haciendo que este gire.



*Elementos de un medidor watt-hora monofásico.*

El par desarrollado es proporcional a la intensidad de campo de la bobina de voltaje y a las corrientes inducidas en el disco, las cuales son funciones de la intensidad de campo de la bobina de corriente. El número de vueltas del disco es proporcional a la energía consumida por la carga en un determinado tiempo y se mide en términos de kilowatts-hora (kWh). El eje que soporta al disco de aluminio se conecta por medio de un arreglo de engranes a un mecanismo de relojería situado junto a la carátula del medidor; esto proporciona una lectura calibrada en forma decimal del número de kWh.



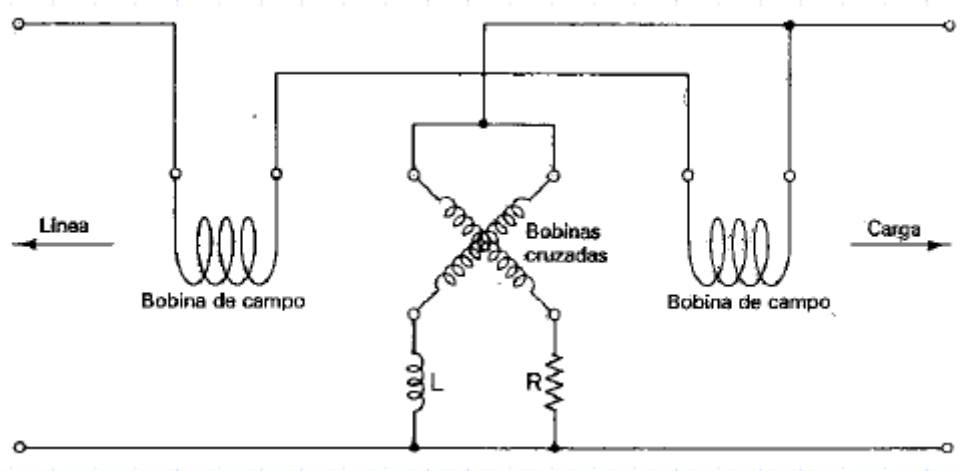
Dos pequeños imanes permanentes proporcionan el amortiguamiento del disco. Se localizan en forma opuesta en el borde del disco. Cuando el disco gira, dichos imanes inducen corrientes. Esas corrientes inducidas por los campos magnéticos de los pequeños imanes permanentes amortiguan el movimiento del disco. Un watthorímetro monofásico típico se presenta en la siguiente figura.

La calibración de un watthorímetro se realiza en condiciones de plena carga y al 10% del régimen de carga. A plena carga, la calibración consiste en ajustar la posición de los pequeños imanes permanentes hasta que el medidor de lecturas correctas. Con cargas muy ligeras, la componente de voltaje del campo produce un par que no es directamente proporcional a la carga. La compensación del error se efectúa insertando una bobina auxiliar de arranque o un plato sobre una porción de la bobina de voltaje, con el medidor operando al 10% del régimen de carga. La calibración del medidor bajo esas dos condiciones proporciona lecturas satisfactorias con las demás cargas.

### 8.14. Medidores de factor de potencia

El factor de potencia es el coseno del ángulo de fase entre el voltaje y la corriente; por lo que la medición se realiza a partir de dicho ángulo de fase. Esto se demuestra en la operación del medidor de factor de potencia de bobinas cruzadas. El instrumento es básicamente un movimiento de electrodinamómetro, donde el elemento móvil consiste en dos bobinas montadas en el mismo eje, pero con un ángulo recto entre ellas. La bobina móvil gira en el campo magnético producido por la bobina de campo que conduce la corriente de línea.

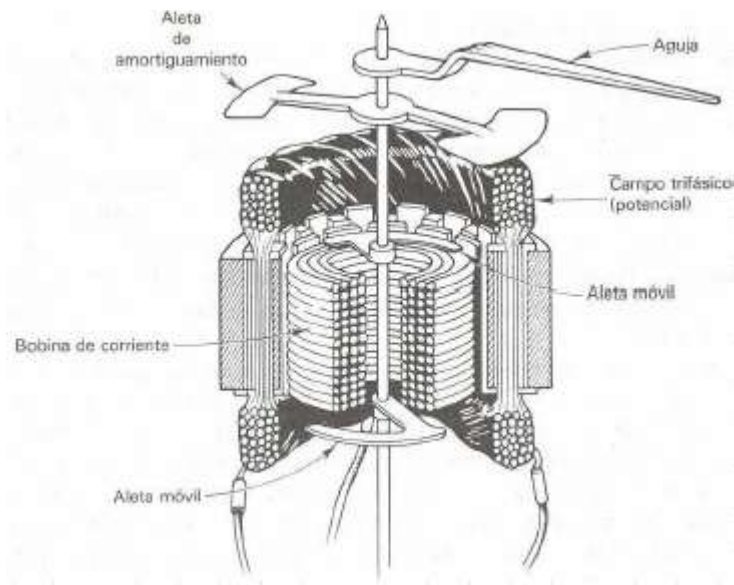
Las conexiones para este medidor en un circuito monofásico se muestran en el diagrama del circuito de la figura.



La bobina de campo se conecta en serie con la línea y conduce la corriente de línea. Una de las bobinas móviles está conectada en serie con una resistencia a través de las líneas y recibe corriente de la diferencia de potencial aplicado. La segunda bobina del elemento móvil está conectada en serie con un inductor también a través de las líneas. Dado que no se utilizan resortes de control, el balance del elemento móvil depende del par resultante desarrollado por las dos bobinas cruzadas. Cuando el elemento móvil está balanceado la contribución del par total de cada uno de los elementos debe ser igual pero de signo opuesto. El par desarrollado en cada bobina es función de la corriente a través de ellas y por lo tanto, depende de la impedancia en cada circuito de la bobina. El par también es proporcional a la inductancia mutua entre cada par de bobinas cruzadas y la bobina de campo estacionaria. Esta impedancia mutua depende de la posición angular de los elementos de las bobinas cruzadas respecto a la posición de la bobina de campo estacionario. Se puede demostrar que cuando el elemento móvil está equilibrado, su desplazamiento angular es función del ángulo de fase entre la corriente de línea (bobina de campo) y el voltaje de línea (bobinas cruzadas). La indicación de la aguja, la cual está unida al elemento móvil, se calibra en términos del ángulo de fase o del factor de potencia.

La construcción del medidor de factor de potencia de aleta polarizada se muestra en la figura siguiente. Este instrumento es utilizado en sistemas de energía trifásica, ya que su principio de operación depende de la aplicación de voltajes trifásicos. La bobina exterior es la bobina de potencial, la cual está conectada a la línea trifásica del sistema.

La aplicación del voltaje trifásico a la bobina de potencial hace que esta actúe como estator de un motor de inducción trifásico, con lo cual se crea un flujo magnético rotatorio.



La bobina central o bobina de corriente se conecta en serie con una de las líneas de fase y está polarizada las aletas de hierro. Las aletas polarizadas se mueven por el campo magnético rotatorio y toman la posición que el campo rotatorio tiene cuando el flujo de polarización es máximo. Esta posición es una indicación del ángulo de fase y por lo tanto del factor de potencia.

El instrumento se puede utilizar en sistemas monofásicos, con una red de desplazamiento de fase (similar a la utilizada en los motores monofásicos) para obtener el campo magnético rotatorio requerido.

