

EL 3003 LABORATORIO DE REDES

MEDICIONES ELECTRICAS

1.- Medición e Instrumentos de Medida

Bajo el concepto de medir se entiende la acción de registrar numéricamente la magnitud de una cantidad cuyo conocimiento interesa. Este registro adquiere significado cuando se compara la magnitud correspondiente con una unidad apropiada. La magnitud de medida es aquella magnitud física, química o de cualquier otra naturaleza, que se pretende medir.

En los métodos de medida se aprovechan determinadas propiedades o efectos del objeto de la medición, para relacionar, mediante un equipo de medida apropiado, la magnitud correspondiente con una unidad definida, o con un valor prefijado. El valor de la medida es el de la magnitud de medida determinado con ayuda de un equipo o instrumento adecuado para ese fin; se le expresa como el producto del valor numérico por la unidad correspondiente.

El equipo de medida es el conjunto de todos aquellos componentes con los que se realiza un método de medida basado en un principio determinado. Cuando el equipo consta de una sola unidad, se le denomina instrumento de medida; sin embargo, también se designan como instrumento de medida a aquellas partes de un equipo que son determinantes para las propiedades de medición (patrones de medida, transformadores de corriente, amplificadores). Los restantes componentes de un equipo de medida, que no tienen influencia en las propiedades de medición, reciben el nombre de aparatos auxiliares o accesorios (fuentes de energía, elementos de ajuste, elementos de unión eléctrica, amplificadores de valor cero, etc.)

Los elementos de una instalación o equipo de medida que pueden ser identificados por la función que cumplen (transductores, detectores, elementos de transformación y elaboración, emisores) no siempre forman componentes propios de aparatos. Entre los elementos de un equipo se transmiten las llamadas señales de medida, que constituyen una medida de la magnitud, pero que pueden ser de naturaleza física diferente a la de esta última. Por ejemplo, fuerzas o torques, como medida de la corriente eléctrica que pasa a través de un sistema; corriente que entrega en su salida un amplificador, como medida de la tensión aplicada en su entrada; tensión de efecto Hall detectada en una placa conductora, como medida de la corriente que circula por ella, etc.

Los instrumentos básicos de medidas eléctricas son:

- Galvanómetro : instrumento detector de cero señal
- Amperímetro : medidor de corriente eléctrica
- Voltímetro : medidor de diferencia de potencial
- Wáttmetro : Medidor de potencia activa
- Medidor de energía

- Cosenofímetro : medidor de factor de potencia
- Secuencímetro : indicador de secuencia de fases en sistema trifásico
- Frecuencímetro : medidor de frecuencia de señal alterna
- Osciloscopio : visualizador de onda y medidor de diferencia de potencial
- Circuitos puente : medidores de parámetros de resistencia, capacitancia e inductancia

Es posible distinguir dos tipos de mediciones, basándose en la forma como se representa o registra el valor de la medida: mediciones analógicas y mediciones digitales.

En las mediciones analógicas se representa y registra en forma continua cualquier valor de la magnitud de medida, dentro de un cierto rango previsto de antemano. Por lo tanto, la señal o indicación de medida puede presentar cualquier valor que esta comprendido dentro del rango de señales que corresponde al de medida.

En las mediciones digitales (o numéricas) sólo se puede representar en forma discontinua valores discretos de la magnitud de medida, con una graduación más o menos fina. El valor de medida se obtiene por intermedio de indicadores de cifras (displays) o impresores. Como la mayor parte de las magnitudes de medida pueden variar en forma continua, se las debe cuantizar primeramente, es decir, el rango de medida se divide en pequeños intervalos y a cada uno de ellos se le asigna una señal de medida discreta.

La exactitud de los métodos de medición digital depende casi exclusivamente de lo fina que sea la cuantización, y se la puede aumentar arbitrariamente, pero para ello se requiere instrumentos más costosos. La principal ventaja de los métodos de medición digital radica en la posibilidad de almacenar las señales de medida cuantizadas, para luego elaborarlas o procesarlas sin que se produzcan errores adicionales.

2.- Instrumentos de imán permanente y bobina móvil

Los instrumentos de imán permanente y bobina móvil (I.P.B.M.), conocidos también como tipo d'Arsonval, son los más usados en medidas de corriente continua, como voltímetros y amperímetros; se caracterizan por ser fácilmente transportables, su calibración es casi permanente, y su uso es sencillo.

El instrumento se compone de una bobina móvil formada por un gran número de espiras de alambre muy delgado, la que puede girar dentro del entrehierro de un imán permanente. La suspensión de este sistema móvil es, generalmente, de eje y dos descansos. Cuando la bobina es recorrida por una corriente, se produce sobre ella un torque deflectante que tiende a hacerla girar en contra de un torque resistente que se obtiene usualmente por torsión de un resorte espiral. Entonces puede suponerse que el torque resistente es proporcional al ángulo de torsión del resorte; en la practica, los resortes espiral suelen aprovecharse para conducir la corriente a través de la bobina móvil.

