

# **Unidad 2**

## **INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

**ELECTROTECNIA Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

**(INGENIERÍA MECÁNICA)**

**M - 14**

Ing. Julián J. Ronco (Prof. Adj.)

Ing. Jorge C. Ronco (Prof. Adj.)

Mauro Curli (Aux.)

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

## 2.1 DEFINICIONES BÁSICAS

**“Medir es el proceso de comparación entre una medida incógnita con otra que tomamos como unidad (patrón), viendo cuántas veces la primera contiene a la segunda.”**

Según cómo se realice dicha comparación, la medición puede clasificarse en:

- **Medición directa:** es aquella que se realiza usando un instrumento destinado a medir esa magnitud.
- **Medición indirecta:** es aquella que realizando la medición de una o varias variables, se puede calcular la que se tiene interés de conocer (se calcula mediante una fórmula).

Puede ser necesario armar un sistema de medición o bien que un único instrumento posea el sistema de comparación y materializada la unidad de medida (patrón). A estos últimos se los denomina *Instrumentos de Medición*.

Aquí, nos interesan las mediciones destinadas a la determinación de magnitudes eléctricas (intensidad, tensión, potencia, resistencia, etc.). Estas magnitudes pueden medirse con instrumentos que dan directamente el valor correspondiente.

Estos instrumentos pueden clasificarse, según la forma de realizar la lectura, en:

- **Indicadores Analógicos:** estos son de medición directa, y basan su lectura en la posición de una aguja sobre una escala adecuada.
- **Digitales:** aquellos en que la magnitud eléctrica a medir se indica en una pantalla (display), en forma de número decimal.
- **Registadores:** estos permiten divisar gráficamente la evolución en el tiempo de la magnitud eléctrica correspondiente.
- **Integradores o Totalizadores:** indican la energía total suministrada durante cierto tiempo; se los denomina también instrumentos contadores.

Nos abocaremos principalmente al estudio y análisis de los instrumentos analógicos de medición.

## 2.2 INSTRUMENTOS ANALÓGICOS

### 2.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los instrumentos analógicos basan su principio de medición en que la misma variable a medir (intensidad) impulsa un sistema electromecánico que produce un movimiento proporcional (analógico) a dicha intensidad. El dispositivo posee además, una aguja indicadora en una escala adecuada.

Tienen partes mecánicas que lo mueven (un eje de giro, un pivote) y una lectura sobre una escala graduada convenientemente cuando está en equilibrio. Para que esto ocurra, deben equilibrarse las cuplas intervinientes, a saber:



Cupla motriz: proporcional a la magnitud a medir.



Cupla antagónica: elásticas proporcionadas en general por espirales o cintas elásticas; proporcionales al ángulo girado  $[\theta]$ .



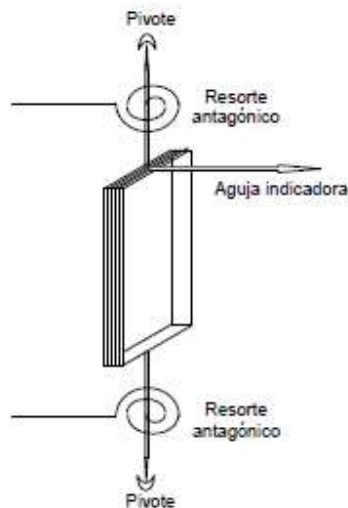
Cupla de amortiguación: para evitar prolongadas oscilaciones en torno al punto de equilibrio, proporcionales a la velocidad angular  $[\dot{\theta}]$ .