## 9. MEDICIONES CON PUENTES

Las medidas de precisión de valores de componentes se han hecho por muchos años utilizando diferentes tipos de puentes. El más simple tiene el propósito de medir la resistencia y se llama puente. Existen variaciones del puente Wheatstone para medir resistencias muy altas y muy bajas. Hay una amplia variedad de puentes de CA para medir inductancia, capacitancia, admitancia, conductancia y cualquier parámetro de impedancia. Los puentes de propósito general no se pueden utilizar en cualquier medición. Algunas mediciones especializadas, como la impedancia a altas frecuencias, se pueden efectuar con un puente.

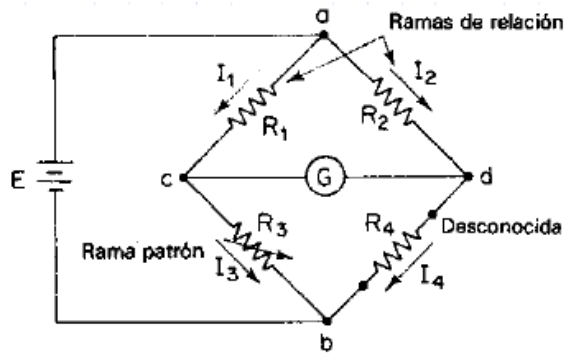
El circuito puente forma la parte principal en algunas mediciones y como interface de transductores. Por ejemplo, hay puentes totalmente automáticos que determinan electrónicamente la condición nula del puente para hacer mediciones de componentes con precisión.



#### 8.4. Puente Wheatstone

La siguiente figura esquematiza un puente Wheatstone.

El puente tiene cuatro ramas resistivas, junto con una fuente de fem (una batería) y un detector de cero, generalmente un galvanómetro. La corriente a través del galvanómetro depende de la diferencia de potencial en los puntos c y d. Se dice que el puente está balanceado (o en equilibrio) cuando la diferencia de potencial a través del galvanómetro es 0 V, de forma que no hay paso de corriente a través de él. Esta condición se cumple cuando el voltaje del punto "c" al punto "a" es igual que el voltaje del punto "d" al punto "a"; o bien tomando como referencia la otra terminal de la batería, cuando el voltaje del punto "c" al punto "b" es igual que el voltaje del punto "d" al punto "b".



Por lo tanto el puente está equilibrio cuando:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

Si la corriente del galvanómetro es cero, la siguiente condición también se cumple:

$$I_1 = I_3 = \frac{E}{R_1 + R_3} \quad y \quad I_2 = I_4 = \frac{E}{R_2 + R_4}$$

Al combinar las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{R_2}{R_2 + R_4} \quad y \quad R_1 R_4 = R_2 R_3$$

La ecuación final anterior es la expresión conocida para el equilibrio del puente Wheatstone. Si tres de las resistencias tienen valores conocidos, la cuarta puede establecerse a partir de la ecuación en mención. De aquí si  $R_4$  es la resistencia desconocida y su valor  $R_x$  puede expresarse en términos de las resistencias restantes como sigue:

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

La resistencia  $R_3$  se denomina rama patrón del puente y las resistencias  $R_2$  y  $R_1$  se les nombran ramas de relación.

### 8.4.1. Errores de medición

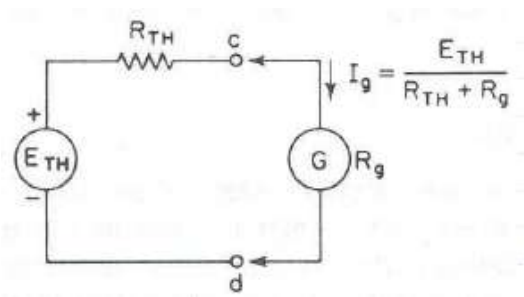
El puente Wheatstone se emplea ampliamente en las mediciones de precisión de resistencias desde 1  $\Omega$  hasta varios megaohms. La principal fuente de errores de medición se encuentra en los errores límites de las tres resistencias conocidas. Otros errores pueden ser los siguientes:

- Sensibilidad insuficiente en el detector de cero (Circuito equivalente Thévenin).
- Cambios en la resistencia de las ramas del puente debido a efectos de calentamiento por la corriente a través de los resistores ( $I^2R$ ) 75°C.
- Las fem térmicas en el circuito del puente o del galvanómetro pueden causar problemas cuando se miden resistencias de bajo valor, para prevenirlas se utilizan los galvanómetros más sensibles que algunas veces tiene bobinas y sistemas de suspensión de cobre para evitar el contacto de metales disímiles y la generación de fem térmicas.
- Los errores debidos a la resistencia de los contactos y terminales exteriores al circuito puente intervienen en la medición de los valores de resistencia muy bajos. Estos errores se pueden reducir mediante el uso del puente Kelvin.

### 8.4.2. Circuito equivalente Thévenin

Para saber si el galvanómetro tiene sensibilidad para detectar el estado de desequilibrio, es necesario calcular la corriente en el detector. Diferentes galvanómetros además de tener diferentes corrientes por unidad de deflexión (sensibilidad de corriente) también pueden tener una resistencia interna diferente. Es imposible afirmar, sin un cálculo previo, cuál galvanómetro será más sensible en el circuito puente para la condición de desequilibrio. Esta sensibilidad se calcula “analizando” el circuito puente para un pequeño desequilibrio. La solución se obtiene al determinar el equivalente Thévenin del puente Wheatstone.

Puesto que el parámetro de interés es la corriente a través del galvanómetro, el circuito equivalente Thévenin se determina a partir de las terminales del galvanómetro “c” y “d”. Se debe realizar dos pasos para encontrar el equivalente de



*Aplicación del teorema de Thévenin al puente Wheatstone.*

El voltaje de Thévenin o de circuito abierto, lo obtenemos refiriéndonos a la figura a) y se obtiene:

$$E_{cd} = E_{ac} - E_{ad} = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

Donde

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_3} \quad y \quad I_2 = \frac{E}{R_2 + R_4}$$

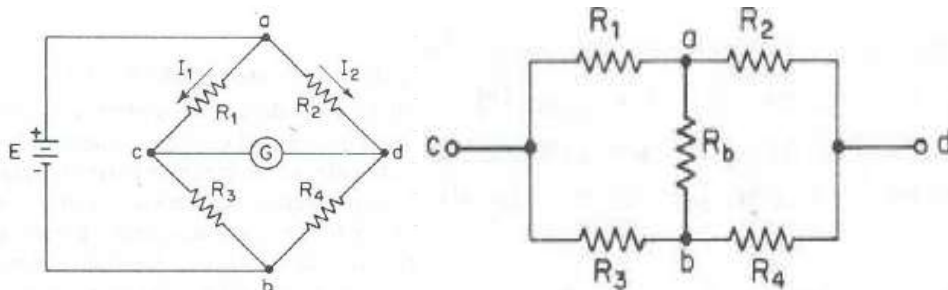
Por consiguiente

$$E_{cd} = E \left( \frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right)$$

Esto es el voltaje del generador Thévenin.

La resistencia del circuito equivalente Thévenin se encuentra observando hacia las terminales “c” y “d” y reemplazando la batería por su resistencia interna. El circuito b) representa la resistencia Thévenin. La resistencia interna de la batería  $R_b$  se incluye en la figura b). Para convertir este circuito a una forma más conveniente se requiere el uso de la transformación delta-estrella. En la mayoría de los casos dado que la resistencia interna de la batería es muy baja, se puede despreciar lo cual simplifica el circuito de Thévenin:

- 1) Encontrar el voltaje equivalente que se presenta en las terminales “c” y “d” cuando se desconecta el galvanómetro del circuito.
- 2) Determinar la resistencia equivalente a las terminales “c” y “d” con la batería reemplazada por su resistencia interna.



la figura a) para su equivalente Thévenin.