Tanto los amperímetros como los voltímetros de corriente continua de I.P.B.M. son instrumentos indicadores de corriente porque su deflexión depende de la corriente que circula por la bobina móvil. Como los resortes de retención sirven para conducir la corriente que pasa por la bobina, la capacidad de corriente de éstos puede llegar a imponer un límite para la corriente de la bobina; ese límite corresponde a aquella corriente que puede circular por los resortes sin incrementar apreciablemente su temperatura debido a la disipación de potencia $i^2 R$ ya que un consumo elevado significa una alteración excesiva del circuito bajo medición, y también una alteración mecánica de los resortes. Para obtener rangos de corrientes elevadas en amperímetros (por sobre 20 mA) el elemento móvil (bobina + resortes) es conectado internamente en paralelo con un shunt de muy baja resistencia, por el que se deriva la mayor parte de la corriente que pasa a través del instrumento.

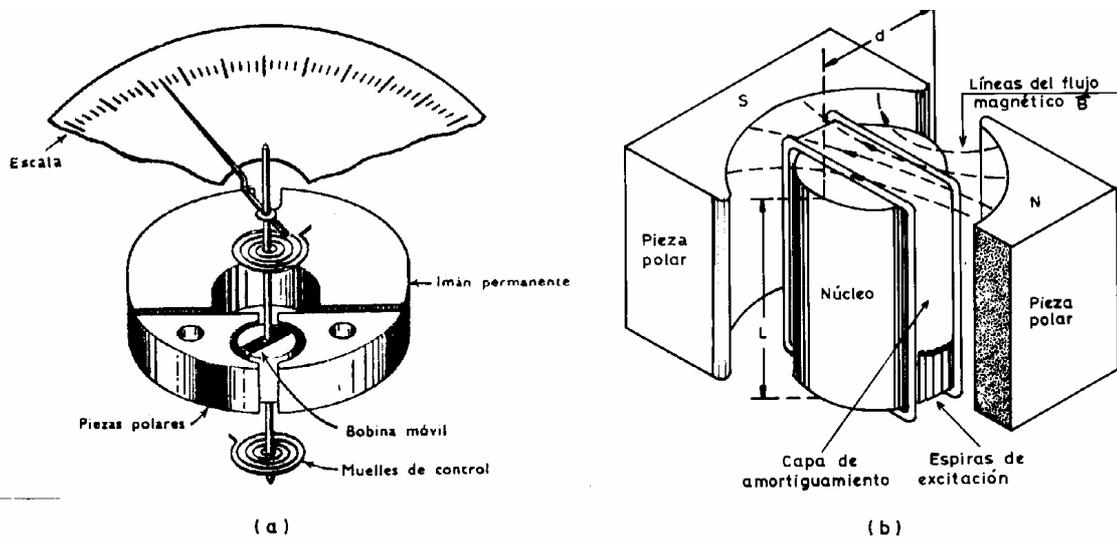


Figura 1 Instrumento de imán permanente y bobina móvil

Sólo en los micro amperímetros y mili amperímetros de rangos no mayores que 20 mA toda la corriente circula a través de la bobina móvil. En los voltímetros, cualquiera sea su rango, la bobina móvil se conecta en serie con una resistencia interna alta, la que tiene por objeto limitar la magnitud de la corriente que circula por la bobina. En los amperímetros y en los voltímetros el respectivo mecanismo de limitación de corriente por la bobina tiene también por efecto minimizar la alteración que introduce el instrumento en el circuito al que se encuentra conectado.

Un grupo de instrumentos de imán permanente y bobina móvil, de particular interés, lo constituyen aquellos en que la bobina móvil se ha separado en dos bobinas dispuestas en 90° físicos y una de ellas se conecta en serie con una resistencia de valor elevado. De este modo, se consigue que por una bobina circule una señal proporcional a la corriente por el elemento a medir y por la otra bobina circule una señal proporcional al voltaje aplicado al elemento a medir. Se consigue un medidor de resistencia eléctrica. Dependiendo de la magnitud de resistencia a medir, podemos distinguir el medidor tradicional, para rango

intermedio, el megóhmetro, para medida de muy altos valores (p.e. resistencia de aislación) y el ducter, para muy bajos valores (p.e. resistencia de contacto).

Figura 2
Galvanómetro diferencial o Medidor de resistencia convencional

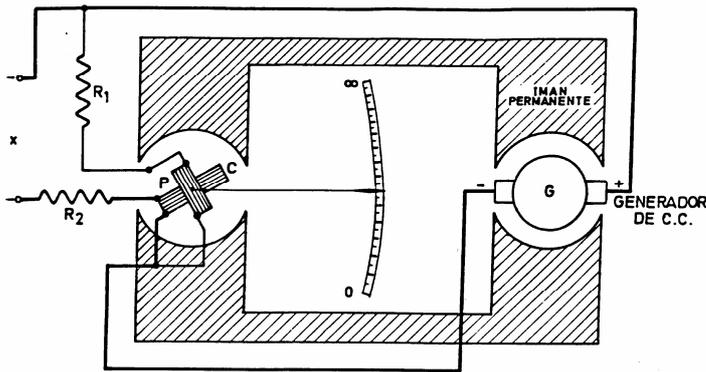
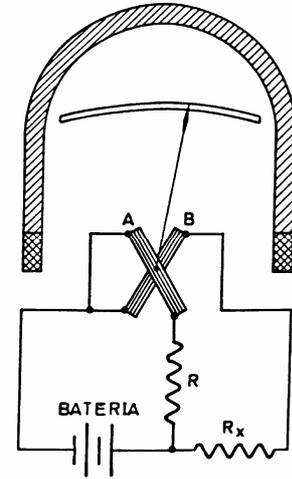