Cupla de inercia: proporcional a la aceleración angular  $[\ddot{\theta}]$ .

$$\tau_{motriz} - \tau_{ant.} - \tau_{amort.} - \tau_{inercia} = 0$$

en equilibrio:

$$\tau_{motriz} = \tau_{ant.}$$



$$\tau_{ant.} = s \theta$$

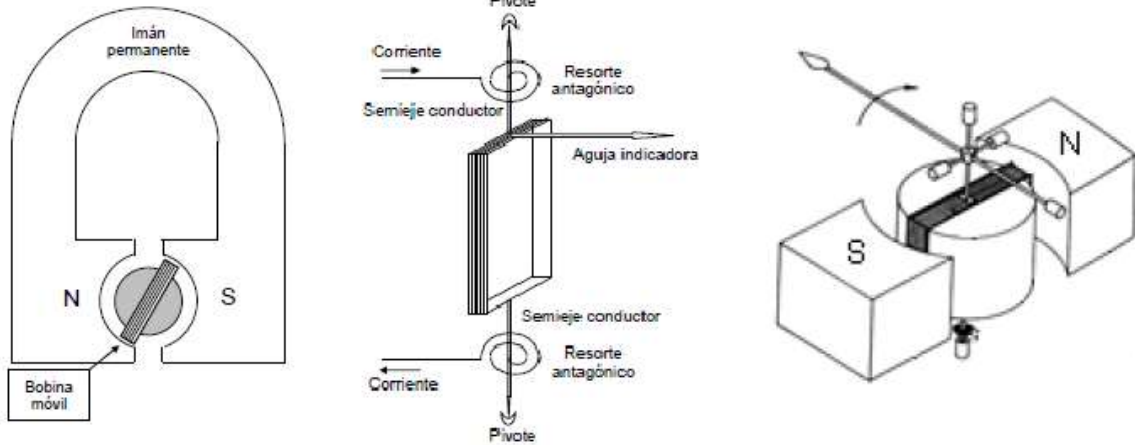
s = constante elástica

Dada la existencia de distintos procesos que llevan a interacciones entre corrientes y campos magnéticos (obtención de la cupla motriz  $\tau_{motriz}$ ), se tendrán distintas disposiciones que nos permitirán obtener diferentes tipos de instrumentos analógicos según el tipo de variable a medir: magnetoeléctricos, ferromagnéticos, electrodinámicos, etc.

## 2.2.2 INSTRUMENTOS MAGNETOELÉCTRICOS

*“Funcionan a partir de la interacción entre un campo magnético fijo (Imán Permanente) y el campo magnético producido por una corriente eléctrica que circula por una bobina auxiliar (Bobina Móvil)”*

Comúnmente se los denomina **Instrumentos de Imán Permanente y Bobina Móvil (IPBM)**.



Si se hace circular corriente por la bobina, en cada conductor de la misma se origina una fuerza, cuya magnitud está dada por la siguiente expresión:

$$F = B \cdot NI \cdot L$$

$$\tau_m = F \cdot d = d \cdot B \cdot NI \cdot L = \phi_0 NI = \phi I$$

donde:

- F: Fuerza [N]
- N: número de espiras que conforman la bobina
- B: inducción magnética producida por el imán permanente [T]
- I: corriente que circula por al bobina móvil [A]
- L: longitud del conductor que se encuentra inmerso en el campo magnético [m]
- d: ancho de la bobina

$$\tau_{ant} = s \theta \rightarrow \tau_m = \tau_{ant}$$

$$\phi I = s \theta \Rightarrow \theta = \frac{\phi}{s} I = \frac{1}{k} I$$

La medida es directamente proporcional a la corriente a medir, por lo que no podrá utilizarse en corriente alterna. Por esta razón, la escala del instrumento será lineal.

A estos equipos, donde influye el sentido de circulación de la corriente a medir, se los denomina instrumentos **polarizados**.

Definimos:

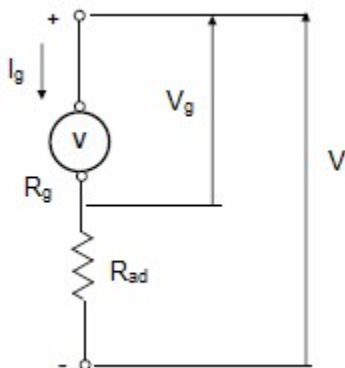
- k: constante del instrumento
- $I_g$  Corriente de ajuste: es aquella que al circular por la bobina móvil hace que el indicador vaya al fondo de la escala.
- $R_g$  = resistencia del instrumento
- $V_g$  Tensión de ajuste: ídem  $I_g = I_g \cdot R_g$

Ejemplo:

$$I_g = 3\text{mA} \quad R_g = 20\Omega \quad V_g = 60\text{mV} \quad (\text{valores típicos})$$

### Aplicación como Voltímetro

En este caso el instrumento se debe conectar en paralelo con la carga:



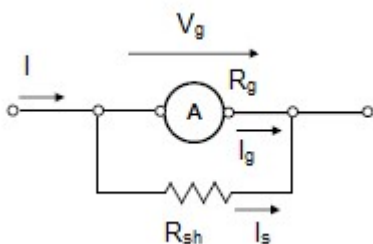
Para ampliar el rango, se conecta en serie con el instrumento de Bobina Móvil una resistencia patrón  $R_{ad}$  denominada *Resistencia Adicional*, tal que  $R_{ad} \gg R_g$ . Se establece así un divisor de tensión, donde:

$$V = V_g + V_{R_{ad}} = I_g \cdot R_g + I_g \cdot R_{ad}$$

$$R_{ad} = \frac{V}{I_g} - R_g$$

### Aplicación como Amperímetro

En este caso el instrumento se debe conectar en serie con la carga:



Para ampliar el rango, se conecta en paralelo con el instrumento de Bobina Móvil una resistencia patrón  $R_{sh}$  denominada *Resistencia Paralelo o Shunt*, tal que  $R_{sh} \ll R_g$ . Se establece así un divisor de corrientes, donde:

$$V_g = R_g \cdot I_g = R_{sh} \cdot I_s$$

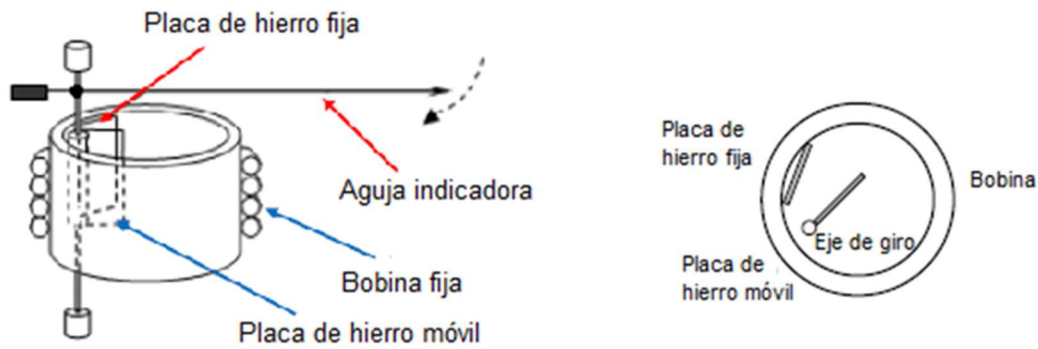
$$R_{sh} = \frac{R_g \cdot I_g}{I_s} = \frac{R_g \cdot I_g}{I - I_g} = \frac{R_g}{\frac{I}{I_g} - 1}$$

**RESUMEN:** podemos decir que “un instrumento de Bobina Móvil sólo (milivoltímetro o miliamperímetro) con resistencia patrón en serie es un voltímetro y con una en paralelo es un amperímetro, y que los distintos alcances se logran modificando estas”.

### 2.2.3 INSTRUMENTOS FERROMAGNÉTICOS

*“Son los instrumentos que funcionan a partir de la interacción de dos placas (núcleos) de hierro, una fija y la otra móvil solidaria a la aguja indicadora, imantados con la misma polaridad por la corriente a medir, la cual circula por una bobina fija. La repulsión entre ellos hará girar el núcleo móvil.”*

Comúnmente se los conoce con el nombre de **Instrumentos de Hierro Móvil**.



$$\theta = \frac{1}{2} \frac{I^2}{s} \frac{dL}{d\theta}$$

Como se observa, si se consigue que, por construcción  $dL/d\theta$  sea cte., las fuerzas de repulsión que se producen son proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por la bobina, por lo que es indiferente si la corriente es continua o alterna. Por esta razón, la escala del instrumento no será lineal, sino cuadrática.

A estos equipos, donde no influye el sentido de circulación de la corriente a medir, se los denomina instrumentos **no polarizados**.

#### **Alcances característicos**

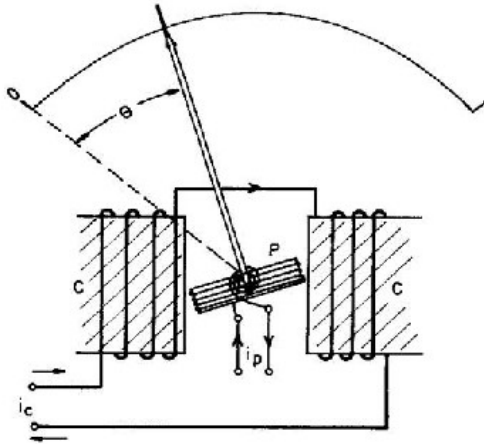
Como Amperímetro: 1 – 5 Amperes

Como Voltímetro: 120 – 240 – 480 - 600 Volt y otras

## 2.2.4 INSTRUMENTOS ELECTRODINÁMICOS

“Son los que funcionan a partir de la interacción entre dos campos magnéticos generados por dos bobinas alimentadas por diferentes corrientes.”

El principal uso de este instrumento es como vatímetro, para medir la potencia eléctrica, para lo cual la bobina fija se utiliza para medir la corriente que pasa por la carga y la bobina móvil para medir la tensión sobre la carga.



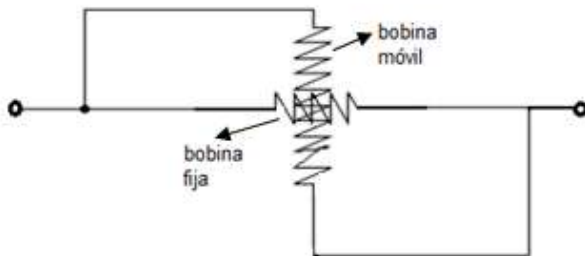
$$\theta = \frac{1}{S} \left( \frac{dM}{d\theta} \right) I_p I_c$$

donde M es el coeficiente de inducción mutua

Al igual que los instrumentos de hierro móvil, la medida es proporcional al producto de las corrientes por lo tanto, pueden utilizarse tanto en c.c. como en c.a., siendo este un instrumento **no polarizado**.

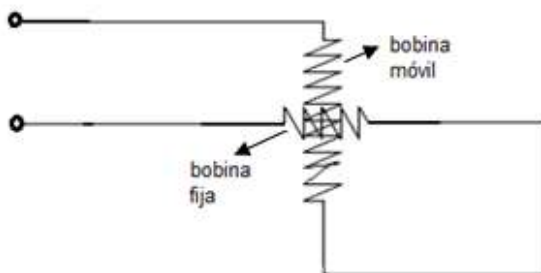
Este instrumento se puede utilizar como amperímetro o como voltímetro, para lo cual las bobinas deberán conectarse en paralelo y en serie respectivamente:

### Como Amperímetro Electrodinámico:



En este caso las bobinas se conectan en paralelo. Por lo general, se construyen con alcances de 1 y 5 Amp.

### Como Voltímetro Electrodinámico:

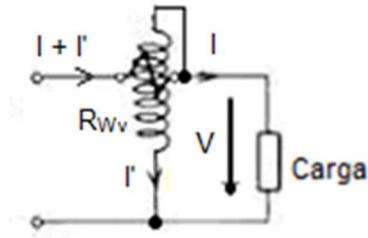


En este caso las bobinas fija y móvil se conectan en serie.

En corriente continua:  $\tau_m = f(\theta) \frac{V^2}{R^2}$

En corriente alterna:  $\tau_m = f(\theta) \frac{V_{ef}^2}{Z^2} \approx f(\theta) \frac{V_{ef}^2}{R^2}$

**Como Vatímetro Electrodinámico:**



En corriente continua:

$$\tau_m = f(\theta) (I + I')I' = f(\theta) (I I' + I'^2)$$

$$I' = V / R_{Wv}$$

$$\tau_m = \left( \frac{f(\theta)}{R_{Wv}} \right) \left[ I V + \frac{V^2}{R_{Wv}} \right]$$

donde:  $P_{obs} = P_V + P'$       y       $P_V = V I$        $\rightarrow$        $P' = V^2 / R_{Wv}$

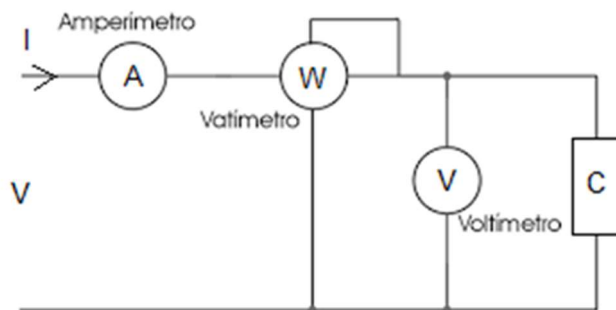
En corriente alterna:  $\tau_m = f(\theta) I I' \cos \rho$

$$I' = V / R_{Wv}$$

$$\tau_{med} = \frac{f(\theta)}{R} \left[ V I \cos \rho + \frac{V^2}{R_{Wv}} \right]$$

Los alcances típicos para este instrumento son: 1 y 5 Amp. / 120; 240; 480 y 600 V

Todos los vatímetros tienen un alcance en potencia pero además deben atender a unos valores de tensión como de corriente máxima, por lo tanto es exigible conectar un voltímetro en paralelo con la rama voltimétrica y un amperímetro en serie con la amperométrica como muestra la siguiente figura:



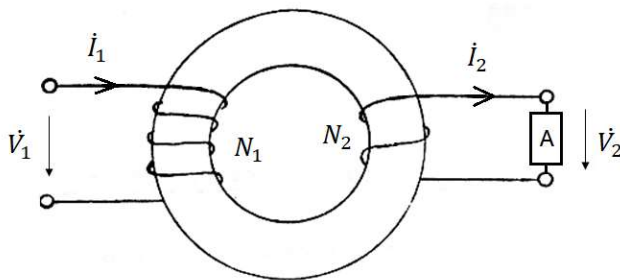
A los fines de corregir las mediciones es importante conocer la R voltimétrica que suele expresarse en kV para cada escala o bien  $\Omega/V_{\text{alcance}}$ .

Otro parámetro interesante de conocer para no alterar la jerarquía del instrumento es la frecuencia de clase (para la cual el fabricante garantiza la jerarquía) que por lo general es de 15 a 405Hz para instrumentos industriales.

## 2.2.5 TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN

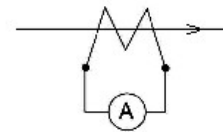
Para adaptar los alcances normalizados de los instrumentos tanto de hierro móvil como electrodinámicos entre otros, se utilizan los transformadores de medición:

- **Transformador de Tensión – TT** → su principio de funcionamiento lo veremos en detalle cuando estudiemos los transformadores como máquinas eléctricas. Sus salidas secundarias normalizadas son:  $100 ; \frac{100}{\sqrt{3}} ; 110 \text{ y } \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ V}$
- **Transformador de Intensidad - TI**



$$a = N_1 / N_2 = V_1 / V_2 = I_2 / I_1$$

a = relación de transformación



Por ejemplo, si tengo que medir una  $I = 100\text{A}$ , coloco un transformador cuya relación de transformación sea  $a = 20$ , con lo que su salida secundaria sea  $5\text{A}$ , lo que me permitirá utilizar un amperímetro (o la bobina amperométrica de un vatímetro) de  $5\text{A}$  de alcance. Por lo tanto, las magnitudes leídas deberán ser multiplicadas por 20 para obtener los valores reales.