En relación con la figura b) se observa que entre los puntos “a” y “b” existe un cortocircuito cuando la resistencia interna de la batería es 0 H. La resistencia de Thévenin, en las terminales “c” y “d” es:

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}$$

El equivalente de Thévenin del circuito del puente Wheatstone se reduce a un generador Thévenin (ECC) con una fem y una resistencia interna ( $R_{TH}$ ). Cuando el detector de cero se conecta en las terminales de salida del circuito equivalente Thévenin, la corriente del galvanómetro es:

$$I_g = \frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_g}$$

donde  $I_g$  es la corriente del galvanómetro y  $R_g$  su resistencia.

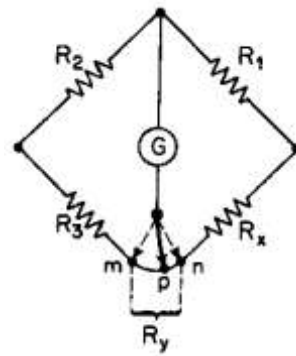
El puente Wheatstone está limitado para la medición de resistencias que tienen valores de pocos ohms hasta varios megaohms. El límite superior se debe a la reducción de sensibilidad del desequilibrio, ocasionada por los elevados valores de las resistencias, ya que en este caso la resistencia equivalente a Thévenin llega a ser alta, lo que reduce la corriente del galvanómetro. El límite inferior lo determina la resistencia de los alambres de conexión y la resistencia de los contactos de los bornes de conexión. La resistencia de los alambres se puede calcular o medir, modificar el resultado final, pero la resistencia de los contactos es difícil de calcular y medir.

## 8.5. PUENTE KELVIN

### 8.5.1. Efectos de los alambres de conexión

El puente Kelvin es una modificación del Wheatstone y proporciona un gran incremento en la exactitud de las mediciones de valor bajo, por lo general inferiores a  $1 \Omega$ .

Considérese el circuito puente de la figura anterior, donde  $R_y$  representa la resistencia del alambre de conexión de  $R_3$  a  $R_x$ . Son posibles dos conexiones del galvanómetro, en el punto "m" o en el punto "n". Cuando el galvanómetro se conecta en el punto "m", la resistencia  $R_y$  del alambre de conexión se



suma a la desconocida  $R_x$  resultando una indicación por arriba de  $R_x$ . Cuando la conexión se hace en el punto "n",  $R_y$  se suma a la rama del puente  $R_3$  y el resultado de la medición de  $R_x$  será menor que el que debería ser, porque el valor real de  $R_3$  es más alto que su valor nominal debido a la resistencia  $R_y$ . Si el galvanómetro se conecta en el punto "p", entre "m" y "n", de tal forma que la razón de la resistencia de "n" a "p" y "m" a "p" iguale la razón de los resistores  $R_1$  y  $R_2$ , entonces:

$$\frac{R_{np}}{R_{mp}} = \frac{R_1}{R_2}$$

La ecuación de equilibrio para el puente nos da:

$$R_x + R_{np} = \frac{R_1}{R_2} (R_3 + R_{mp})$$

Al sustituir las ecuaciones anteriores se obtiene:

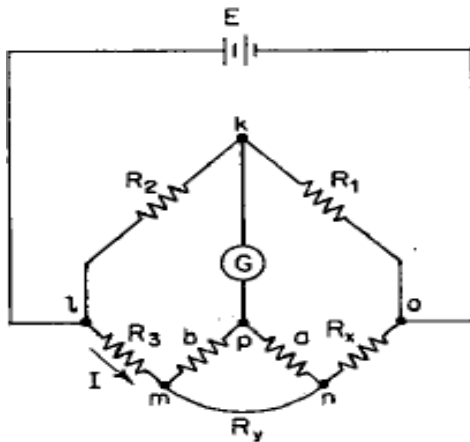
$$R_x + \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) R_y = \frac{R_1}{R_2} \left( R_3 + \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) R_y \right)$$

Lo cual se reduce a:

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

### 8.5.2. Puente doble Kelvin

El término puente doble se usa debido a que el circuito contiene un segundo juego de ramas de relación.



Este segundo conjunto de ramas, marcadas “a” y “b” en el diagrama, se conectan al galvanómetro en el punto “p” con el potencial apropiado entre “m” y “n”, lo que elimina el efecto de la resistencia  $R_y$ . Una condición establecida inicialmente es que la relación de la resistencia de “a” y “b” debe ser la misma que la relación  $R_1$  y  $R_2$ . La indicación del galvanómetro será cero cuando el potencial en “k” sea igual al potencial en “p”, o cuando:

$$E_{kl} = E_{lmp}, \text{ donde :}$$

$$E_{kl} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \left( R_3 + R_x + \frac{(a + b)R_y}{a + b + R_y} \right)$$

y

$$E_{lmp} = I \left( R_3 + \frac{b}{a+b} \cdot \left( \frac{(a+b)R_y}{a+b+R_y} \right) \right)$$

Resolviendo  $R_x$  e igualando  $E_{kl}$  y  $E_{lmp}$  de la siguiente manera:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} I \left( R_3 + R_x + \frac{(a+b)R_y}{a+b+R_y} \right) = I \left( R_3 + \frac{b}{a+b} \cdot \left( \frac{(a+b)R_y}{a+b+R_y} \right) \right)$$

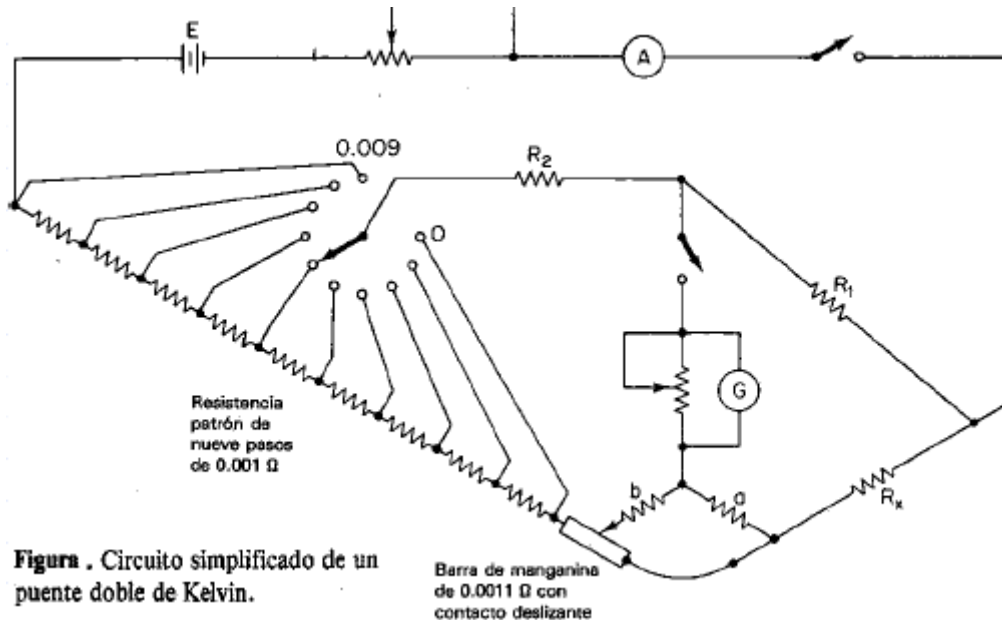
Al aplicar la condición establecida inicialmente de que  $a/b = \frac{R_1}{R_2}$ , la ecuación se reduce a la relación:

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

La ecuación representa la ecuación de trabajo para el puente Kelvin, Indica que la resistencia  $R_y$  no tiene efecto en la medición, siempre y cuando los dos conjuntos de ramas de relación tengan igual relación de resistencia.