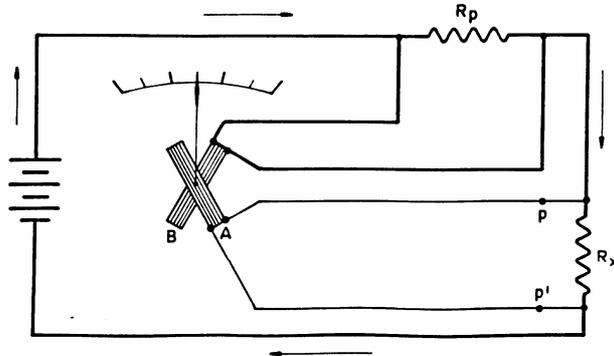
Figura 3 Megóhmetro o Medidor de resistencia de aislación

Las partes esenciales de un instrumento para medida de grandes valores de resistencia se muestran en la Figura 3. Tiene incluido su propio generador de C.C. que se mueve manualmente con una manivela, o mediante un motor. Actualmente se construyen Megóhmetros provistos de un rectificador en lugar de un generador de C.C. . El voltaje continuo del generador es de 500 Volts, de 1.000 Volts , 2.500 Volts o 5000 Volts

El sistema de medida lo constituyen principalmente dos bobinas solidarias entre sí, una de potencial (P) y otra de corriente (C). Cuando no hay resistencia conectada a los bornes, sólo hay corriente en la bobina P, y aparece un torque que orienta la aguja a la posición “infinito”. Si la resistencia fuera cero (bornes cortocircuitados), sólo habría corriente en C, lo que haría a su vez que el torque de ella llevara la aguja a la posición cero. Para cualquier otro valor finito de la resistencia conectada en bornes, el sistema móvil adoptará una posición de equilibrio de torque, pudiéndose leer directamente el valor Ohms o Megohms (dependiendo de la escala).

Otro óhmetro similar al instrumento anterior, pero con modificaciones que lo hacen útil en medidas de resistencias bajas (Ejemplo: Resistencias de contacto), es el Ducter.

Figura 4
Ducter
Medidor de resistencias de contacto



El esquema de este instrumento es más complicado; en la Figura 4 se muestra el circuito simplificado de su funcionamiento. El voltaje para la bobina de potencial (A) es tomado de un par de bornes internos (p-p) conectados directamente a la resistencia de conductores o contactos; así este potencial es proporcional a la caída de tensión en R_x . La bobina de corriente (B) está provista de una resistencia paralelo R_p ; esto debido a que la corriente que circula es bastante alta ya que R_x es baja. La interacción de los torques provocados por ambas bobinas orienta al conjunto según la resultante de equilibrio. Por simplicidad, no se dibujó el imán permanente que rodea ambas bobinas, y se reemplazó el generador de C.C. por una batería.

3.- Instrumentos electro dinamométricos

El principio electro dinamométrico es de gran importancia porque, al disponer de dos circuitos independientes, permite ser aplicado no sólo en voltímetros y amperímetros, sino que también en instrumentos medidores de potencia activa (wáttmetros) y potencia reactiva (varímetros). Este tipo de instrumento hace uso de campos magnéticos producidos por dos bobinas, una fija y otra móvil (en algunos casos el elemento móvil puede tener dos bobinas), cada una de las cuales es portadora de corriente que es función de la corriente o el voltaje que se desea medir; la reacción entre los campos de la bobina fija y móvil proporciona el torque deflectante del sistema móvil, que es compensado por resortes espiral que también son empleados para llevar la corriente a la bobina móvil.

En los instrumentos I.P.B.M. el imán evita el consumo de potencia externa para generar el campo; por lo tanto, resulta evidente que el movimiento electro dinamométrico requiere de un consumo de potencia más elevado para su operación. Además, la densidad de flujo generada por la bobina fija es mucho menor que la densidad obtenible con imanes permanentes, por lo que la sensibilidad del instrumento es menor, característica que obliga a emplear un sistema móvil liviano y apoyos con un nivel de roce muy pequeño. Sin embargo, el principio electro dinamométrico encuentra importantes aplicaciones como instrumento de

transferencia en la calibración de vóltmetros y ampérmegos, y como wáttmetros; tales usos se extienden desde corriente continua hasta algunos Kilo Hertz en ciertos diseños especiales.

Cualitativamente, la operación puede explicarse en términos del instrumento d'Ansoval, donde el imán permanente es reemplazado por un electroimán. La bobina fija está dividida en dos enrollados simétricos y genera un campo aproximadamente uniforme en la región ocupada por la bobina móvil. Usualmente se denomina "bobina de corriente" a la bobina fija y "bobina de potencial" a la bobina móvil.