Nota: nunca se debe dejar el circuito secundario ( $N_2$ ) abierto porque el transformador perderá jerarquía, la cual deberá ser acorde al instrumento que se utilizará en la medición.

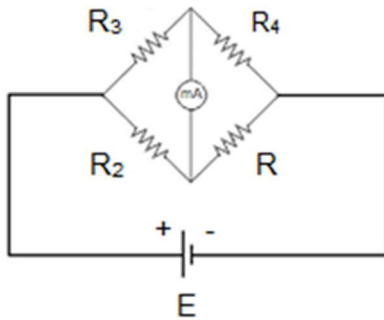
## 2.3 MEDICIONES INDIRECTAS

*“Consiste en armar un sistema, dispositivo o método que permita, a través de dos o más mediciones directas, determinar por cálculo un parámetro determinado”*

Algunos ejemplos de ello serían:

- Determinación de la resistencia midiendo la corriente que circula por el elemento y la caída de potencial en el mismo; luego por Ley de Ohm se realiza el cálculo de la misma. Este es el método Voltímetro-Amperímetro, pudiendo realizarse en conexión corta o larga (analizar diferencias).
- Determinación del  $\cos \varphi$  midiendo P; V e I sobre un sistema con los instrumentos ya descritos.

### Puente de Wheastone



En el circuito de la figura la condición de  $I = 0$  en la rama central se verifica para:

$$R_x R_3 = R_2 R_4$$

por lo tanto, si se establece dicha condición y se conocen los valores de  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$  (patrones) el resultado será inmediato.

$$R_x = \left( R_2 / R_3 \right) R_4$$

donde:

- $R_2 / R_3 =$  multiplicador
- $R_4$  resistencia de ajuste (banco de resistencia discriminado en décadas)

Nota: existen otros Puentes como el de Kelvin, el Industrial, de Hilo y otros basados en la misma propiedad.

Estos métodos tienen error metodológico cero.

## 2.4 ERRORES DE MEDICIÓN

En todo proceso de medición existen limitaciones dadas por los instrumentos usados, el método de medición y/o el observador que realiza la medición; por lo que no habrá mediciones reales con error nulo.

Definimos **error** a la diferencia existente entre el valor obtenido durante la práctica y el valor verdadero o real.

- **Error Absoluto:** diferencia entre el valor medido u observado ( $X_{obs.}$ ) y el valor verdadero o real de la magnitud  $X_{real}$ :

$$E_{abs.} = X_{obs.} - X_{real} \quad (\text{en unidad})$$

- **Error Relativo:** cociente entre el error absoluto  $E_{abs.}$  y el valor real  $X_{real}$ :

$$E_{rel.} = \frac{E_{abs.}}{X_{real}} = \frac{X_{obs.} - X_{real}}{X_{real}}$$

En valores porcentuales:

$$E_{rel.\%} = 100 \frac{E_{abs.}}{X_{real}} = 100 \frac{X_{obs.} - X_{real}}{X_{real}}$$

Ya que no se conoce el valor real de la magnitud, es importante determinar una *cota del error*, o sea el valor máximo que puede tomar el error. Cuando se utilizan instrumentos analógicos esta cota se obtiene a partir de la *Clase* del instrumento.

#### 2.4.1 CLASE DE UN INSTRUMENTO

*“Es la cota de error absoluto para cualquier punto de la escala referida al valor de fondo de escala (alcance), expresada en tanto por ciento. Representa el grado de precisión del instrumento”*

$$Clase = 100 \frac{E_{abs.} (\text{fondo escala})}{Valor \text{ final escala}} = 100 \frac{MÁX (X_{obs.} - X_{real})}{Rango}$$

Ejemplo: sea un voltímetro de “Clase 2” y rango 0-250V

$$E_{abs.} = \frac{Clase \text{ Rango}}{100} = \frac{2 \cdot 250}{100} = \pm 5V$$

Esto significa que cualquier medida que se realice con este instrumento en este rango (0 a 250V), tendrá un Error Absoluto Máximo de  $\pm 5V$ .