El puente Kelvin se utiliza para medir resistencias muy bajas, de aproximadamente  $1 \text{ H}$  hasta  $0.00001 \text{ H}$ . La siguiente figura muestra el diagrama del circuito simplificado de un puente Kelvin comercial que mide resistencias de  $10 \text{ H}$  a  $0.00001 \text{ H}$ .

En este puente, la resistencia  $R_3$  de la ecuación de trabajo del puente Kelvin se representa por una resistencia patrón variable en la figura. Las ramas de relación ( $R_1$  y  $R_2$ ) se pueden colocar mediante una década de resistencias.



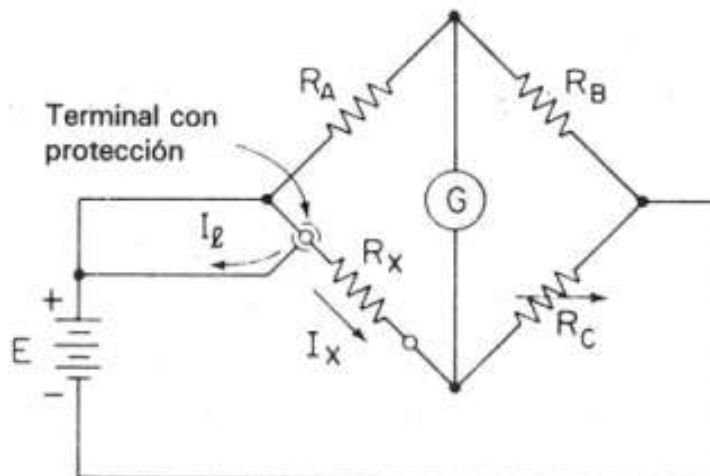
Las caídas de potencial de contacto en el circuito de medición pueden ocasionar grandes errores; para reducir este efecto la resistencia patrón consiste de 9 pasos de  $0.001 \text{ H}$  cada uno, más una barra de manganina calibrada de  $0.0011 \text{ H}$  con un contacto deslizante. La resistencia total de la rama  $R_3$  suma  $0.0101 \text{ H}$  y es variable en pasos de  $0.001 \text{ H}$ , más fracciones de  $0.0011 \text{ H}$  del contacto deslizante. Cuando ambos contactos se escogen para seleccionar el valor conveniente de la resistencia patrón, cambia la caída de voltaje entre los puntos de conexión de las ramas de relación. Este arreglo coloca toda resistencia de contacto en serie con los valores de resistencia relativamente altos de las ramas de relación y la resistencia de contacto tiene efectos despreciables. La razón  $R_1/R_2$  se debe seleccionar de tal forma que una parte relativamente alta de la resistencia patrón se use en el circuito de medición. En esta forma el valor de la resistencia desconocida  $R_x$  se determina con el mayor número posible de cifras significativas y mejora la exactitud de la medición.

## 8.6. PUENTE WHEATSTONE CON PROTECCIÓN

### 8.6.1. Circuitos con protección

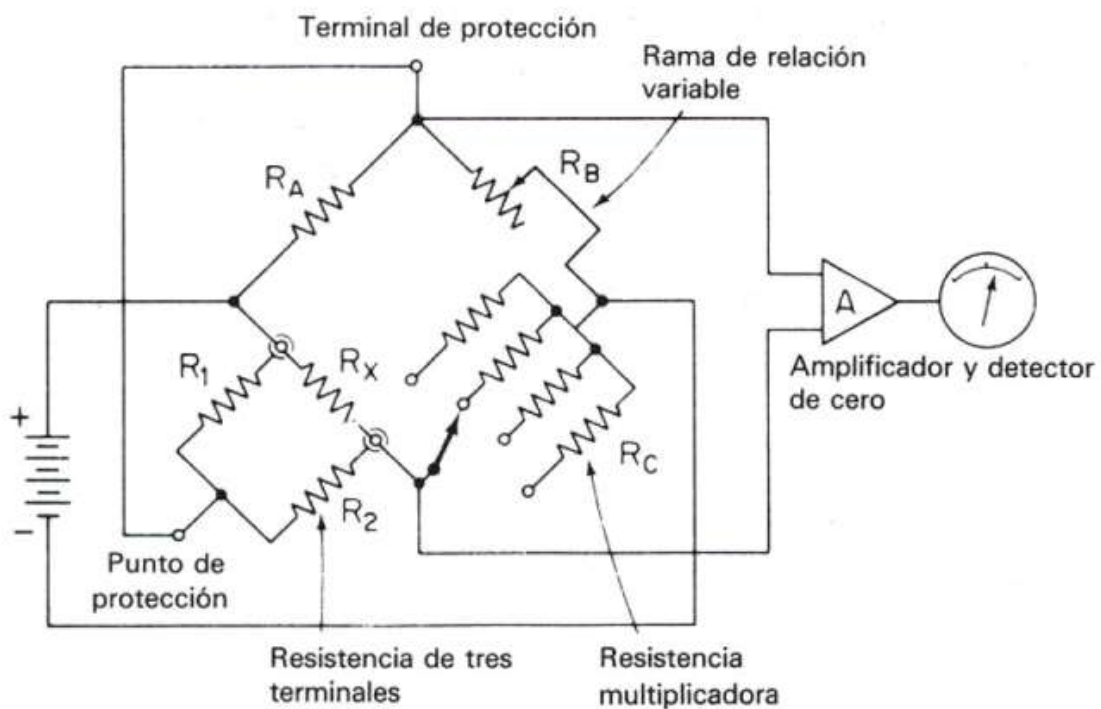
La medición de resistencias muy altas como la de aislamiento de un cable o la fuga de un capacitor supera la capacidad del puente de Wheatstone ordinario. Como se requiere voltajes altos para obtener una sensibilidad de deflexión suficiente. La corriente de fuga se elimina mediante algún circuito de protección. Un alambre de protección, que rodea la superficie aislante de la terminal, intercepta la corriente de

fuga y la regresa a la batería, evitando que entre al circuito puente. La figura siguiente esquematiza la protección:



### 8.6.2. Resistencia de tres terminales

Para evitar la pérdida de corriente externa al circuito puente, la unión de las ramas de relación  $R_A$  y  $R_B$  se toma como una terminal de protección separada del panel frontal del instrumento. La alta resistencia se coloca sobre dos terminales aisladas. Los dos terminales principales se conectan a la  $R_X$  y el tercer terminal es el punto en común de las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ .



## 8.7. PUENTES DE CA Y SUS APLICACIONES

Los puentes de corriente alterna son más versátiles y en consecuencia tienen más aplicaciones que los puentes de C.C. Se usan en medidas de resistencias en C.A., inductancia, capacidad e inductancia mutua, en función de patrones conocidos y relaciones conocidas de elementos. Su forma básica consiste en un puente de cuatro ramas, una fuente de excitación (alterna) y un detector de cero (audífono, amplificador de C.A. con osciloscopio, etc.). Para bajas frecuencias se puede utilizar la línea de potencia como fuente de excitación; y a altas frecuencias se puede utilizar un oscilador. La forma general de un puente de C.A.