La energía almacenada en el sistema de las dos bobinas será:

$$W = \frac{1}{2} L_p i_p^2 + \frac{1}{2} L_c i_c^2 + M i_p i_c$$

El torque instantáneo es:

$$\tau = \left. \frac{\partial W}{\partial \theta} \right|_{i_p, i_c \text{ constantes}} = i_p i_c \frac{\partial M}{\partial \theta}$$

y el torque medio deflectante:

$$\tau_d = \frac{\partial M}{\partial \theta} \frac{1}{T_0} \int_0^T i_p(t) i_c(t) dt$$

Conectando las bobinas fijas y móvil en serie, se puede obtener un amperímetro. Esto es, si $i_p = i_c = i$, y el torque resistente es proporcional a la deflexión angular, entonces en la posición de equilibrio, cuando ambos torques se igualan, se tiene:

$$\theta = \frac{1}{K_R} \frac{\partial M}{\partial \theta} \frac{1}{T_0} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{1}{K} I_{RMS}^2$$

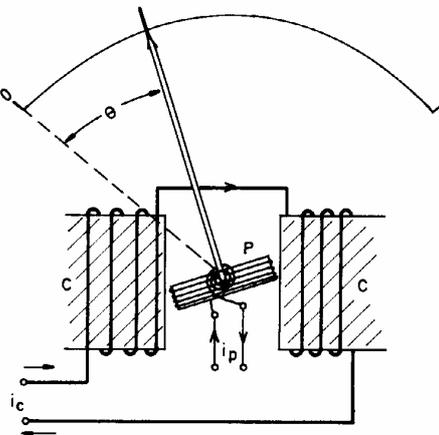


Figura 5 Ampérmegos electro dinamo métrico

Conectando las bobinas fijas y móvil en serie, se puede obtener un amperímetro. Si se agrega una resistencia serie elevada, el amperímetro se convierte en un voltímetro. Por la relación entre la variable angular y la variable a medir, este instrumento es aplicable tanto para señales alternas como continuas.

Una de las aplicaciones más comunes del principio electro dinamométrico es la medición de potencia de corriente continua y de corriente alterna, para cualquier forma de onda de corriente y voltaje, hasta cierto límite máximo de frecuencia.

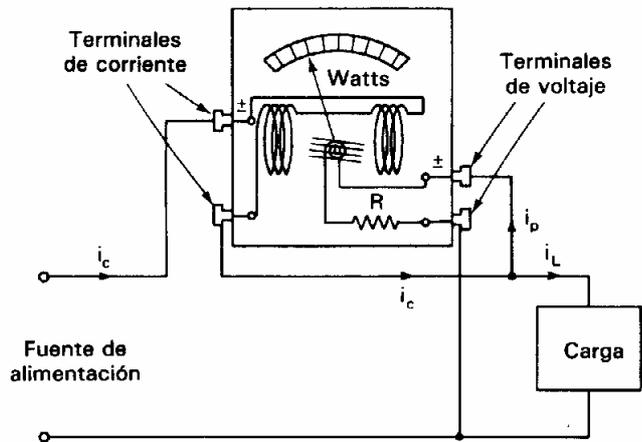


Figura 6 Wáttmetro electro dinamométrico

En el wáttmetro electro-dinamométrico, la deflexión de la aguja es proporcional al valor medio del producto entre la corriente y el voltaje aplicado al elemento a medir, es decir a su potencia efectiva.

Otro instrumento de esta familia es el cosenofímetro, o medidor de factor de potencia.

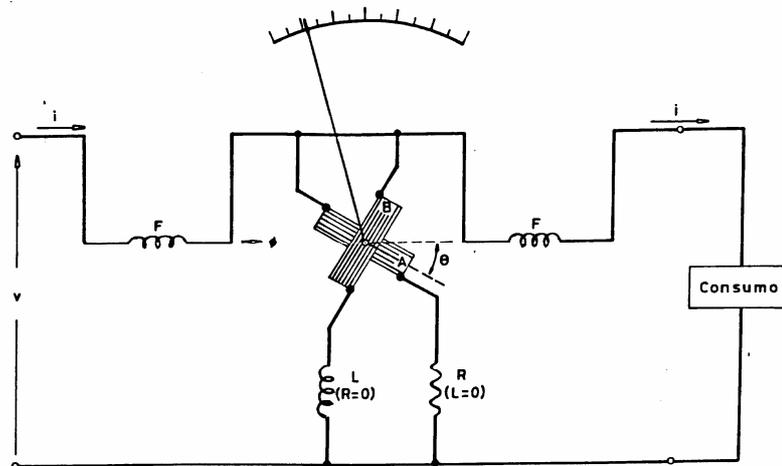


Figura 7 Cosenofímetro

En este instrumento, se busca que las corrientes por las bobinas móviles estén desfasadas 90° entre sí; con este propósito, se incorpora en serie con una de ellas un resistencia con mínimo efecto inductivo y en serie con la segunda bobina una inductancia con mínimo efecto resistivo.

Los torque producidos por las corrientes que circulan por cada bobina son:

$$\tau_A = K_A I_M \frac{V_M}{R} \text{sen } \theta \cos \varphi$$

$$\tau_B = K_B I_M \frac{V_M}{X_L} \text{sen}(\theta - 90^\circ) \text{sen } \varphi$$

En equilibrio: $\tau_A = \tau_B$

Si $\frac{K_A}{K_B} = \frac{R}{X_L}$ entonces: $\theta = \varphi$

Luego, en realidad el cosenofímetro mide directamente el ángulo de desfase entre voltaje y corriente; sin embargo, la escala del instrumento se calibra en $\cos \varphi$ de modo de entregar directamente el factor de potencia.