El mismo será el mismo para cualquier lugar de la escala en el que se obtenga la medición. Es por esto que el error relativo porcentual es mucho mayor en la parte baja de la misma que en la parte alta.

De aquí se desprende la conveniencia de elegir convenientemente los alcances de los instrumentos analógicos de manera de que la lectura sea en el último tercio de la escala.

En general, la Clase de un instrumento estará normalizada según su aplicación, pudiéndose clasificar de la siguiente manera:

- Clase 0,1 y 0,2: instrumentos de gran precisión para investigación y para contrastar otros de uso industrial o laboratorios de menor jerarquía.
- Clase 0,5: instrumentos de precisión para laboratorios.
- Clase 1; 1,5; 2,5 y 5: Instrumentos de medidas portátiles y de cuadros de CC y CA.

Como se aprecia, al aumento de clase le corresponde una pérdida de jerarquía del instrumento, pero representa un menor costo del mismo.

#### 2.4.2 OTROS ERRORES A TENER EN CUENTA

Analizaremos brevemente diferentes errores que aparecen en los procesos de medición según su origen:

- **Errores de Apreciación (observador)**: se atribuyen a un defecto en las percepciones del observador o a la incorrecta posición del mismo (error de paralaje).  
Estos errores pueden atenuarse ampliando la escala, colocando un espejo detrás de la aguja (paralaje), pentagramando la escala, etc.
- **Errores metodológicos**: se deben a la inserción de el o los instrumentos de medición en el circuito real; los cuales deben alterar lo menos posible las condiciones del mismo.
- **Debido al instrumento**: estos pueden deberse a defectos en la construcción de la escala o un corrimiento de la misma (equipos descalibrados); a sus propias limitaciones en el sistema de lectura (grosor de la aguja o el espesor de la línea de división de la escala, etc.).
- **Debido al modelo físico elegido**: provienen de las aproximaciones realizadas al modelar la realidad con fundamentos teóricos.
- **Condiciones externas**: se deben a las condiciones ambientales en las que se realiza una experiencia, las cuales deben estar contempladas en las sucesivas mediciones (temperatura, humedad, presión atmosférica, presencia de campos magnéticos y eléctricos, etc).

Podemos finalmente llegar a una nueva definición de medición:

***“Medir es conocer el valor de una magnitud y conocer también el error con que se la mide en la unidad seleccionada.”***

## 2.5 OTROS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Existen otros instrumentos de lectura directa denominados DIGITALES que satisfacen las mismas necesidades con igual jerarquía. En esta cátedra no se darán mayores precisiones ya que responden a circuitos electrónicos complejos y su utilización es generalmente muy simple. Diremos sí, que en ocasiones particulares, como ser determinaciones sobre sistemas inestables, su uso no es posible y que como instrumentos de jerarquía son todavía más caros que los analógicos.

La utilización y conexión, así como también los diferentes tipos de los instrumentos digitales existentes, se verán en el proyecto de instalaciones industriales, parte práctica de la materia.

Finalmente, nombraremos algunos instrumentos que, si bien son de uso común, no serán de su utilización normalmente en la industria, por pertenecer a otra especialidad y/o sean de un uso más complejo al abordado en esta materia; entre ellos:

<b><u>INSTRUMENTO</u></b>	<b><u>MIDE</u></b>	<b><u>UNIDAD</u></b>
Coulombímetro	Cargas	Coulombio [Coul]
Registradores	Energía	Watio – hora [Wh]
Megómetro	Aislación	Megohms [ $M\Omega$ ]
Frecuencímetro	Frecuencia	Hertz [Hz]
Cofímetro	$\cos \varphi$	
Secuencímetro	Secuencia	
Osciloscopio	Registraf formas de onda (mediciones en gral.)	

entre otros...