El equilibrio se alcanza cuando la respuesta del detector es cero o indica corriente nula. El ajuste para obtener una respuesta nula se hace variando una o más ramas del puente. Las condiciones de equilibrio son:

$$E_{BA} = E_{BC} \text{ ó } I_1 Z_1 = I_2 Z_2$$

Para la corriente del detector (condición de equilibrio), la corriente es:

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_3}$$

$$I_2 = \frac{E}{Z_2 + Z_4}$$

Al sustituir las ecuaciones se obtiene:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

Esta ecuación es la general para el equilibrio de un puente de CA.

### Igualdades complejas para el equilibrio

Si las impedancias se escriben en forma polar, entonces la ecuación anterior es simplemente una igualdad de números complejos:

$$|Z_1| |Z_4| = |Z_2| |Z_3|$$

$$\theta_1 \theta_4 = \theta_2 \theta_3$$

Donde la primera ecuación es la igualdad de módulos de las ramas opuestas y la segunda es la igualdad de argumentos de ramas opuestas. Para determinar si un puente es ajustable o no, se deben verificar ambas igualdades.

### Criterio de selección de ramas

La elección de los elementos del circuito para el ajuste del equilibrio del puente representa ordinariamente un compromiso entre varios factores, tales como la exactitud (se busca elementos exactos y estables, en orden de exactitud son la resistencia, el capacitor y el menos exacto la inductancia), y la facilidad y rapidez con que se llega al equilibrio. También influyen otros factores para la elección final de las



ramas, como ser el cambio de la capacidad parásita al variar un elemento, y la posibilidad de equilibrio, lo cual se evalúa con el ángulo de convergencia  $\gamma_c$ .

#### Ángulo de convergencia, lugares de variación de parámetros

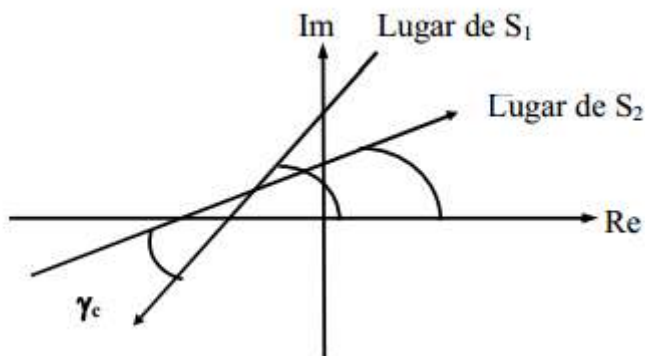
La rapidez con la cual se llega al equilibrio depende del ángulo de convergencia ( $\gamma_c$ ), ya que el mismo determina en cuantos pasos se llegará al cero. Para calcular  $\gamma_c$  se considera que no se cumple con la ecuación anterior, esto es:

$$Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3 = d$$

Donde  $d$  representa un pequeño desequilibrio, es decir, que cuando  $d$  tiende a cero se logra el equilibrio. En general para lograr el equilibrio se varían al menos dos parámetros  $S_1$  y  $S_2$  (complejos). Se define  $\gamma_c$  como:

$$\gamma_c = \arg\left(\frac{\partial d}{\partial S_1}\right) - \arg\left(\frac{\partial d}{\partial S_2}\right)$$

Donde  $\left(\frac{\partial d}{\partial S_1}\right)$  y  $\left(\frac{\partial d}{\partial S_2}\right)$  se representan cada uno una recta en el plano complejo:



A estas rectas se las denomina lugares de ajuste de  $S_1$  y  $S_2$ . Para determinar el equilibrio se hacen ajustes sucesivos de  $S_1$  y  $S_2$  obteniendo distintos valores de  $d$  en cada caso. Se supone que se obtiene exactamente el mínimo en cada ajuste. La aproximación a al cero,  $d=0$ , se ve que consta de una sucesión de pasos en zigzag. El número de pasos necesarios depende del ángulo  $\gamma_c = \beta - \alpha$  donde  $\beta$  es argumento del lugar  $S_1$ , y  $\alpha$  el argumento del lugar  $S_2$ .

### 8.8. PUENTE DE MAXWELL

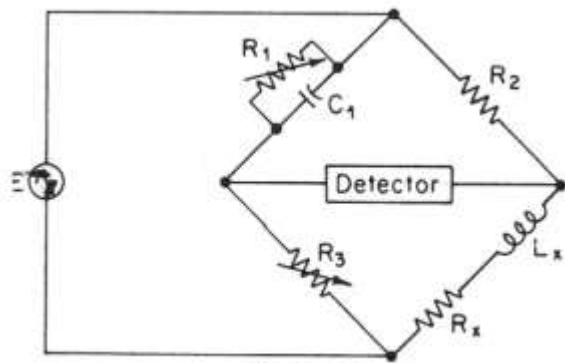


Figura 7.12

Este puente de C.A. se utiliza para medir una inductancia desconocida en términos de una capacitancia conocida. Una de las ramas de relación tiene una resistencia y una capacidad en paralelo.

Escribiendo la ecuación en términos de  $Z_x$  (impedancia de la rama desconocida) se obtiene:

$$Z_x = \frac{Z_2 Z_3}{Z_1}$$

Al escribir utilizando la admitancia  $Y_1$ :

$$Z_x = Z_2 Z_3 Y_1$$

Observando a la figura 7.12, se obtiene que:

$$Z_2 = R_2; \quad Z_3 = R_3; \quad \text{y} \quad Y_1 = \frac{1}{R_1} + j\omega C_1$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular ( $2\pi f$ ). Sustituyendo estos valores en las ecuaciones da:

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

Cuya parte real es:

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

Y la imaginaria:

$$L_x = R_2 R_3 C_1$$

Cabe aclarar que las resistencias se expresan en ohms, las inductancias en henrys y las capacitancias en faradios.

#### Limitaciones

El puente de Maxwell se limita a la medición de  $Q$  medio ( $1 < Q < 10$ ). Esto se fundamenta utilizando la ecuación anterior, puesto que los ángulos de fase de  $R_2$  y  $R_3$  suman  $0^\circ$  y la suma de los ángulos de las ramas 1 y 4 también será  $0^\circ$ , por lo tanto el ángulo de una bobina de  $Q$  alto sería cercano a  $+90^\circ$ , pero el ángulo de fase de la rama

capacitiva debería estar en  $-90^\circ$  lo que significaría  $R_1$  muy grande lo que es poco práctico; por esta razón, para estos valores de  $Q$  se utiliza el puente de Hay. Para  $Q < 1$  existen problemas de convergencia debido a la aparición del denominado equilibrio deslizante por valores de  $Q$  bajos (se genera una interacción entre los controles). El procedimiento normal para equilibrar el puente de Maxwell consiste en ajustar  $R_3$  hasta que obtener el equilibrio inductivo y luego ajustar  $R_1$  hasta obtener el equilibrio resistivo, repitiéndose este proceso hasta el equilibrio definitivo.

### 8.9. PUENTE DE HAY

Como primera característica de este puente, se puede mencionar su utilización para la medición de inductancias. En la figura se observa la configuración clásica del puente Hay. A primera vista este puente no difiere demasiado de su equivalente de Maxwell, salvo que en esta ocasión el capacitor  $C_1$  se conecta en serie con la resistencia  $R_1$ , por lo tanto para ángulos de fase grandes la resistencia  $R_1$  debe tener un valor muy bajo. Es esta pequeña diferencia constructiva la que permite su utilización para la medición de bobinas de  $Q$  alto ( $Q > 10$ ).