4 Instrumentos de hierro móvil

Los vóltmetros y ampérmetros de uso industrial más comunes son de hierro móvil porque presentan una precisión suficiente (mejor que 1%) para la mayoría de las aplicaciones, y son más baratos y resistentes que los instrumentos de I.P.B.M. y electro dinamométricos de precisión similar. Son aplicables en medidas de corriente continua y corriente alterna, con la ventaja adicional que el sistema móvil no conduce corriente.

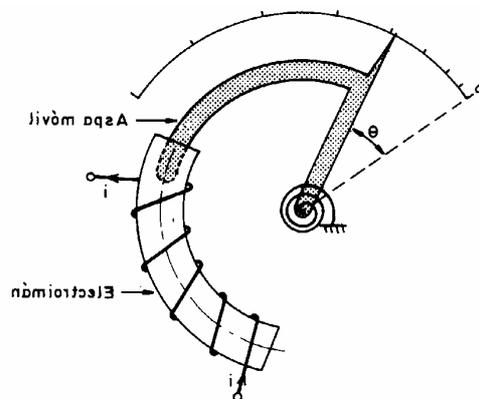


Figura 8 Instrumento de hierro móvil

El principio de funcionamiento es el siguiente: un elemento o aspa de hierro o acero de alta permeabilidad forma el elemento móvil del instrumento y puede moverse en el interior del campo magnético de un electroimán fijo constituido por una bobina y una estructura de hierro, cuya excitación proviene de la corriente o el voltaje a medir. Cuando circula corriente a través de la bobina, el aspa se mueve de manera tal que tiende a incrementar el flujo magnético a través de ella; de esa manera, la fuerza que actúa sobre el elemento móvil produce un torque deflectante de dirección tal que siempre tiende a incrementar la inductancia de la bobina fija.

5 Instrumentos digitales

En la figura siguiente se muestra un diagrama de bloques de un instrumento digital básico. Se puede ver que se recibe una señal analógica en el instrumento digital de un circuito o de un transductor que se esté probando. Típicamente el instrumento somete primero la señal analógica a amplificación. A continuación, se convierte la señal amplificada a la forma digital mediante un circuito de conversión analógico a digital (A/D). Por último, aparece la señal digital que se muestra en un dispositivo de pantalla digital, o se pone a disposición para su transmisión a otros instrumentos digitales (como registradores o computadoras) para su ulterior proceso y despliegue.

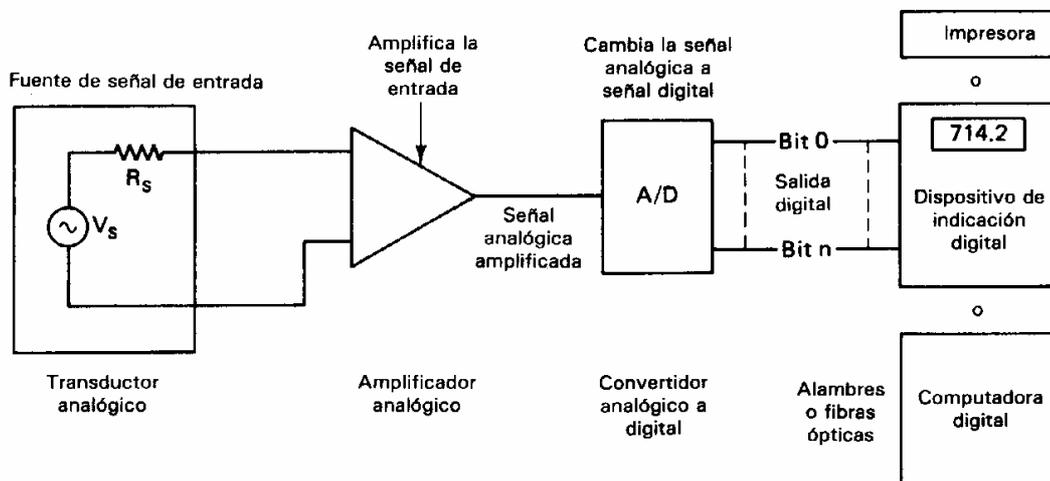


Figura 9 Esquema en bloques de un instrumento digital

La figura siguiente muestra el esquema de un típico multímetro digital.

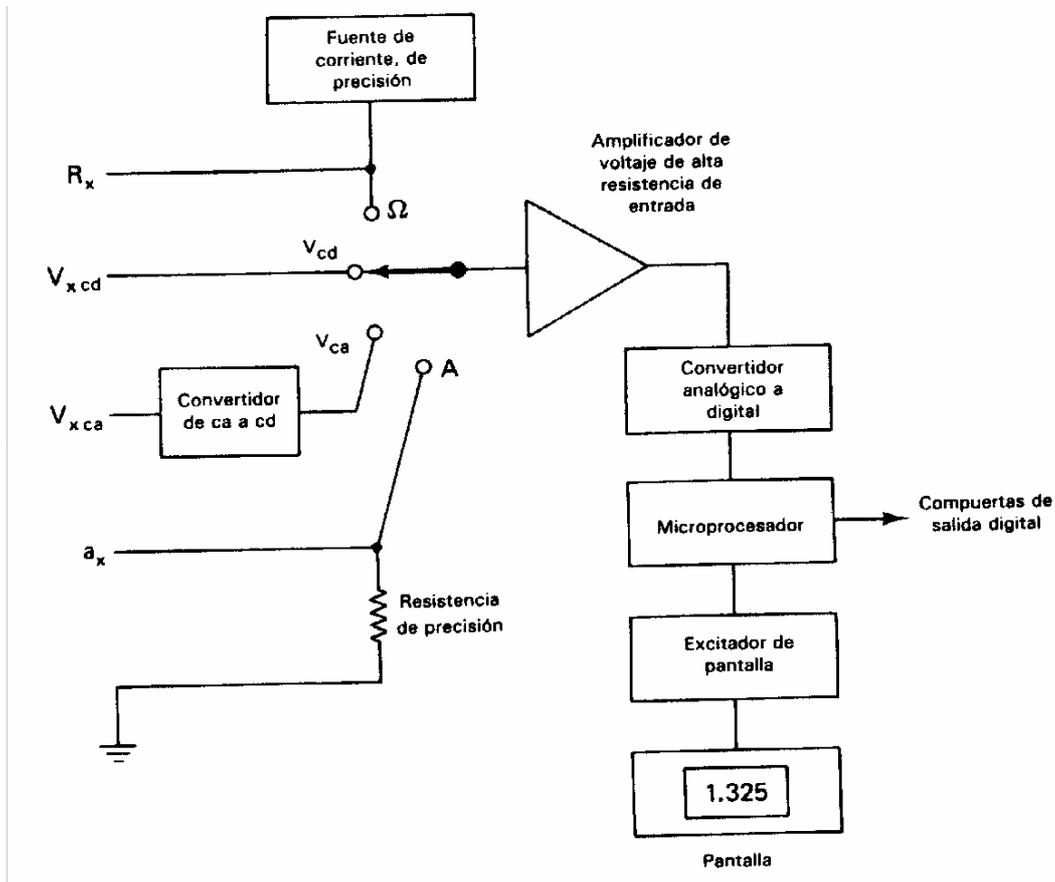


Figura 10 Multímetro digital

6. Mediciones de resistencia, capacitancia e inductancia con circuitos puente

Los circuitos pasivos denominados circuitos puente reciben este nombre debido a la configuración de sus ramas. Los métodos para medir elementos pasivos mediante el empleo de circuitos puentes se basan en el principio de establecer una condición de equilibrio en el circuito de puente, mediante el ajuste de algunos elementos variables. La condición de equilibrio en el circuito del puente, queda definida por una lectura cero en el detector del puente. El valor desconocido de los parámetros se calcula a partir de los otros elementos del circuito en equilibrio.

La mayor parte de las mediciones de la capacitancia e inductancia de componentes (es decir, capacitores o inductores) se efectúan usando circuitos de puente que pueden dar resultados muy exactos.

6.1 Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es el circuito más sensitivo que existe para medir una resistencia. El principio de funcionamiento se basa en establecer un equilibrio de potencial entre los puntos A y B, ajustando las resistencias R_1 , R_2 , R_3 , de manera que el galvanómetro no acuse el paso de la corriente. La alimentación es con tensión continua.

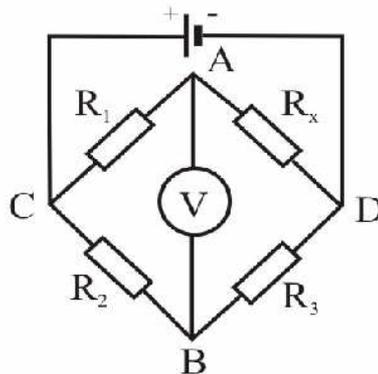


Figura 11 Puente de Wheatstone

En esta situación, si I_1 representa la corriente eléctrica que pasa por R_1 , también pasa por R_x , ya que al ser $V_{AB} = 0$ no pasa corriente por AB. Además, si I_2 es la corriente que circula por R_2 y R_3 , se cumple que:

$$V_{CA} = V_{CB} = I_1 R_1 = I_2 R_2$$

y de las ecuaciones anteriores se deduce que:

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_1 R_x}{I_2 R_3} \Rightarrow R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

6.2 Puente de Schering para medida de capacidad y de $\text{tg}\delta$ en el caso de Alta Tensión

Al ensayar aislantes, aparatos y cables para alta tensión, es importante determinar, además de su rigidez dieléctrica, la capacidad y la $\text{tg}\delta$ del aislamiento; estas medidas deben efectuarse, dentro de lo posible, bajo las condiciones a que han de estar sometidos dichos materiales cuando estén en servicio; o sea, las medidas deben hacerse con la tensión de servicio.

La Fig. 12 representa el esquema de conexión. Para efectuar la medida se regulan la resistencia R_3 y el condensador C_4 hasta que el galvanómetro de vibración G no indique paso de corriente.