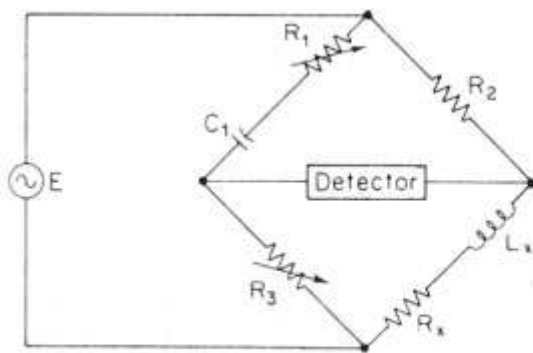


Figura 7.13

Si se sustituyen los valores de impedancias de las ramas del puente en la ecuación general de equilibrio de los puentes de CA, se obtiene:

$$Z_1 = R_1 - \frac{j}{\omega C_1} \quad Z_2 = R_2 \quad Z_3 = R_3 \quad Z_x = R_x + j\omega L_x$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación de equilibrio:

$$\left( R_1 - \frac{j}{\omega C_1} \right) (R_x + j\omega L_x) = R_2 R_3$$

Si se distribuye:

$$R_1 R_x + \frac{L_x}{C_1} - \frac{j R_x}{\omega C_1} + j\omega L_x R_1 = R_2 R_3$$

Separando los términos reales de los imaginarios:

$$R_1 R_x + \frac{L_x}{C_1} = R_2 R_3$$

$$\frac{R_x}{\omega C_1} = \omega L_x R_1$$

Como en ambas ecuaciones están presentes los términos  $L_x$  y  $R_x$ , se deben resolver simultáneamente, entonces:

$$R_x = \frac{\omega^2 C_1^2 R_1 R_2 R_3}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2} \quad L_x = \frac{R_2 R_3 C_1}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2}$$

Como se puede observar en las expresiones tanto la inductancia como la resistencia desconocida se encuentran en función de la velocidad angular  $\omega$ , por lo tanto sería necesario conocer con exactitud la frecuencia de la fuente de voltaje. Observando la figura:



Figura 7.14

Se deduce que:

$$\tan \theta_L = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L_x}{R_x} = Q$$

$$\tan \theta_C = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega C_1 R_1}$$

Si los ángulos de fase son iguales, sus tangentes también lo son:

$$\tan \theta_L = \tan \theta_C \Rightarrow Q = \frac{1}{\omega C_1 R_1}$$

Si se reemplaza en las igualdades, se obtiene:

$$L_x = \frac{R_2 R_3 C_1}{1 + \left( \frac{1}{Q^2} \right)}$$

Para  $Q > 10$ , el término  $(1/Q^2) < 1/100$ , por lo tanto:

$$L_x \cong R_2 R_3 C_1$$

En resumen se puede decir que para la medición de inductores con Q alto ( $Q > 10$ ) se debe utilizar el puente Hay. En el caso de inductores de Q bajo ( $Q < 10$ ) el método apropiado es la medición a través del puente Maxwell.

### 8.10. PUENTE DE OWEN

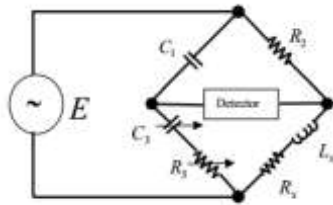


Figura 7.13

El puente Owen es ampliamente utilizado para la medición de inductores, más precisamente para aquellas inductancias con factor de calidad bajos ( $Q < 1$ ). Su configuración clásica se representa en la figura, y observando esta se puede remplazar la ecuación de equilibrio para los puentes de C.A.:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

Por lo tanto:

$$\left( -\frac{1}{j\omega C_1} \right) (R_x + j\omega L_x) = R_2 \left( R_3 - \frac{1}{j\omega C_3} \right)$$

Si se igualan las partes reales e imaginarias, se obtiene:

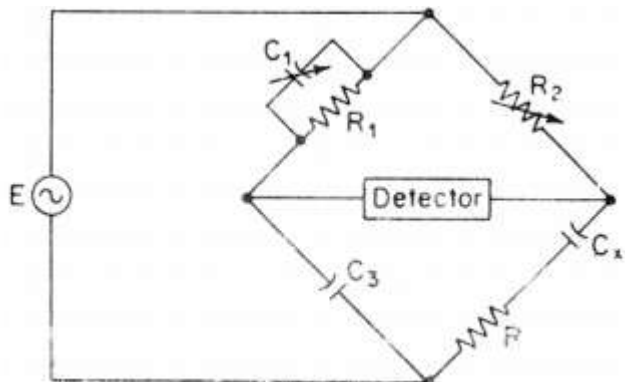
$$R_x = \frac{C_1 R_2}{C_3} \quad L_x = C_1 R_2 R_3$$

Como se puede ver de las ecuaciones, el equilibrio del puente es independiente de la frecuencia, y como el término  $C_1 R_2$  es conocido, dicho equilibrio depende de los elementos ajustables  $C_3$  y  $R_3$ .

### 9.7. PUENTE DE SCHERING

El puente de Schering se utiliza para la medición de capacitores, siendo de suma utilidad para la medición de algunas de las propiedades de aislamiento (tgd), con ángulos de fase muy cercanos a  $90^\circ$ .

En la figura, se muestra el circuito típico del puente Schering, nótese que la rama patrón (rama 3) solo contiene un capacitor. Por lo general, el capacitor patrón es de mica de alta calidad para las mediciones generales de capacidad, o puede ser de un capacitor de aire para mediciones de aislamiento. Los capacitores de mica de buena calidad, poseen pérdidas muy bajas y por consiguiente un ángulo aproximado de  $90^\circ$ , en cambio un capacitor de aire tiene un valor



muy estable y un campo eléctrico muy pequeño, por lo tanto el material aislante se puede conservar fuera de cualquier campo fuerte. Puesto que el capacitor patrón está en la rama 3, las sumas de los ángulos de fase de las ramas 2 y 3 será  $0^\circ + 90^\circ = 90^\circ$ , para cumplir con la ecuación de equilibrio, se necesita que los ángulos de fase de las ramas 1 y 4 sea de  $90^\circ$ . La Conexión en paralelo del capacitor  $C_1$  con el resistor  $R_1$  proporciona a la rama 1 un ángulo de fase pequeño, ya que en general la medición desconocida  $Z_x$  posee un ángulo de fase menor de  $90^\circ$ .

Planteando la ecuación general de equilibrio de los puentes de CA

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

Aplicando la ecuación anterior al circuito de la figura:

$$Z_x = Z_2 Z_3 Y_1$$

Por lo tanto:

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

Si se expande:

$$R_x - \frac{j}{\omega C_x} = \frac{R_2 C_1}{C_3} - \frac{j R_2}{\omega C_3 R_1}$$

Igualando los términos reales y los imaginarios:

$$R_x = R_2 \frac{C_1}{C_3} \quad C_x = C_3 \frac{R_1}{R_2}$$

Si se observa en el circuito de la figura, se puede ver que las dos variables que se escogen para el ajuste del equilibrio son el capacitor  $C_1$  y el resistor  $R_2$ . El factor de potencia o  $\cos\phi$  de la impedancia desconocida será:

$$PF = \frac{R_x}{Z_x}$$

Para ángulos muy cercanos a  $90^\circ$ , la reactancia es casi igual a la impedancia, por lo tanto:

$$PF \cong \frac{R_x}{X_x} = \omega C_x R_x$$

Entonces queda definido el factor de disipación  $D$  o  $\tan \delta$  de un dieléctrico (representado por un circuito serie RC) como:

$$\tan \delta = \frac{R_x}{X_x} = \omega C_x R_x$$

Como ya hemos visto, el factor de calidad de una bobina se define como  $Q = X_l / R_l$ , por lo tanto de la ecuación se observa que  $\tan \delta$  es el recíproco del factor de calidad ( $Q$ ), entonces:

$$\operatorname{tg} \delta = 1/Q$$

La  $\operatorname{tg} \delta$  es un factor que indica la calidad del capacitor, da la noción de cuan cercano esta el ángulo de fase del capacitor del valor ideal de  $90^\circ$ . Con las ecuaciones anteriores en la expresión para  $\operatorname{tg} \delta$ , se tiene:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_1 R_1$$

Si el resistor  $R_1$  tiene un valor fijo, el dial del capacitor  $C_1$  se puede calibrar directamente en función de la  $\operatorname{tg} \delta$ . Esta es la utilidad práctica del puente de Schering, ya que el término  $\omega$  aparece en la expresión de la  $\operatorname{tg} \delta$  por lo tanto la calibración del dial  $C_1$  solo se conserva para la frecuencia a la cual se calibró el dial. Se puede utilizar una frecuencia diferente multiplicando el dial  $C_1$  por la relación de las dos frecuencias.

## 10. INSTRUMENTOS ELECTRÓNICOS PARA MEDICIÓN DE PARÁMETROS BÁSICOS.

### 10.1. Medida de corrientes eléctricas. Amperímetros

Es un aparato fundamental del que se derivan la mayor parte de instrumentos de medida industriales. Se conecta en serie con el circuito cuya corriente se quiere medir, de esta forma, la resistencia interna del aparato deberá ser muy pequeña, por dos razones:

- Para que la caída de tensión en la resistencia sea despreciable, frente a la que actúa sobre el circuito y no altere sensiblemente la corriente del mismo.
- Para minimizar la potencia disipada en él por efecto Joule.

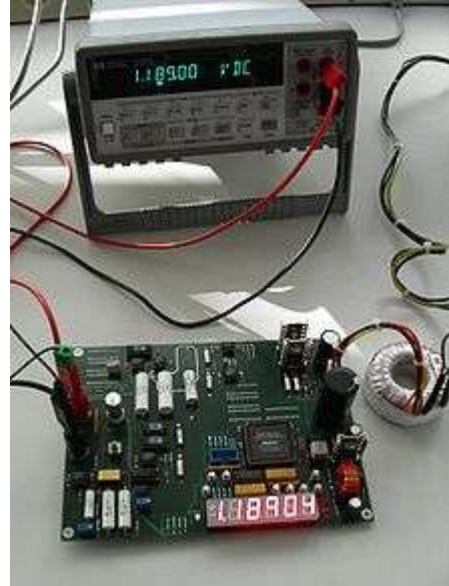


Los más económicos y más usados son los electromagnéticos para CA y los magnetoeléctricos de bobina móvil para CC.

### 10.2. Medida de tensión. Voltímetros

Un voltímetro es un instrumento que sirve para medir la diferencia de potencial o voltaje entre dos puntos de un circuito eléctrico cerrado pero a la vez abierto en los polos. Los voltímetros se clasifican por su funcionamiento mecánico, siendo en todos los casos el mismo instrumento:

- **Voltímetros electromecánicos:** están constituidos por un galvanómetro cuya escala ha sido graduada en voltios. Existen modelos que separan las corrientes continua y alterna de la señal, pudiendo medirlas independientemente.
- **Voltímetros electrónicos:** añaden un amplificador para proporcionar mayor impedancia de entrada y mayor sensibilidad.
- **Voltímetros vectoriales:** se utilizan con señales de microondas. Además del módulo de la tensión dan una indicación de su fase.
- **Voltímetros digitales:** dan una indicación numérica de la tensión, normalmente en una pantalla tipo LCD. Suelen tener prestaciones adicionales como memoria, detección de valor de pico, verdadero valor eficaz (RMS), selección automática de rango y otras funcionalidades.



Para efectuar la medida de la diferencia de potencial el voltímetro ha de colocarse en paralelo, esto es, en derivación sobre los puntos entre los que se trata de efectuar la medida. Para ello, en el caso de instrumentos basados en los efectos electromagnéticos de la corriente eléctrica, están dotados de bobinas de hilo muy fino y con muchas espiras, con lo que con poca intensidad de corriente a través del aparato se consigue la fuerza necesaria para el desplazamiento de la aguja indicadora

### 10.3. Tenaza voltiamperimétrica

Se utiliza generalmente en circuitos de corriente alterna de baja tensión para medir esencialmente la intensidad de corriente que circula por un conductor, sin necesidad de interrumpir el circuito. El aparato tiene la forma de una pinza que constituye el núcleo magnético de un transformador de intensidad. Sobre el está montado el secundario del transformador a la pinza formando un solo conjunto. El primario del transformador de intensidad lo constituye el propio conductor cuya intensidad se desea medir.



La uso de la pinza voltiamperimétrica como voltímetro se efectúa conectando a unos bornes, que al efecto lleva la pinza, unos conductores flexibles en derivación con el circuito a medir.



#### 10.4. Tacómetro



Es un aparato que permite medir la velocidad del eje de una máquina eléctrica. Generalmente la medida se da en revoluciones por minuto (r.p.m.).

Los tacómetros son utilizados a nivel industrial en donde es necesario monitorear constantemente la velocidad de los motores eléctricos con el propósito de mantener los procesos, dentro de los márgenes establecidos por la misma empresa

#### 10.5. Megohmetro

Utilizado a nivel industrial, el Megohmetro o megger es un aparato que permite establecer la resistencia de aislamiento existente en un conductor o sistema de tierras. Funciona en base a la generación temporal de una sobrecorriente eléctrica la cual se aplica al sistema hasta que se rompe su aislamiento, al establecerse un arco eléctrico. El megger es un instrumento del tipo de los ohmímetros, en el que el valor de la resistencia que se mide se registra directamente sobre una escala y esta indicación es independiente de la tensión.

Consta de dos partes principales: un generador de corriente continua de tipo magnetoeléctrico, movido generalmente a mano o electrónicamente (Megger digital), que



suministra la corriente para llevar a cabo la medición, y el mecanismo del instrumento por medio del cual se mide el valor de la resistencia que se busca. El Megohmetro tiene dos imanes permanentes rectos, colocados paralelamente entre sí. El inducido del generador, junto con sus piezas polares de hierro, está montado entre dos de los polos de los imanes paralelos, y las piezas polares y el núcleo móvil del instrumento se sitúan entre los otros dos polos de los imanes. El inducido del generador se

acciona a mano, regularmente, aumentándose su velocidad por medio de engranajes. Para los ensayos corrientes de aislamiento, la tensión que más se usa es la de 500 voltios, pero con el fin de poder practicar ensayos simultáneos a alta tensión, pueden utilizarse tensiones hasta 2500 voltios.

### 10.6. Polímetro

Son aparatos de medida con los que se pueden realizar la medición de varias magnitudes eléctricas, tanto en circuitos de CA, como de CC. Se utilizan de indicación analógica y digital.

Para realizar la medición de una determinada magnitud, hay que seleccionar previamente:

- 1) Clase de corriente (continúa o alterna).
- 2) Magnitud (intensidad, tensión, resistencia).
- 3) Calibre.



### 10.7. Transformadores de medida



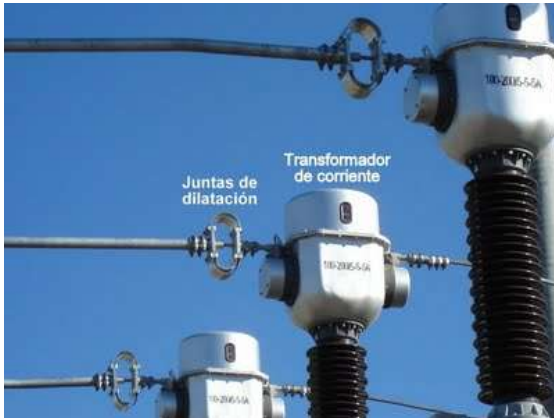
La conexión directa de un instrumento de medida para medir la intensidad o la tensión de un circuito, muchas veces no es factible. Unas veces porque los valores exceden el campo de medida del aparato, y otras, porque sería muy caro aislar los aparatos de medida en los circuitos de alta tensión, además de por razones de seguridad. La utilización de los transformadores de medida se basa en la posibilidad de obtener una magnitud secundaria de módulo proporcional al de la del primario y de la misma fase.

### 10.8. Transformadores de tensión

Constan de dos devanados cuya relación de tensión viene dada por la AT a medir y, normalmente, el valor de 110 V que se aplica al instrumento de medida. Están diseñados de forma que la resistencia y la reactancia de dispersión son muy pequeñas, siendo así la relación de tensiones prácticamente igual a la relación de espiras. Su funcionamiento es prácticamente en vacío debido a que la impedancia del voltímetro colocado en el secundario es elevada. Normalmente el secundario se conecta a tierra para seguridad del personal y de la instalación.



### 10.9. Transformadores de intensidad



Tiene dos devanados, conectando el primario en serie con el circuito principal y el secundario a un amperímetro, cuya impedancia es muy pequeña y, por tanto, su funcionamiento es prácticamente en cortocircuito. La tensión en el secundario con el amperímetro conectado, es muy pequeña, pero si se desconectase el amperímetro, la intensidad por el secundario pasaría a ser cero y la tensión aumentaría mucho, ya que la intensidad por el primario seguiría siendo la misma.

Esta tensión elevada del secundario, sería peligrosa para el personal y para el propio transformador, por lo que siempre deberá evitarse dejar en circuito abierto un transformador de intensidad.

### 10.10. Contadores de energía eléctrica

Existen diversos tipos de contadores, pero el más utilizado es el contador de inducción. Está basado en el efecto de inducción, formado por una bobina voltimétrica y una amperimétrica, que actúa sobre un disco de aluminio produciendo un campo giratorio que mueve el disco. La bobina de tensión crea un campo magnético permanente al estar conectada en todo momento a la red, lo que induce en el disco una f.e.m. al ser el flujo variable. Esta f.e.m. inducida en el disco crea unas corrientes parasitarias al estar cerrado y, a su vez, dichas corrientes crean un campo magnético.

Cuando se conecta algún receptor, por la bobina de intensidad circula una intensidad que produce, a su vez, otro campo magnético que actúa sobre el disco, produciéndose un par de fuerzas que le hace girar. Es decir, el disco está sometido a dos campos magnéticos desfasados que producen un campo magnético resultante giratorio que corta el disco induciendo en él una f.e.m. Al estar cerrado dicho disco, se producen corrientes parasitarias denominadas de Foucault. Estas corrientes producen otro campo magnético con polaridad contraria al campo giratorio que lo produce, debido a la ley de Lenz.



### 10.11. Maxímetros

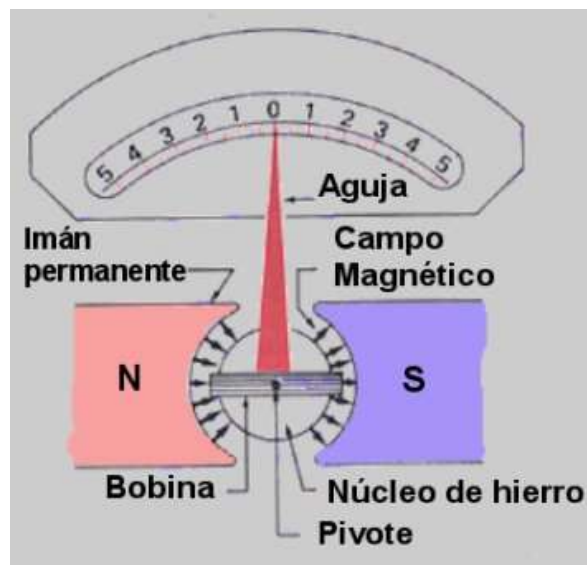


Es un aparato de medida encargado de contabilizar la máxima potencia demandada durante un periodo. Durante 15 minutos, la aguja está en tensión y vuelve a cero por la acción de un resorte que es mandado por el reloj del equipo de medida. En la escala graduada a existe otra aguja testigo que es arrastrada por la aguja de arrastre, denominada aguja lectora. Cada 15 minutos, la aguja de arrastre marca la potencia media demandada en ese periodo. En los siguientes 15 minutos, si la potencia es igual o menor, no se moverá la aguja de lectura; si es mayor, arrastrará la aguja testigo hasta el máximo.

### 10.12. Galvanómetro

Los galvanómetros son aparatos que se emplean para indicar el paso de corriente eléctrica por un circuito y para la medida precisa de su intensidad. Suelen estar basados en los efectos magnéticos o térmicos causados por el paso de la corriente.

En un galvanómetro de imán móvil la aguja indicadora está asociada a un imán que se encuentra situado en el interior de una bobina por la que circula la corriente que tratamos de medir y que crea un campo magnético que, dependiendo del sentido de la misma, produce una atracción o repulsión del imán proporcional a la intensidad de dicha corriente.



En el caso de los galvanómetros térmicos, lo que se pone de manifiesto es el alargamiento producido al calentarse, por el *Efecto Joule*, al paso de la corriente, un hilo muy fino arrollado a un cilindro solidario con la aguja indicadora.

### 10.13. Osciloscopio

Un osciloscopio es un instrumento de medición electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo. Es muy usado en electrónica de señal junto a un analizador de espectro.

Indica los valores de las señales eléctricas en forma de coordenadas en una pantalla, en la que normalmente el eje X (horizontal) representa tiempos y el eje Y (vertical) representa tensiones. La imagen obtenida se denomina oscilograma. Suelen incluir otra entrada, llamada "eje THRASHER" o "Cilindro de Wehnelt" que controla la luminosidad del haz, permitiendo resaltar o apagar algunos segmentos de la traza.

Los osciloscopios, clasificados según su funcionamiento interno, pueden ser tanto analógicos como digitales, siendo el resultado mostrado idéntico en cualquiera de los dos casos, en teoría.

Para medir se lo puede comparar con el plano cartesiano. El primer control regula el eje X (horizontal) y aprecia fracciones de tiempo (segundos, milisegundos, microsegundos, etc.). El segundo regula el eje Y (vertical) controlando la tensión de entrada (en Voltios, milivoltios, microvoltios, etc., dependiendo de la resolución del aparato).

Estas regulaciones determinan el valor de la escala cuadrícula que divide la pantalla, permitiendo saber cuánto representa cada cuadrado de ésta para, en consecuencia, conocer el valor de la señal a medir, tanto en tensión como en frecuencia.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

<http://es.wikipedia.org/wiki/Osciloscopio>

[http://es.wikipedia.org/wiki/Mediciones\\_el%C3%A9ctricas](http://es.wikipedia.org/wiki/Mediciones_el%C3%A9ctricas)

<http://www.mineco.gob.gt/mineco/calidad/Historia.pdf>

<http://es.scribd.com/doc/6698105/Aparatos-Para-Mediciones-Elctricas>

<http://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/simbologia-de-los-instrumentos-analogicos-para-mediciones-electricas>

<http://www.monografias.com/trabajos/medielectricos/medielectricos.shtml>

<http://es.scribd.com/doc/135816815/Medidas-Elctricas>