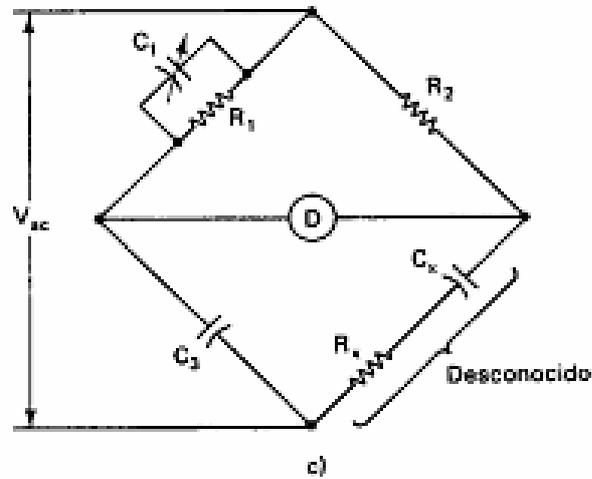


Figura 12 Puente de Schering

Entonces se tienen condiciones de equilibrio, y por lo tanto:

:

$$\frac{Z_X}{Z_3} = \frac{Z_n}{Z_4}$$

siendo Z_X , Z_3 , Z_n y Z_4 las impedancias de cada rama. Es decir:

$$Z_X = R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \quad (\text{equivalente serie})$$

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_n = \frac{1}{j\omega C_n}$$

$$Z_4 = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4}$$

donde $\omega = 2\pi f$

Reemplazando se obtiene:

$$\frac{C_n}{C_X} + j\omega R_X C_n = \frac{R_3}{R_4} + j\omega R_3 C_4$$

Separando partes reales e imaginarias, se puede encontrar:

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_n}$$

$$C_x = C_n \frac{R_4}{R_3}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_x R_x = \omega C_4 R_4$$

Las relaciones corresponden a los parámetros del condensador para su equivalente serie

Estos métodos de medida se usan tanto para comprobar la capacidad de los condensadores como para usos industriales tales como: la determinación de la capacidad de cables de todo tipo; la capacidad entre los enrollados de transformadores; capacidad de $\operatorname{tg} \delta$ de cables de A.T. y aisladores tipo condensador; los métodos de puente tiene aplicación en la determinación de fallas de cables.

6.3 Puente de Wien

Circuito puente de corriente alterna formado por una rama que consta de una resistencia y una capacitancia en serie, una rama contigua a la anterior formada por una resistencia y una capacitancia en paralelo y dos ramas restantes puramente resistivas. Este puente se usa para medida de capacitancias en términos de resistencia y frecuencia.

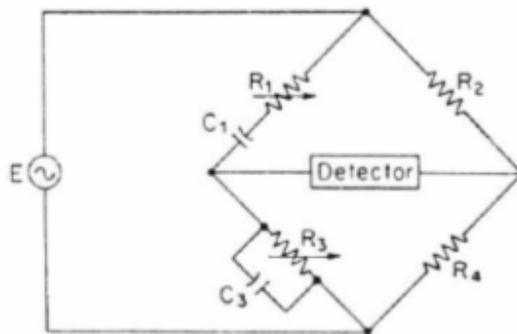


Figura 13 Puente de Wien

Siguiendo un análisis similar al del caso anterior, cuando no hay circulación de corriente por el detector, es decir, cuando el puente está balanceado, se llega a las siguientes relaciones :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C1.C3.R1.R3}}$$

$$\frac{R2}{R4} = \frac{R1}{R3} + \frac{C3}{C1}$$

6.4 Puente de Kelvin

Este puente es utilizado para la medición de resistencias de un rango de 0.1 mΩ A 110Ω. El diagrama de la figura 14 muestra un puente doble:

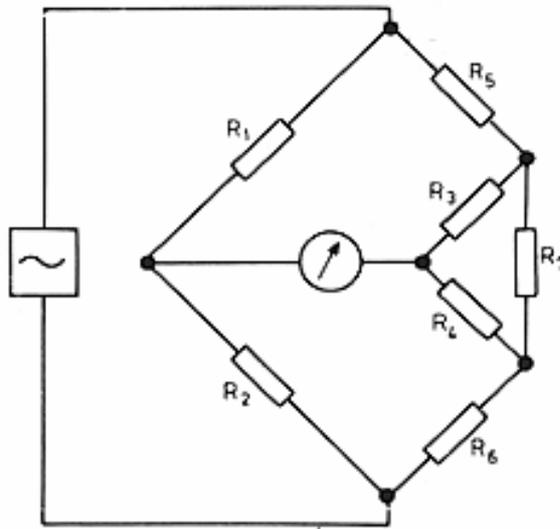


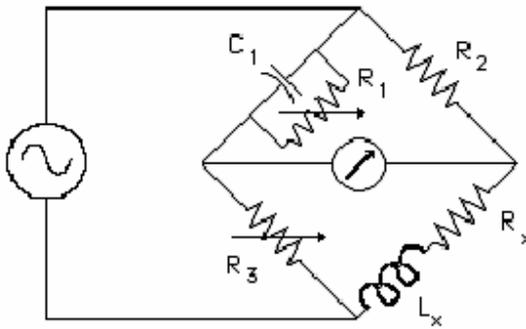
Figura 14 puente doble de Kelvin

Se utiliza el mismo principio del puente de Wheatstone: el funcionamiento consiste en ajustar las resistencias R_1 y R_2 de manera que el galvanómetro registre una corriente nula, para conseguir el equilibrio. La ecuación de equilibrio es:

$$R_5 = R_6 \frac{R_1}{R_2}$$

6.5 Puente de Maxwell

Puente de corriente alterna en la cual una rama está compuesta de una inductancia y una resistencia en serie, la opuesta, de un condensador y una resistencia en paralelo y las otras dos ramas, de resistencias. El puente se usa para la medida de inductancias (en función de un condensador conocido) o capacidades (en función de una inductancia conocida), siendo las relaciones de equilibrio:

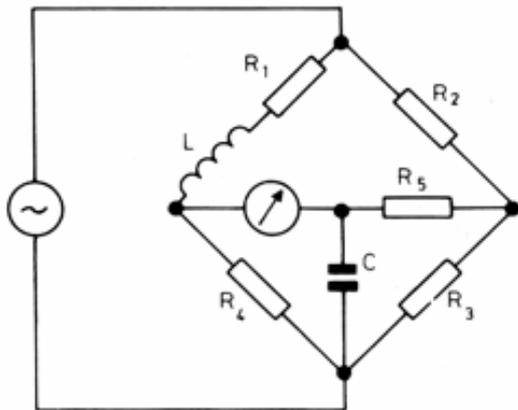


$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

$$L_x = R_2 R_3 C_1$$

$$Q = \frac{\omega R_2 R_3 C_1}{\frac{R_2 R_3}{R_1}} = \omega R_1 C_1$$

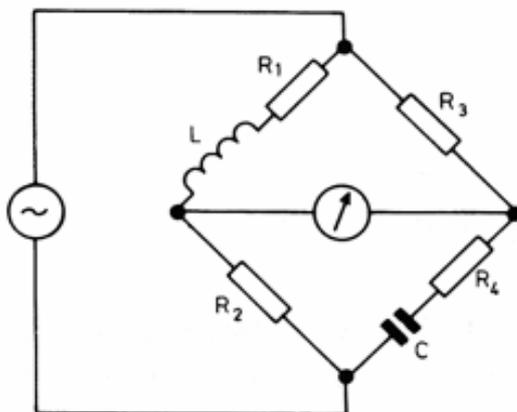
6.6 Puente de Anderson



$$L = R_4 C \left[R_5 \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) + R_2 \right]$$

$$R_2 R_4 = R_1 R_3$$

6.7 Puente de Hay



$$L = R_2 R_3 \frac{C}{1 + \omega^2 C^2 R_4^2}$$

$$R_1 = R_2 R_3 \frac{\omega^2 C^2 R_4}{1 + \omega^2 C^2 R_4^2}$$

7. Caracterización de los Instrumentos de Medida

Clase

Se pueden proveer de un signo de clase a los instrumentos eléctricos de medida analógicos, siempre que los errores relativos y las influencias bajo las condiciones de prueba prefijadas se mantengan dentro de límites determinados. Las clases se indican mediante cifras (por ejemplo: 0,1; 0,5; 1; 1,5; etc.) que expresan los límites que no debe sobrepasar el error relativo de indicación dentro del rango de medida. El rango de medida de un instrumento indicador o registrador viene dado por el rango de valores de la magnitud de medida, para el cual el instrumento es capaz de operar dentro de los límites de error definidos por la clase correspondiente.

Precisión y exactitud

En el análisis de mediciones, a menudo se malinterpretan las palabras exactitud y precisión, y se emplean en forma incorrecta. Aunque se considera que tienen el mismo significado en conversaciones diarias, hay una diferencia entre sus definiciones, cuando se usan para descripciones de mediciones experimentales.

La exactitud de una medición especifica la diferencia entre el valor medido y el valor real de una cantidad. La desviación del valor verdadero es un índice de qué tan exactamente se ha llevado a cabo una lectura. Por otro lado, la precisión, especifica la repetibilidad de un conjunto de lecturas, hecha cada una en forma independiente con el mismo instrumento. Se determina una estimación de la precisión mediante la desviación de la lectura con respecto al valor promedio.

El concepto de exactitud, cuando se aplica a instrumentos que muestran una lectura mediante el empleo de una escala y una aguja se refiere por lo general al valor de su escala completa (a menos que se especifique otra cosa). Cuando se dice que la exactitud de un medidor es de 1 por ciento, esto significa que una lectura que se tome en cualquier lugar de una de sus escalas no tendrá error mayor que el 1 por ciento del valor de la escala completa.

Resolución y sensibilidad

La resolución es el significado del dígito menos significativo. Por ejemplo, el rango de un medidor de capacitancia podría darse como 199 pf, con una resolución de 0.1 pf. El rango del medidor sería desde 000.0 hasta 199.9 pf, y se le referirá como un medidor de 3 y medio dígitos. (El medio indica que el dígito más significativo sólo puede ser un 0 ó 1.)

La sensibilidad es el cambio incremental más pequeño que puede detectar el medidor. Esto no significa que se deba mostrar el cambio mínimo detectable al usuario.

Los errores de escala se declaran a veces como un porcentaje de una lectura en lugar de un porcentaje del valor de la escala completa. Los instrumentos diseñados para satisfacer este

tipo de valuación de la exactitud eliminan algunos de los errores posibles en los instrumentos de modelos anteriores.

Lectura Complementaria:

“Métodos de medición de variables eléctricas”
Publicación C/3 Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile