

## ¿APUNTE COMPLEMENTARIO I: INTRODUCCIÓN A LAS MEDICIONES

En el campo de las mediciones eléctricas existen una serie de conceptos elementales que a modo de introducción a la asignatura es importante definir. Si bien muchos de ellos a priori parecen triviales, veremos que en algunos casos su significado difiere de la acepción que comúnmente se les da.

Es muy común en ingeniería utilizar las palabras magnitud, cantidad, unidad o medir, pero ¿qué significan?

Se denominan **magnitudes** a las propiedades de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede representarse cuantitativamente mediante un número.

En el lenguaje de la física la **cantidad** se refiere al *valor que toma una magnitud* dada en un cuerpo o sistema concreto, en otras palabras, la cantidad es el número que describe la longitud de una mesa, la masa de una moneda, el volumen de un lapicero, etc.

Finalmente, la **unidad** es una cantidad de una magnitud física que se usa como *referencia para hacer comparaciones*. Las unidades son cantidades *estandarizadas de una determinada magnitud física, definida y adoptada por convención*.

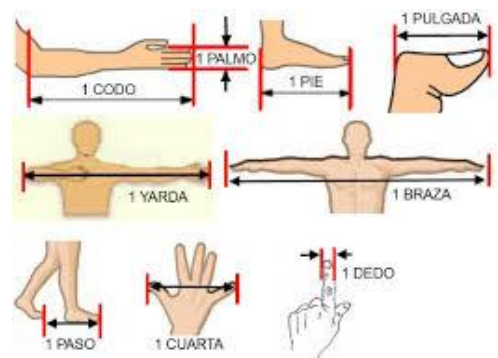
Por ejemplo, al decir “**la longitud de esta barra es 1.53 metros**” lo que estamos diciendo es que una propiedad de la barra que es su longitud (magnitud) es “uno y cincuenta y tres veces” (cantidad) otra longitud que tomamos como referencia por convención y que denominamos “metro” (unidad).

El simple ejemplo anterior puede llevarnos al concepto más importante que queremos dejar claro: ¿Qué es medir?

Medir es comparar una cantidad desconocida que queremos determinar con una cantidad conocida de la misma magnitud que elegimos como unidad, para determinar cuántas veces dicha unidad se encuentra contenida en la cantidad desconocida.

### 1. Sistema Internacional de Unidades (SI): Breve descripción de su evolución histórica

Las primeras unidades de medida de las que se tenga registro son de tipo antropológico. Por ejemplo, 3000 años antes de Cristo en Egipto se utilizaba el “codo real” como unidad de longitud, que consistía en la distancia del codo del faraón hasta el extremo del dedo medio con el brazo extendido más la anchura de la mano. Se cree que esa longitud se materializaba en una barra de granito negro y a partir de ella se construían otras barras de granito o madera que se utilizaban comúnmente para la construcción.



Por citar otros ejemplos, se cree que en el siglo X se define la “pulgada” originalmente como la distancia del nudillo a la punta del dedo pulgar del rey Edgardo de Inglaterra. En el año 1305, el rey Eduardo modifica la definición decretando que “3 granos redondos de cebada hacen una pulgada, 12 pulgadas un pie, 16.5 pies una vara, y 40 varas de longitud y 4 de ancho un acre”. En 1588 Elizabeth I materializa con una barra de latón la yarda, que luego se reemplaza por otra barra de 42 pulgadas como elemento de referencia de longitud en Inglaterra.

Se daba que cada región poseía su propio sistema de medidas y una misma unidad podía tomar diferentes valores según las épocas o lugares, lo que provocaba un sinfín de engaños y cálculos de conversión de cantidades que la mayoría de la población no era capaz de efectuar.

Para unificar los sistemas de unidades que fueron surgiendo en las distintas partes del mundo, en 1790 el gobierno francés ordenó a la Academia Francesa de Ciencias estudiar y proponer un sistema único de pesas y medidas. Los científicos franceses establecieron entonces los *principios* que resultaron ser la base del actual sistema internacional de unidades.

El *primer principio* establecido entonces dice que un sistema internacional de pesas y medidas ***no debe depender de patrones hechos por el hombre***, sino basarse en medidas permanentes provistas por la naturaleza. Por consiguiente, los científicos franceses eligieron como unidad de longitud el metro y como unidad de masa el gramo definiéndoles en aquel momento de la siguiente manera:

- El metro se definió como la diezmillonésima parte de la distancia desde el polo al ecuador a lo largo del meridiano que pasa a través de París. El metro definido así fue materializado provisionalmente a través de una barra de latón en 1795, y luego reemplazada por otra de platino e iridio, mantenida en París. Este “metro patrón” funcionó como referencia internacional durante varias décadas, hasta que, en 1960, y luego en 1983, la definición fue modificada como veremos luego.
- Como unidad de masa eligieron la masa de un centímetro cúbico de agua destilada y le dieron el nombre de “grave” (hoy gramo).

Ambas unidades materializadas son presentadas a los diputados franceses y son guardadas en los Archivos de la República el 22 de junio 1799.



Figura 1: Metro fabricado por Etienne Lenoir y kilogramo fabricado por Nicolas Fortin

Las propuestas de la Academia Francesa fueron aprobadas e introducidas como el Sistema Métrico de Unidades de Francia. El uso del sistema métrico pasa a ser obligatorio en Francia el 1 de enero de 1840.

En esta primera etapa se decide que otras unidades como la de velocidad se deberían derivar de las unidades fundamentales definidas antes. También se define que los múltiplos y submúltiplos de las unidades debían ser en el sistema decimal.

Este 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. Aunque Gran Bretaña y Estados Unidos firmaron la convención, reconocieron su legalidad únicamente en transacciones internacionales y no aceptaron el sistema métrico para uso doméstico, usando internamente su propio sistema. En ese momento se crea “La Oficina Internacional de Pesas y Medidas” (BIPM) con sede en Sèvres, Francia. La misión del BIPM es asegurar la unificación mundial de las medidas; por lo tanto se encarga de:

- Establecer los patrones fundamentales y las escalas para la medida de las principales magnitudes físicas y conservar los prototipos internacionales;
- Llevar a cabo comparaciones de los patrones nacionales e internacionales;
- Asegurar la coordinación de las técnicas de medida correspondientes;
- Efectuar y coordinar las mediciones de las constantes físicas fundamentales relevantes en las actividades precedentes



Con el paso del tiempo se fueron agregando nuevas unidades al sistema. Por ejemplo, en 1889 se agrega el segundo astronómico como unidad de tiempo, estas unidades constituyeron un sistema de unidades mecánicas: el metro, el kilogramo y el segundo. El llamado el sistema MKS. También en ese año se construyen nuevos prototipos para el metro y el kilogramo.

En 1954 se introduce el amperio, el kelvin y la candela y finalmente, en 1960, la Décimo Primera Conferencia General de Pesas y Medidas agrega el mol al sistema y da el nombre de “Sistema Internacional de Unidades” al sistema mencionado, tomando la forma que conocemos hoy, basado no ya en tres unidades sino en siete magnitudes y por ende siete unidades básicas, que son la longitud, la masa, el tiempo, la intensidad eléctrica, la temperatura, la intensidad luminosa y la cantidad de sustancia. La siguiente tabla presenta estas unidades y sus símbolos estandarizados.

| Magnitud base del SI  | Nombre de la Unidad | Símbolo |
|-----------------------|---------------------|---------|
| Longitud              | metro               | m       |
| Masa                  | kilogramo           | kg      |
| Tiempo                | segundo             | s       |
| Intensidad eléctrica  | Ampere              | A       |
| Temperatura           | Kelvin              | K       |
| Intensidad luminosa   | candela             | cd      |
| Cantidad de sustancia | mol                 | mol     |

Tabla I: Unidades de base del SI actual y sus símbolos.

Distintas resoluciones desde 1960 hasta 1992 fueron agregando nombres y símbolos de prefijos para formar los nombres y símbolos de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI.

| Múltiplos y Submúltiplos del Sistema Internacional de Unidades<br>(ejemplo para el segundo [s]) |         |              |             |         |              |
|---|---------|--------------|-------------|---------|--------------|
| Submúltiplos  |         |              | Múltiplos   |         |              |
| Valor   | Símbolo | Nombre       | Valor       | Símbolo | Nombre       |
| $10^{-1}$ s   | ds      | decisegundo  | $10^1$ s    | das     | decasegundo  |
| $10^{-2}$ s   | cs      | centisegundo | $10^2$ s    | hs      | hectosegundo |
| $10^{-3}$ s   | ms      | milisegundo  | $10^3$ s    | ks      | kilosegundo  |
| $10^{-6}$ s   | μs      | microsegundo | $10^6$ s    | Ms      | megasegundo  |
| $10^{-9}$ s   | ns      | nanosegundo  | $10^9$ s    | Gs      | gigasegundo  |
| $10^{-12}$ s  | ps      | picosegundo  | $10^{12}$ s | Ts      | terasegundo  |
| $10^{-15}$ s  | fs      | femtosegundo | $10^{15}$ s | Ps      | petasegundo  |
| $10^{-18}$ s  | as      | attosegundo  | $10^{18}$ s | Es      | exasegundo   |
| $10^{-21}$ s  | zs      | zeptosegundo | $10^{21}$ s | Zs      | zettasegundo |
| $10^{-24}$ s  | ys      | yoctosegundo | $10^{24}$ s | Ys      | yottasegundo |

Tabla II: Múltiplos y submúltiplos del SI y sus símbolos.

### 1.1. Unidades del SI Actual.

Las unidades del actual Sistema Internacional se dividen en tres grupos:

- **Las unidades de base:** son aquellas que no se componen de otras unidades. Como dijimos actualmente son siete: el metro, el kilogramo, el segundo, el Ampere, el Kelvin, la candela y el mol. (Ver Tabla I)
- **Las unidades derivadas:** son aquellas que se componen de dos o más unidades de base. Por ejemplo, la velocidad con que se mueve un objeto es una magnitud que se puede definir como la longitud recorrida por ese objeto dividido el tiempo que tardó en recorrerlo. La longitud y el tiempo tienen unidades de base, mientras que la velocidad tiene una unidad derivada, porque se puede obtener de una combinación de unidades de base.
- **Las unidades complementarias:** son aquellas que no se derivan de una magnitud física pero son necesarias para su comprensión. Por ejemplo la unidad de ángulo sólido: el estereorradián (Sr).

La figura 1.1 ilustra esta clasificación:

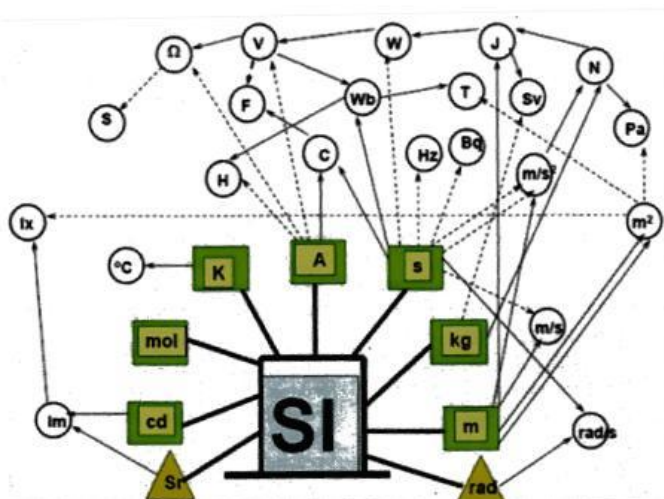


Figura 1.1:  
Unidades de base, complementarias y derivadas del SI actual.

- Unidades de base (Cuadrados)
- Unidades complementarias (Triángulos)
- - Unidades derivadas (Círculos)

(Fuente INTI).

## 1.2. Definición de las Unidades de Base del SI y su Implementación Práctica.

En noviembre de 2018 se aprobó la mayor revisión del Sistema Internacional de Unidades desde su creación (1960). La Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), órgano internacional que aprueba el SI, redefinió cuatro de las unidades de base: el ampere, el kilogramo, el kelvin y el mol; y reformuló el metro, el segundo y la candela. Los cambios entrarán en vigencia el 20 de mayo de 2019 (día internacional de la metrología).

Todas las nuevas definiciones se basan en constantes de la naturaleza, en lugar de artefactos, propiedades de materiales o experimentos teóricos irrealizables como sucedía hasta ahora en algunos casos. Veamos brevemente cada de las definiciones de las unidades de base con vigencia antes y después del 20 de mayo de 2019:

### El segundo

Históricamente la medición de tiempo estuvo regida por el período de rotación de la tierra que se suponía uniforme, determinando una escala de tiempo conocida como Tiempo Universal (UT) donde el segundo se definía como  $1/86400$  de la duración del día solar medio. Esta definición del segundo de 1889 adolecía de la falta de uniformidad en la velocidad de rotación de la tierra, debida básicamente a efectos gravitatorios, fuerza de mareas, etc.

Este inconveniente se salvaría años más tarde (en 1967) con la aparición de los relojes atómicos basados en átomos de cesio ya que considerando su extraordinaria estabilidad y confiabilidad, la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) decide adoptar la frecuencia de transición atómica de estos como nuevo patrón para redefinir la unidad de tiempo.

Hasta el 20 de mayo de 2019 la definición del segundo es:

*“La unidad de tiempo del Sistema Internacional (SI) de unidades es el segundo, el cual se define como la duración de 9 192 631 770 (nueve mil ciento noventa y dos millones seiscientos treinta y un mil setecientos setenta) periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cesio 133”.*

En su reunión de 1997, el CIPM confirmó que esta definición se refiere a un átomo de cesio en reposo, a una temperatura de 0 K. La incertidumbre correspondiente a la realización de la unidad de tiempo del SI, hecha a través de relojes primarios de Cesio, mejora a razón de un orden de magnitud por década. Actualmente la mejor realización del segundo del SI obtenida con gas ultra frío de Cesio 133 en las llamadas fuentes atómicas tiene una incertidumbre de  $1.1 \times 10^{-16}$ . Razón por lo cual la definición actual del segundo no cambiará sino que solo se rescribirá y la única diferencia radica en que las condiciones en las que se realizan las mediciones se hacen más rigurosas.

La definición propuesta para entrar en vigencia a partir del año 2019 es la siguiente:

*“El **segundo**, cuyo símbolo es s, es la unidad de tiempo del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la frecuencia del cesio,  $\Delta\nu_{Cs}$ , la frecuencia de la transición entre niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, igual a 9 192 631 770 cuando es expresada en unidades de Hz, que es igual a  $s^{-1}$ ”.*



La implementación práctica de la definición del segundo se hace por medio de relojes atómicos de cesio como ya se dijo. Se basan en que los átomos, bajo diversas excitaciones, emiten radiaciones monocromáticas y por lo tanto pueden generar un período (duración de una oscilación) definido con mucha exactitud.

Gracias a estas definiciones se ha creado el TAI (Tiempo Atómico Internacional), una escala de tiempo creada en el BIPM, que es el resultado de promediar los datos de tiempo suministrados por unos 200 relojes de cesio repartidos en más de 50 laboratorios de tiempo en distintos países del mundo.

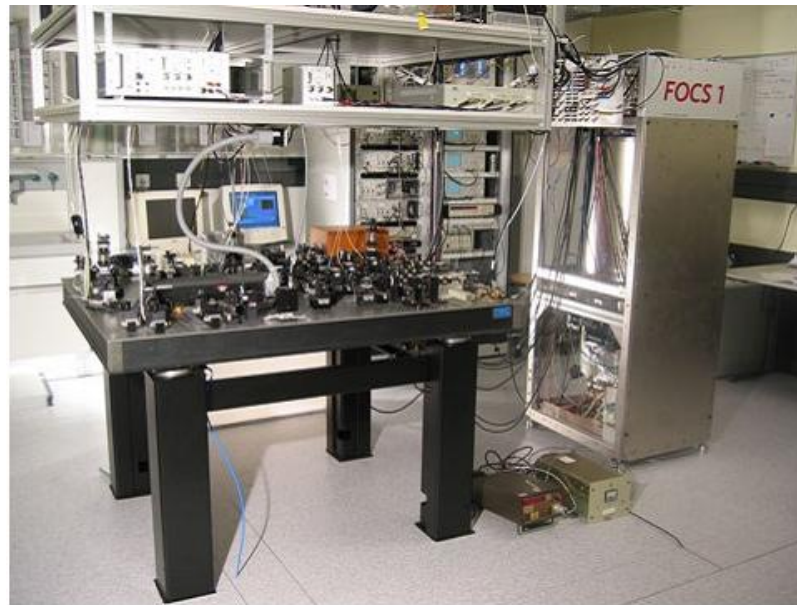


Figura 1.2: El reloj atómico FOCS 1 de fuente de cesio frío continuo en Suiza que comenzó a funcionar en 2004 con una incertidumbre de un segundo en 30 millones de años (Fuente: INACAL).

### El metro:

La definición del metro de 1889 basada en una barra de platino – iridio fue reemplaza en 1960 por una definición basada en la longitud de onda de una radiación del kriptón 86 y posteriormente en 1983 se la reemplazó por la que se encuentra vigente hasta mayo de 2019, la cual es:

*“El metro, unidad de longitud, es la distancia que recorre la luz en vacío, en un intervalo de tiempo de  $1/299792458$  segundos”.*

La definición propuesta para entrar en vigencia a partir del año 2019 no sufre cambios, solo se reescribe de la siguiente manera:

*“El **metro**, cuyo símbolo es  $m$ , es la unidad de longitud del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la velocidad de la luz en el vacío,  $c$ , igual a  $299\,792\,458$  cuando es expresada en unidades de  $m\,s^{-1}$ , donde el segundo es definido en términos de la frecuencia del cesio  $\Delta\nu_{Cs}$ ”.*



Figura 1.3: Prototipo Internacional del metro de 1889

La implementación práctica de la definición del metro se hace por medio de métodos interferométricos. El método consiste en comparar la longitud a ser medida (por ejemplo la de un bloque metálico) con la longitud de onda de una radiación luminosa cuya frecuencia ha sido previamente determinada con gran exactitud. Es así que en diferentes Institutos de Metrología se construyeron láseres estabilizados en las frecuencias patrones recomendadas por el CIPM. Un láser estabilizado es un sistema físico que emite luz coherente, o sea, con una única longitud de onda extremadamente estable.



Figura 1.4: Fotografía de un laser utilizado en el proceso de calibración de un bloque metálico

Con estos láseres se calibran (se miden) bloques de acero contando cuantas longitudes de onda entran en la longitud de estos bloques patrones. Luego estos bloques de acero se utilizan como elementos de referencia para medir otros bloques de menor calidad.

## El kilogramo

Desde la primera Conferencia general de pesas y medidas en 1889 y hasta 2019, el prototipo internacional del kilogramo es una masa de 1 kg de platino iridio que materializa la unidad de masa, actualmente se encuentra en Francia. El kilogramo es la única unidad base que no se había podido definir hasta el momento usando una constante de la naturaleza.

Es hasta 2018 es un objeto físico, una pesa, por lo que no se estaba cumpliendo con los principios que se establecieron en 1790. Por esta razón, distintos grupos de investigación trabajaron durante años para redefinirlo.

Hasta el 20 de mayo de 2019 la definición del Kilogramo es:

*“El kilogramo es la unidad de masa, es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo”*

Esta pesa, construida 1879, que se denomina IPK (siglas en inglés de Prototipo Internacional del Kilogramo) y se custodia en las instalaciones del BIPM (Bureau Internacional de Pesas y Medidas) en Sèvres, cerca de París, existiendo distintas copias de esta pesa en distintos Institutos de Metrología a lo largo del mundo.



Figura 1.5: Prototipo Internacional del Kilogramo

El prototipo del kilogramo es un objeto de forma cilíndrica, de 39 mm de altura y 39 mm de diámetro, fabricado con una aleación de 90% de platino y 10% de iridio”. Se eligieron estas dimensiones para lograr que la masa de 1 dm<sup>3</sup> de agua sea aproximadamente de 1 kg.

El prototipo internacional del kilogramo resguardado en Paris por más de 100 años se comparó periódicamente con las copias mediante un comparador de masa, de lo que se ha concluido que ha alcanzado una deriva en masa de al menos 0,5 µg por año, perdiendo aparentemente 50 µg de masa respecto a los patrones de los demás Institutos Nacionales de Metrología (INMs). La

estabilidad de la unidad de masa es un problema porque no se sabe cómo fue que derivó en todos estos años.

La definición propuesta para entrar en vigencia a partir del año 2019 es la siguiente:

*“El **kilogramo**, cuyo símbolo es kg, es la unidad de masa del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la constante de Planck,  $h$ , igual a  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  cuando es expresada en unidades de  $J\,s$ , que es igual a  $kg\,m^2\,s^{-1}$ , donde el metro y el segundo son definidos en términos de  $c$  y  $\Delta\nu_{Cs}$ ”.*

La definición anterior del kilogramo fijaba el valor de la masa del prototipo internacional del kilogramo igual a un kilogramo exactamente, y el valor de la constante de Planck “ $h$ ” tenía que determinarse experimentalmente. La nueva definición fija el valor de “ $h$ ” exactamente, y la masa del prototipo internacional del kilogramo ahora tiene que ser determinada experimentalmente.

Con esta nueva definición del kilogramo, su implementación práctica podrá realizarse con cualquier experimento que vincule la medición de masa con la constante de Planck. Una posibilidad es utilizar la denominada balanza de Watt - un instrumento que compara potencia mecánica con potencia eléctrica, lo que permite establecer una relación entre una masa, la aceleración de la gravedad, una velocidad, dos frecuencias, y la constante de Planck.

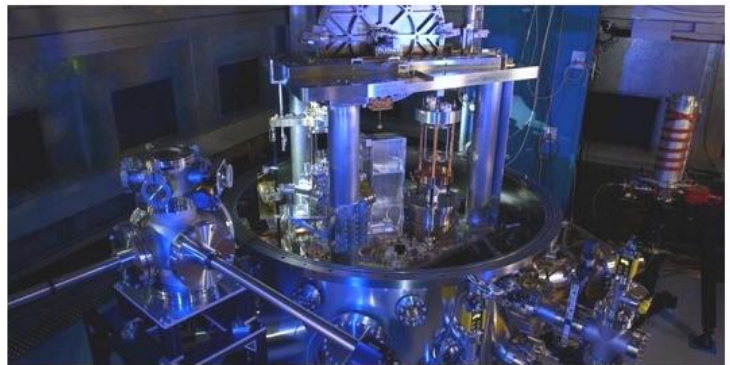


Figura 1.6: Foto de la Balanza de Watt ubicada en el NIST - USA

## El Kelvin

El kelvin (unidad de temperatura) se definía desde 1954 en función de la temperatura en la que coexisten agua, hielo y vapor en equilibrio (proceso conocido como “punto triple del agua”). Su nueva definición no dependerá de las propiedades de una sustancia (agua es este caso), sino que se realizará en función de la constante de Boltzmann ( $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ), abriendo la puerta a varias realizaciones experimentales posibles.

Hasta el 20 de mayo de 2019 la definición del Kelvin es:

*“El Kelvin, unidad de la temperatura termodinámica, es la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple de agua.”*

El llamado punto triple del agua es el punto donde es posible el equilibrio o coexistencia de la sustancia - agua en este caso - en sus estados sólido, líquido y gaseoso. Se da a una temperatura y presión determinada.



Figura 1.7: Celda para la realización del punto triple de agua, fotografiada a temperatura ambiente



Para materializar el kelvin se construye una escala de temperaturas. Por ejemplo, en los laboratorios existen una serie de celdas selladas, que contienen cada una distintas sustancias puras, en condiciones tales que pongan a la sustancia en cierto estado al que corresponde una temperatura dada, que representa un punto fijo de definición de la escala de temperatura.

Ejemplo: el punto de fusión del galio corresponde a 302.914 K, el punto de solidificación del Indio a 429.748 K, el Punto de solidificación del Estaño a 505.078 K, etc. Gracias a estas celdas es posible establecer puntos de verificación.

La definición propuesta para entrar en vigencia a partir del año 2019 es la siguiente:

*“El **kelvin**, cuyo símbolo es K, es la unidad de temperatura termodinámica del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la constante de Boltzmann,  $k$ , igual a  $1,380649 \times 10^{-23}$  cuando es expresada en unidades de  $J K^{-1}$ , que es igual a  $kg m^2 s^{-1} K^{-1}$ , donde el kilogramo, el metro y el segundo son definidos en términos de  $h$ ,  $c$  y  $\Delta\nu_{Cs}$ ”.*

## La candela

Hasta el 20 de mayo de 2019 la definición de la Candela data de 1979 y es:

*“La candela es la intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz y que tiene una intensidad radiante en dicha dirección de  $1/683$  W por estereorradián”.*

Para poner en práctica esta definición, el BIPM se basa en un radiómetro eléctrico de sustitución criogénica, que se considera ser uno de los más exactos disponibles. En base a este radiómetro los institutos nacionales de metrología calibran lotes de lámparas incandescentes alimentadas en corriente continua.

A partir de estos patrones se calibran luxómetros (instrumentos de transferencia) con los que se realizan unidades derivadas (lux, lumen, etc.) y se asignan valores de intensidad a otras lámparas. El valor certificado de las lámparas patrones tiene una validez que depende fundamentalmente del tiempo de uso, por lo que se requiere de recalibraciones e intercomparaciones periódicas.



Figura 1.8: Implementación de la candela

La definición propuesta para entrar en vigencia a partir del año 2019 es la siguiente:

*“La **candela**, cuyo símbolo es cd, es la unidad de intensidad luminosa del SI en una dirección dada. Se la define estableciendo el valor numérico fijo de la eficacia luminosa de una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , igual a 683 cuando es expresada en las unidades  $lm W^{-1}$ , que son equivalentes a  $cd sr W^{-1}$ , o  $cd sr kg^{-1} m^{-2} s^3$  donde el kilogramo, el metro y el segundo son definidos en términos de  $h$ ,  $c$  y  $\Delta\nu_{Cs}$ ”.*

## El mol

Hasta el 20 de mayo de 2019 la definición del mol data de 1971 y es:

*“La cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kilogramos de carbono 12”.*

En la actualidad, no se ha considerado la realización de un patrón primario único para el mol aunque se viene trabajando con el fin de contar con patrones confiables. Como patrones de trabajo, se emplean los métodos llamados primarios (gravimetría, titulación, etc) y cuerpos químicamente puros conocidos como materiales de referencia.

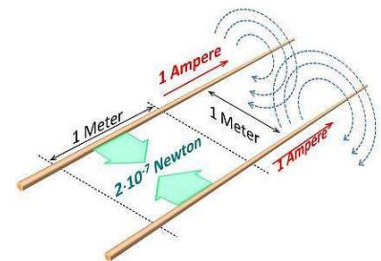
La definición propuesta para entrar en vigencia a partir del año 2019 es la siguiente:

*“El **mol**, cuyo símbolo es mol, es la unidad de cantidad de sustancia (o materia) del SI. Un mol contiene exactamente  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  entidades elementales. Este número es el valor numérico fijo de la constante de Avogadro,  $N_A$ , cuando es expresada en unidades de  $\text{mol}^{-1}$  y es llamado el número de Avogadro”.*

## El Amper

Hasta el 20 de mayo de 2019 la definición del Ampere data de 1946 y es:

*“La corriente constante que, si es mantenida en dos conductores rectos paralelos de longitud infinita, de sección circular despreciable y separados 1 m en el vacío, produciría entre estos dos conductores una fuerza de  $2 \times 10^{-7}$  Newton por metro de longitud”.*



De acuerdo con las decisiones de la Conferencia General de Pesas y Medidas, el SI va a ser modificado sustancialmente en el año 2019, cambiando la definición del Ampere para ser medible a través de constantes naturales. La definición para el Ampere según la nueva propuesta es:

*“El **Ampere**, cuyo símbolo es A, es la unidad de corriente eléctrica del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la carga elemental,  $e$ , igual a  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  cuando es expresada en unidades de A s, donde el segundo es definido en términos de  $\Delta\nu_{Cs}$ .”*

El efecto de esta definición es que un ampere es la corriente eléctrica correspondiente al flujo de  $1 / (1,602\,176\,634 \times 10^{-19})$  cargas elementales por segundo.

La implementación del amper en los laboratorios de metrología puede realizarse indirectamente a partir del Volt y el Ohm. El volt, unidad de tensión eléctrica, se puede lograr en laboratorio mediante el llamado “Efecto Josephson”. El Ohm, unidad de resistencia eléctrica, se puede lograr en laboratorio mediante el llamado “Efecto Hall Cuántico”.

Dado que estas unidades (el Volt y el Ohm) pueden realizarse experimentalmente se pueden calibrar (medir) fuentes y resistencias, por lo que el ampere se deduce de la Ley de Ohm utilizando esos elementos como:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\text{Fuente calibrada con el Efecto Josephson}}{\text{Resistencia calibrada con el Efecto Hall Cuántico}}$$

El **Efecto Josephson** se da cuando se somete a una juntura superconductor-aislante-superconductor a muy baja temperatura (se la sumerge en un baño de helio líquido a 4,2 K por ejemplo) y se la irradia con señales de microondas de por ejemplo 70 GHz. En estas condiciones se genera en la juntura una tensión continua muy estable que está cuantificada y es de la forma:

$$V = n \frac{h f}{2 e}$$

Siendo:  $n = \text{un número entero.}$   
 $h = \text{constante de Plank}$   
 $f = \text{frecuencia aplicada al sistema}$   
 $e = \text{carga del electrón}$

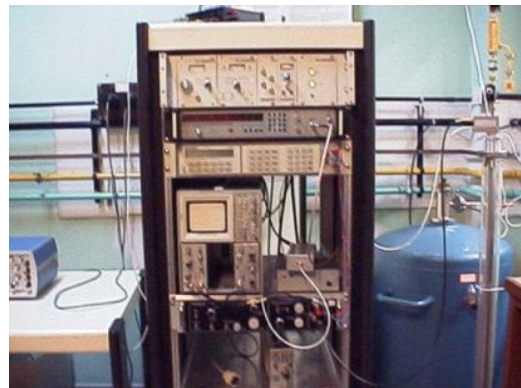
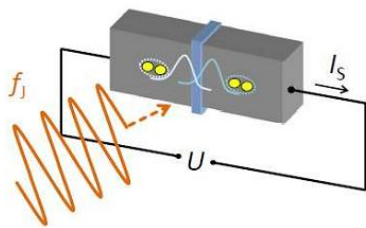


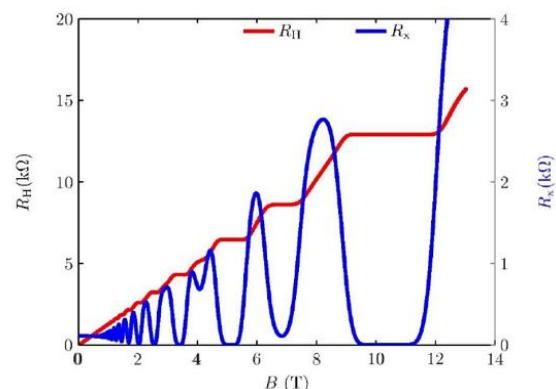
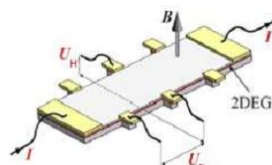
Figura 1.9: Equipo para producir el Efecto Josephson (Fuente INTI)

En otras palabras, la tensión obtenida depende de la frecuencia y de constantes conocidas. La frecuencia aplicada al sistema es medida y controlada por un contador que a su vez está referido a la señal de un reloj atómico. Este reloj genera una frecuencia con muy alta estabilidad y exactitud y por ende la tensión generada también es muy exacta. Con el equipo de Efecto Josephson que posee el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) se pueden obtener tensiones eléctricas hasta 1,2 V de valor nominal.

El **Efecto Hall Cuántico** se logra cuando se somete a una temperatura muy baja y a un campo magnético muy intenso una muestra formada por materiales semiconductores, de esta forma la muestra semiconductor toma un valor de resistencia muy estable. Esta resistencia se llama resistencia Hall ( $R_H$ ) y tiene valores que son independientes de otras magnitudes físicas y sus cambios, dependiendo sólo de constantes universales como la constante de Planck ( $h$ ) y la carga del electrón ( $e$ ). De esta manera:

$$R_H = \frac{h}{i e^2}$$

Siendo:  $i = \text{un número entero.}$   
 $h = \text{constante de Plank}$   
 $e = \text{carga del electrón}$



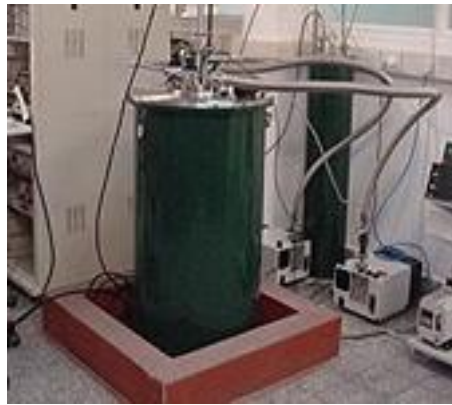


Figura 1.10: Equipo para producir el Efecto Hall Cuántico que permite alcanzar temperaturas muy bajas, de pocas décimas de Kelvin y campos magnéticos muy intensos, mayores a los 10 T. (Fuente INTI)

## 2. Clasificación de Patrones y Concepto de Trazabilidad

Podemos decir que todas nuestras mediciones son en última instancia comparaciones respecto de las siete unidades fundamentales del SI, pero es evidente que pocos laboratorios en el mundo pueden implementar todas o algunas de las siete definiciones que vimos. Por este motivo, se ha ideado un sistema para asegurar la calidad de una medición realizada por un laboratorio cualquiera, mediante el empleo de elementos “patrones” cuya calidad está asegurada mediante la llamada “cadena de trazabilidad”.

Se define un elemento patrón como *“una medida materializada, aparato de medición, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores de una magnitud para servir de referencia”*.

Los patrones o elementos de referencia pueden a su vez clasificarse de acuerdo a su función:

- **Patrón primario:** patrón que se designa o se recomienda por presentar la más alta calidad metrológica y cuyo valor se establece sin referirse a otros patrones de la misma magnitud. Son en general patrones internacionales como por ejemplo la pesa de platino-iridio que se encuentra en París y que define el kilogramo denominada IPK, o el efecto Josephson.
- **Patrón secundario:** patrón cuyo valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud. Por ejemplo el patrón nacional de masa que posee el INTI (un cilindro de acero inoxidable denominado IPK30 que se compara periódicamente con el IPK del BIPM).
- **Patrón de referencia:** patrón, generalmente de la más alta calidad metrológica disponible en un lugar u organización dados, del cual se derivan las mediciones que se hacen en dicho lugar u organización, por ejemplo en un laboratorio de una empresa.
- **Patrón de trabajo:** patrón utilizado corrientemente para controlar medidas materializadas, aparatos de medición o materiales de referencia.
- **Patrón de transferencia:** patrón empleado como intermediario para comparar patrones entre sí.



La calidad de todos estos elementos patrones se asegura mediante comparaciones periódicas con otros patrones de mejor calidad, hasta llegar al patrón primario que no es otra cosa que la implementación de la definición de la unidad de base del SI que corresponda. Todas estas comparaciones quedan registradas en certificados que aseguran la calidad formando la cadena de trazabilidad.

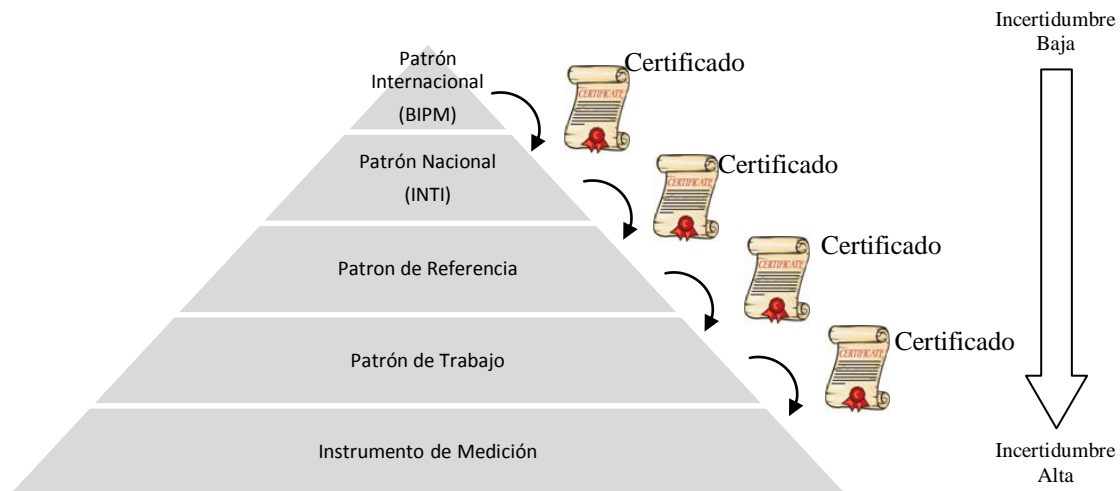


Figura 2.1: Cadena de trazabilidad en las mediciones

Podemos decir entonces que por *trazabilidad* se entiende la propiedad de una medición o del valor de un patrón de estar relacionado a referencias establecidas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena continua de comparaciones, todas ellas con incertidumbres establecidas.

### 3. Patrones de Tensión y Resistencia de Uso Común en Laboratorios Eléctricos

Para la metrología eléctrica que es lo que nos interesa en este curso, los patrones primarios y/o secundarios de tensión y resistencia son sistemas que implementan los Efectos Josephson y Hall Cuántico que mencionamos anteriormente.

Como patrones de referencia, de trabajo o de transferencia que son los más comunes, los laboratorios emplean pilas de Weston y fuentes especiales de estado sólido para la magnitud tensión, y resistores de aleaciones especiales para la magnitud resistencia.

#### La Pila de Weston:

La pila o celda de Weston o también denominada “pila de cadmio” es construida en un recipiente de vidrio en forma de H, con el ánodo en la parte inferior de una "pata" y el cátodo en la otra pata.

Está formada por un ánodo (polo negativo) de amalgama de cadmio/mercurio, un cátodo (polo positivo) de mercurio puro, encima y como despolarizador se coloca una pasta de sulfato de mercurio ( $\text{SO}_4\text{Hg}_2$ ), sulfato de cadmio ( $\text{SO}_4\text{Cd}$ ) y su solución saturada como se muestra en la figura 3.1.

Las conexiones eléctricas de los dos electrodos se hacen por medio de cables de platino fundido a través del vidrio en la parte inferior de las patas de la celda.

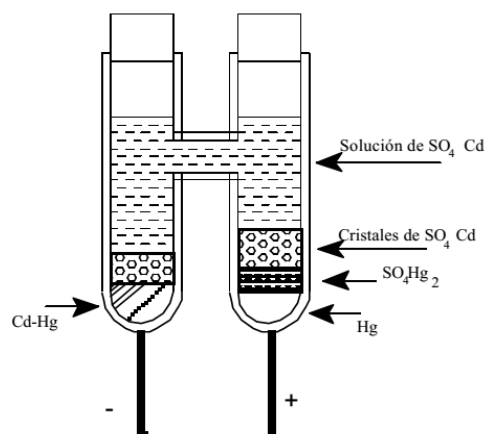


Figura 3.1: Esquema de una pila de Weston

La celda Weston presenta siempre una referencia precisa 1.0183V a 20°C con un coeficiente de temperatura muy bajo (disminuye aproximadamente un 0.004% por cada grado de variación de la temperatura). La resistencia interna de la pila es de aproximadamente 150 ohm.

Sin embargo, la celda de Weston no es capaz de suministrar corriente y sólo se podían utilizar para proporcionar una tensión de referencia a circuitos de muy alta resistencia durante la medición. Con precauciones se puede alcanzar que la pila suministre valores de corriente no superiores a 5µA.

### Fuentes de Estado Sólido

Son fuentes electrónicas de corriente continua que contienen una batería y se conectan a la red eléctrica. Poseen circuitos electrónicos especialmente diseñados para producir tensiones de referencia de por ejemplo 10V o 1.018V altamente estables y en un dispositivo transportable, por lo que comúnmente se las utiliza como patrones de transferencia o “viajeros” para comparar patrones con distinta ubicación geográfica.



Figura 3.2: Fuente de estado sólido patrón

### Resistencias Patrones:

Para el diseño de patrones de resistencias, se emplean hilos metálicos calibrados. Puesto que en los metales varía mucho la resistividad en función de la temperatura, se utilizan aleaciones.

Cuando las resistencias son bajas - de 10 ohm, y menos- poseen la disposición de cuatro bornes como muestra la figura 3.3.

Los contactos de tensión y corrientes están separados, evitando así errores debido a las resistencias de contactos en los bornes de conexión.

El hilo convenientemente aislado va encerrado en un recipiente metálico y sus terminales van dispuestos exteriormente en la tapa.

Como vemos en el esquema de la figura 3.3 existen cuatro terminales: Dos de ellos, los de mayor sección, sirven para conectar la resistencia patrón al circuito de medida y los otros dos - de menor sección- se emplean para medir la caída de tensión en la resistencia propiamente dicha.

El recipiente metálico tiene perforaciones para poder sumergirlo en aceite. Ello se realiza cuando se desea mantener al elemento en temperatura rigurosamente constante. Generalmente en el centro del patrón de resistencia, existe un orificio que permite colocar un termómetro para la verificación de la temperatura.

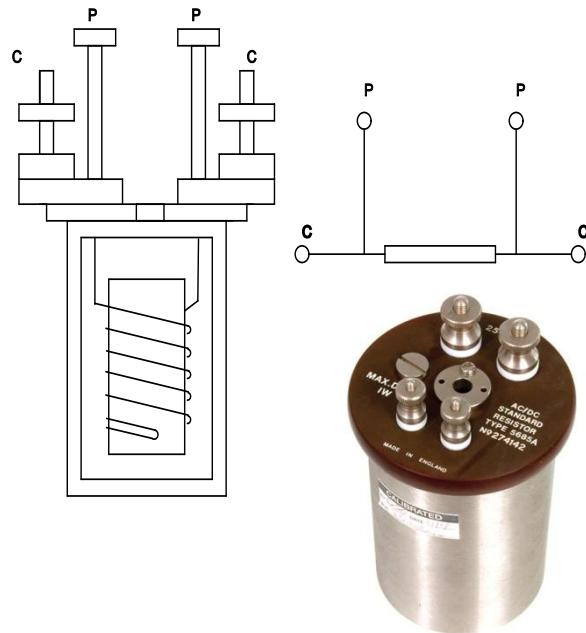


Figura 3.3: Esquema e imagen de una resistencia patrón

La capacidad de disipación de potencia de las resistencias patrones está en el orden del Watt en aire y de 10 Watt cuando están sumergidas en aceite. A partir de estos valores y sabiendo el valor de la resistencia es fácil determinar la corriente que puede admitir, la cual será:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

Se construyen resistores de valor fijo desde 0.1 mΩ hasta 100 kΩ, calibrados generalmente por el método de comparación.

#### ***Aleaciones utilizadas en resistencias patrones:***

Las resistencias patrones se construyen con alambres de distintas aleaciones metálicas, porque los metales puros tienen una resistencia específica demasiado pequeña y un coeficiente de temperatura demasiado alto.

De los materiales utilizados en la construcción de resistencias patrones se destacan:

##### **a) Manganina:**

Aleación conformada por 84% de cobre, 12% de manganeso y 4% de níquel, esta proporción es una solución de compromiso a efectos de alcanzar mínimos valores de coeficiente de temperatura y tensión termoeléctrica.

Para el intervalo entre 20 y 30 °C, la variación de resistencia es de 10 a 20 p.p.m. (partes por millón).

Otras características destacadas de esta aleación es su resistencia específica elevada ( $0,45 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$ , unas 25 veces mayor que la del cobre), gran estabilidad de su valor en el tiempo y reducida tensión termoeléctrica (2 a 3  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ).

b) Constantan:

Aleación de cobre con 40 a 60% de níquel y una pequeña proporción de manganeso. Tiene propiedades análogas a las de la manganina, salvo su tensión termoeléctrica con respecto al cobre, relativamente elevada: alrededor de 40  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Se utiliza esta aleación para resistencias grandes (por encima de los mil ohm), especialmente en circuitos de corriente alterna, donde no influye la tensión termoeléctrica.

### **Resistores Patrones en Corriente Alterna. Comportamiento.**

Como primera aproximación una resistencia en corriente alterna se comporta como el circuito equivalente de la figura 3.4., que consta de una resistencia pura R con una inductancia L y conectada en paralelo con una capacidad C.

El circuito equivalente demuestra que al existir una componente reactiva, tendremos un ángulo de desfase  $\phi$ , que llamamos ángulo de error.

Es evidente que para minimizar  $\phi$ , la componente reactiva deberá ser pequeña.

Para hallar el ángulo  $\phi$ , partimos de la impedancia equivalente  $Z_e$ :

$$Z_e = \frac{(R+j\omega L) \cdot (j\frac{-1}{\omega C})}{(R+j\omega L) - j\frac{1}{\omega C}} = \frac{\omega L - jR}{R\omega C - j(1 - \omega^2 LC)}$$

$$Z_e = \frac{R + j\omega[L(1 - \omega^2 LC) - R^2 C]}{(R\omega C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}$$

$$\text{tg}\phi = \frac{X_e}{R_e} = \frac{\omega \cdot [L(1 - \omega^2 LC) - R^2 C]}{R}$$

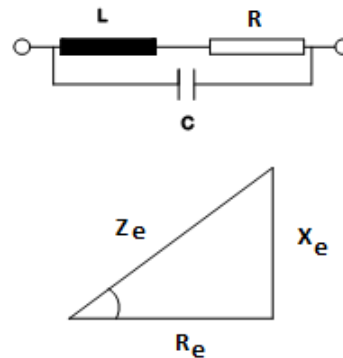


Figura 3.4: Circuito equivalente de una resistencia patrón

Puesto que el producto L.C es muy pequeño, puede despreciarse por lo que el ángulo de error valdrá aproximadamente:

$$\text{tg}\phi \cong \omega \left( \frac{L}{R} - RC \right) = \omega\tau$$

Siendo  $\tau$  la constante de tiempo.

La  $\text{tg}\phi$  y por ende  $\phi$  será igual a cero (resistencia pura) cuando se cumpla que:



$$R^2 = \frac{L}{C}$$

Con lo cual deducimos:

- a) Para resistencias pequeñas, la inductancia pura debe ser baja y la capacidad alta.
- b) Para resistencias grandes la capacidad debe ser muy pequeña.

### ***Diseño de Resistores para Minimizar su Reactancia***

Para la construcción de resistores de gran exactitud, con apreciable disminución de los efectos de la frecuencia se emplean distintos recursos constructivos. Algunos de ellos son los detallados a continuación:

- a) bobinado bifilar:

Para resistencias chicas se utiliza esta disposición que consiste en enrollar el conductor en doble lazo, de manera que el conductor de ida y vuelta estén casi uno al lado de otro, de este modo se compensan entre sí las inductancias.

Se usan para resistencia de 0,1 ohm hasta 1 ohm, pues la capacidad aumenta a medida que nos acercamos a los terminales del conductor doble, entre los cuales existe la máxima diferencia de potencial.

- b) bobinas planas:

En el denominado arrollamiento de Rowland, un conductor simple se devana en forma de hélice sobre una delgada lámina de mica u otro material aislante, formado así una resistencia con mínima inductancia y capacidad reducida.

Se utiliza en resistores de valores nominales superior a los 100 ohm.

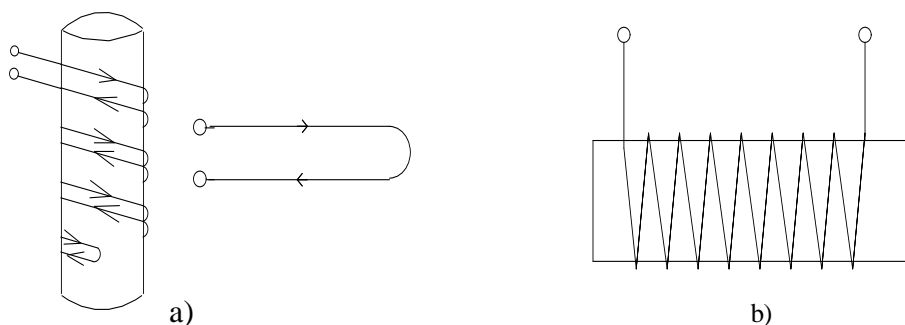


Figura 3.5: a) Bobinado bifilar , b) Arrollamiento de Rowland

## **4. Concepto de Exactitud y Precisión.**

Aunque en el lenguaje común los términos exactitud y precisión son sinónimos, metrológicamente estos términos no se deben confundir ya que la diferencia entre ambos es significativa.

**Exactitud:** En el Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología (VIM) se define el término *exactitud* como “el grado de concordancia entre el resultado de una medición y el valor verdadero del mensurando”.

**Precisión:** Por otra parte, la *precisión* se define como “el grado de coincidencia existente entre los resultados independientes de una medición, obtenidos en condiciones estipuladas”.

Ejemplo: La siguiente figura muestra cuatro casos posibles de disparos a un blanco. Los dos de la izquierda tienen alta precisión porque los valores están muy próximos entre sí, pero uno representa disparos exactos porque dan en el blanco (tienen bajo error) y el otro no. Los dos de la derecha tienen baja precisión porque no están próximos entre sí, mientras que unos son exactos porque dan en el blanco y los otros no.

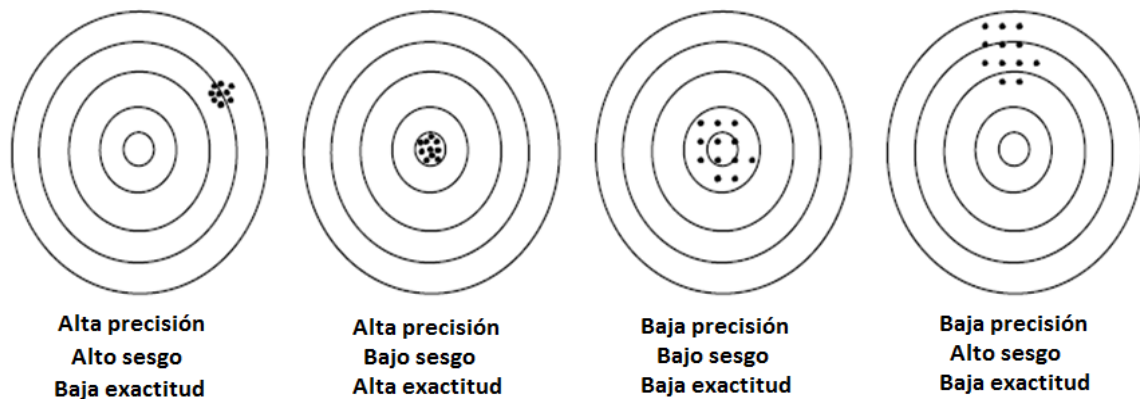


Figura 4.1: Casos posibles de exactitud y precisión.

## 5. Error Absoluto y Error Relativo

### Error Absoluto

Partamos de la afirmación que ninguna medida es exacta en el sentido absoluto de la palabra por lo tanto se define el “error” (también llamado error absoluto) como la diferencia entre el valor medido ( $X_m$ ) y el valor verdadero ( $X_v$ ):

$$E_{ABS} = X_m - X_v$$

El valor de  $E_{ABS}$  será positivo o negativo según que el valor  $X_m$  sea mayor o menor que  $X_v$ . Cuando la diferencia anterior es positiva se dice que el error cometido es en exceso y en defecto cuando es negativa.

Puesto que el valor verdadero es teórico y nunca se puede conocer en la práctica se lo reemplaza por el valor verdadero probable  $X_v'$  o valor convencional, de manera que:

$$E_{ABS} \cong X_m - X_v'$$

También es común hablar de “Corrección”. La Corrección es el error absoluto pero cambiado de signo:

$$C = -E_{ABS}$$

La Corrección sumada al valor medido nos permitiría obtener el valor verdadero probable.

### **Error Relativo**

Cuando se requiere comparar dos errores de dos magnitudes medidas muy diferentes, el error absoluto no es suficiente. Por lo tanto, se define el error relativo como:

$$e = \frac{X_m - X'_V}{X'_V} \cong \frac{E_{ABS}}{X_m}$$

Así si nos dicen que dos mediciones han arrojado el mismo valor de error absoluto y que el mismo es de 1 Ampere no refleja nada respecto de la exactitud de la medición. Ahora bien, si nos aclaran que una de las mediciones el valor medido es 100 Ampere y en la otra de 10 Ampere, ya hay otros elementos de juicio porque el error relativo para el caso de 100 A será menor.

En la práctica es más útil convertir al error relativo en porcentual, así se tiene:

$$e_{\%} \cong \frac{E_{ABS}}{X_m} 100$$

Aplicando la última expresión en los ejemplos anteriores tendremos:

Para 100 A:  $e_{\%} = 1 \%$

Para 10 A:  $e_{\%} = 10 \%$

No caben dudas ahora, que en la medición de los 100 A el grado de bondad es superior. Los valores así expresados también se los suele definir como límite de error relativo en sustitución del límite de error absoluto.

En mediciones de alta exactitud en que los errores relativos son muy pequeños, se expresa el error relativo en partes por millón (ppm):

$$e_{ppm} = 10^6 \frac{E_{ABS}}{X_V}$$

## **6. Expresión del Resultado de una Medición**

Un hecho significativo de las medidas es que el valor ‘verdadero’ de una magnitud no es nunca conocido con absoluta certeza, y por ende el “error absoluto” nunca puede determinarse exactamente. Siempre se da que están presentes fenómenos físicos que se dan aleatoriamente por lo que se recurre a las leyes estadísticas para cuantificar su valor. Aparece entonces el concepto de **incertidumbre** de medida.

El VIM define la incertidumbre como un “*parámetro no negativo asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que, con fundamento, pueden ser atribuidos al mensurando*”.

No es igual hablar de error que de incertidumbre. El error es una diferencia mientras que la incertidumbre es un parámetro **asociado a una probabilidad**.

La incertidumbre de medida es pues una expresión del hecho de que, para un mensurando y un resultado de medida dados, *no existe un único valor, sino un infinito número de valores dispersos en torno al resultado, que son compatibles con todas las observaciones, datos y conocimientos que se poseen del mundo físico, y que, con diferentes grados de credibilidad, pueden ser atribuidos al mensurando.*

Esto significa que las mediciones deben expresarse necesariamente en la forma:

$$y \pm U$$

Donde:

$y$  : Es el resultado más probable (es la mejor estimación del valor del mensurando).

$U$ : Es la incertidumbre de medida asociada al mismo. Cuanto menor sea  $U$ , más calidad tendrá el resultado de medida y más fácil será tomar decisiones.

### 6.1 Formas que puede tomar la incertidumbre:

La incertidumbre “ $U$ ” puede ser, por ejemplo, la semi-amplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado o una desviación típica (o un múltiplo de ella).

#### ***Cuando la Incertidumbre es el Error Absoluto Máximo:***

Resulta útil y posible en muchos casos, darle a la incertidumbre el valor de un “error absoluto máximo”. El error absoluto máximo de una medición (llamado también límite de error o imprecisión) es aquel que sumado (o restado) al resultado de la medición, *define con gran probabilidad (tan grande que puede considerarse certeza)* el valor máximo y mínimo dentro del cual estará contenido el grandor verdadero.

Si podemos concluir que  $E_x$  es el error absoluto máximo (también llamado error límite), entonces podemos expresar la medición como:

$$y \pm E_x$$

Por ejemplo si la medición de la capacidad de un condensador se expresa:

$$C = 1\mu F \pm 0,05\mu F$$

Siendo 0.05 el error absoluto máximo, significa que el valor de la capacidad resultará comprendido entre un máximo de 1.05  $\mu F$  y un mínimo de 0.95  $\mu F$  y no podrá servir como patrón de referencia en un laboratorio, pero si utilizable en aquellas aplicaciones prácticas en las que el citado margen no implique un funcionamiento irregular.

#### ***Cuando la Incertidumbre es la Desviación Típica:***

En ocasiones, por razones de naturaleza estadística, es conveniente expresar la incertidumbre de medida a través de una desviación típica utilizándose para ello la denominada incertidumbre típica “ $u$ ”.

$$y \pm u$$

La incertidumbre típica se calcula con un procedimiento estipulado en la “*Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*”, más conocida como **GUM** que veremos más



adelante en este curso, pero siempre lleva una probabilidad asociada, es decir, se acepta que existe una probabilidad de que el valor verdadero de una magnitud se encuentre dentro de  $y \pm u$ .

## 7. Conceptos Básicos sobre Instrumentos Analógicos y Digitales.

Como en todas las áreas de la ingeniería o de la física existen instrumentos llamados analógicos y otros llamados digitales.

### *Generalidades de los Instrumentos Analógicos.*

Los instrumentos analógicos son los instrumentos de aguja. Se llaman analógicos porque en este caso la aguja se mueve “análogamente” a la magnitud que se quiere medir, es decir, el resultado de la medida se representa mediante variables continuas, análogas a las magnitudes que estamos midiendo.



Los instrumentos analógicos presentan ventajas y desventajas entre las que podemos citar:

#### **Ventajas**

1. En algunos casos no requieren de energía de alimentación.
2. No requieren gran sofisticación.
3. Presentan con facilidad las variaciones cualitativas de los parámetros para visualizar rápidamente si el valor aumenta o disminuye.
4. Es sencillo adaptarlos a diferentes tipos de escalas no lineales.

#### **Desventajas**

1. Tienen poca resolución (es difícil medir variaciones pequeñas)
2. La exactitud está limitada a  $\pm 0.2\%$  a plena escala en el mejor de los casos.
3. Las lecturas se prestan a errores graves cuando el instrumento tiene varias escalas.
4. La rapidez de lectura es baja, típicamente 1 lectura/segundo.
5. No pueden emplearse como parte de un sistema de procesamiento de datos de tipo digital o conectarse a una computadora.

#### **Deflexión**

Se denomina así a la cantidad de divisiones o en algunos casos a la cantidad de grados en que se desvía la aguja indicadora sobre una escala de un determinado instrumento.

La deflexión se la suele denominar con la letra griega  $\alpha$ . La deflexión máxima será pues la máxima cantidad de divisiones o grados que tiene la escala de un instrumento ( $\alpha_{MAX}$ ).

#### **Alcance**

Se denomina así al valor máximo que puede medir el instrumento analógico.

**Lectura de un Instrumento Analógico:**

En general se observa la deflexión de una aguja dentro de una escala graduada, obteniéndose:

$$\text{Valor medido} = \text{divisiones deflectadas} \frac{\text{Alcance}}{\alpha_{MAX}}$$

**Constante de lectura:**

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

$$C_E = \frac{\text{Alcance}}{\alpha_{MAX}}$$

Ejemplo:

Si tenemos un instrumento con alcance 5 A y un máximo de 100 divisiones, la constante de lectura será:

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

Cuando la aguja deflexiona una cantidad cualquiera  $\alpha$ , la magnitud que está midiendo será:

$$X_{medido} = C_E \alpha$$

**Error en un Instrumento Analógico:**

El error absoluto máximo cometido por un instrumento analógico puede calcularse como:

$$E_X = \frac{\text{Clase} \cdot \text{Alcance}}{100}$$

Donde:

$E_X$ : Error absoluto máximo cometido por el instrumento.

Clase: es un número que da el fabricante en el frente del instrumento. Las clases típicas son:

- Para instrumentos de laboratorio: 0.2 y 0.5
- Para instrumentos de tablero: 1 y 1.5
- Para instrumentos de campo: 2, 2.5 o 5

Si no se encuentra este número identificador significa que el fabricante no garantiza la clase del instrumento. Veremos en el Capítulo Teoría de Errores, que existe la posibilidad de determinar la clase a través de un método de medida denominado “contraste de instrumentos”.

**Rango de medida:**

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

$$\text{rango de medida} = \alpha_{MAX} - \alpha_{MIN}$$

Cuando el instrumento responde a una ley de deflexión lineal (por caso el instrumento de imán permanente y bobina móvil, con campo radial y uniforme), la escala será lineal si se trata de la aplicación como amperímetro o voltímetro. En este caso el rango de medida será coincidente con el alcance del instrumento a excepción que se trate del instrumento “lupa de tensión” que analizaremos posteriormente.

En el caso de los instrumentos cuya ley de deflexión es del tipo cuadrática, (hierro móvil, electrodinámico) la escala será lineal por cuanto el fabricante mediante dispositivos constructivos tratará que sea así. No obstante esto, siempre en el inicio de la escala se produce invariablemente una contracción de la misma y la imposibilidad de su correcta calibración (aproximadamente entre un 10 a un 20% del alcance). Este es el caso del amperímetro electrodinámico que se ilustra a continuación:

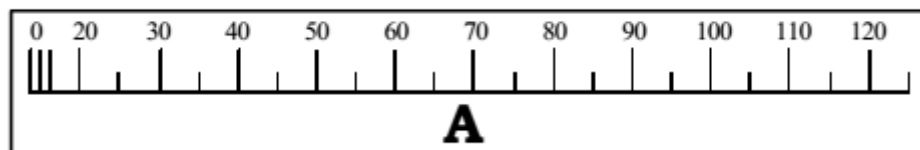


Figura 7.1: Escala de un amperímetro con rango de medida de 105 divisiones

Para el cuadrante del amperímetro que se ilustra en la figura 15.1, el rango será de 105 divisiones.

También se puede definir como el margen de valores de la magnitud de medida, en el que el instrumento se atiene a los límites de error definidos por la clase correspondiente (en el Capítulo “Teoría de Errores”, veremos en detalle el concepto de clase de un instrumento).

### ***Margen de indicación***

Se define así a toda la escala del instrumento. (125 divisiones para el caso de la figura 7.1)

### ***Sensibilidad***

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

Si un instrumento (ejemplo el de imán permanente y bobina móvil) tiene una ley de respuesta lineal (curva 1 de la figura 16.1) gráficamente se demuestra que para el mismo incremento de corriente corresponde siempre el mismo incremento de desviación, de modo que la relación entre ambos incrementos (sensibilidad) se mantiene constante.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta I}$$

Por otra parte, en un instrumento no lineal (curva 2 de la figura 7.2) se ve que la sensibilidad cambia con el valor de la corriente medida.

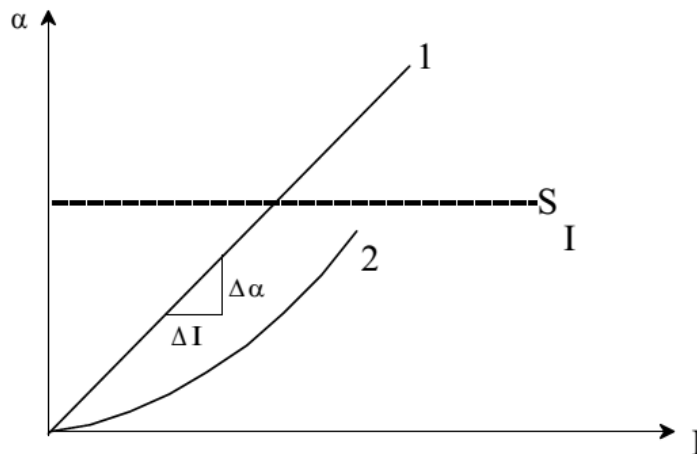
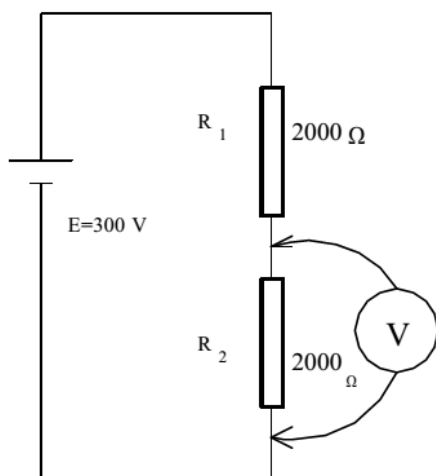


Figura 7.2: Escala lineal o no lineal de un instrumento.

**Consumo propio:**

Es la potencia absorbida por el instrumento necesaria para provocar su propia deflexión. El consumo propio es importante tenerlo en cuenta en mediciones de alta exactitud, pues es capaz de producir notables distorsiones en las lecturas.

Veamos un ejemplo sencillo en la medición de tensión en el circuito de la figura 7.3. El voltímetro - de resistencia interna igual a  $R_2$  - dará una lectura igual a 100 V con un error del 33% en defecto.



El consumo propio expresado en unidades de potencia será:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Es evidente que cuanto mayor será  $R_v$  (resistencia del voltímetro) -en el caso ideal igual a infinito- tanto menor será la potencia de consumo y por ende el error de inserción.

Figura 7.3: Medición directa de una tensión.

Similar demostración puede hacerse en el caso de medición de corriente:

$$P = I^2 R_a$$

Para el caso del amperímetro su resistencia interna  $R_a$  debería ser mínima, en el caso ideal igual a cero.

En algunos catálogos de instrumentos el consumo propio suele estar expresado en la caída de tensión que provoca la inserción del amperímetro cuando por el circuito circula una corriente

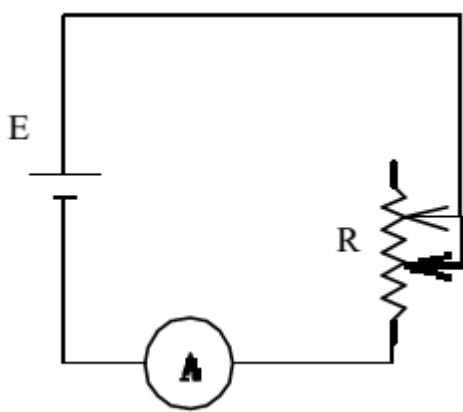


igual al alcance del instrumento. Para el voltímetro el consumo estará expresado en la corriente que circula por el instrumento cuando entre sus bornes se aplica una tensión igual al alcance. Valores orientativos de consumo propio de acuerdo al tipo de instrumentos, son los siguientes:

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

### ***Resolución de un Instrumento Analógico:***

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



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

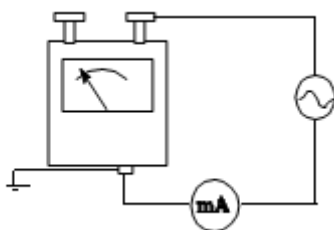
### ***Sobrecarga***

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

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

### ***Tensión de Prueba***

Determina la resistencia a tensiones eléctricas de un aislamiento entre las conexiones y la caja.



La prueba se hace con tensión alterna de 50 Hz. Consiste en aplicar una tensión (por ejemplo 2000 V) entre uno de los bornes y la caja que lo contiene. Si el fabricante garantiza que si aplicamos una tensión alterna de 2000 V a 50 Hz y no circula más de un miliampere de corriente de fuga, entonces ese instrumento tiene una tensión de prueba de 2000 V.

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

| Tensión nominal del instrumento | Tensión de prueba |
|---------------------------------|-------------------|
| Hasta 40 V                      | 500 V             |
| 40 hasta 650 V                  | 2.000 V           |
| 650 hasta 1.000 V               | 3.000 V           |
| 1.000 hasta 1.500 V             | 5.000 V           |
| 1.500 hasta 3.000 V             | 10.000 V          |
| 3.000 hasta 6.000 V             | 20.000 V          |
| 6.000 hasta 10.000 V            | 30.000 V          |
| más de 15.000 V                 | 2,2 Un +20.000 V  |

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

### ***Generalidades de los Instrumentos Digitales.***

En el instrumento digital o numérico el proceso de la medición proporciona una información discontinua expresada por un número de varias cifras. La escala clásica de indicación continua, es reemplazada por la escala numérica de indicación discontinua, en la cual las cifras alineadas a leer indican directamente el valor numérico del valor medido; la indicación numérica se presenta a lo largo del tiempo con un ritmo predeterminado.



Los instrumentos digitales presentan ventajas y desventajas entre las que podemos citar:

#### **Ventajas**

1. Tienen alta resolución intrumental alcanzando en algunos casos más de 9 cifras.
2. No están sujetos al error de lectura.
3. Pueden eliminar la posibilidad de errores por confusión de escalas.
4. Tienen una rapidez de lectura que puede superar las 1000 lecturas por segundo.
5. Presentan alta impedancia de entrada (modifican poco el circuito al que se conectan).
6. Pueden poseer conmutación automática de escala.
7. Puede entregar información digital para procesamiento inmediato en computadora.

**Desventajas**

1. Son complejos en su construcción.
2. Las escalas no lineales son difíciles de introducir.
3. En todos los casos requieren de fuente de alimentación o pilas.

De las ventajas y desventajas anteriores puede observarse que para cada aplicación hay que evaluar en función de las necesidades específicas, cual tipo de instrumentos es el más adecuado, con esto se enfatiza que no siempre el instrumento digital es el más adecuado siendo en algunos casos contraproducente el uso del mismo.

Los instrumentos digitales tienden a dar la impresión de ser muy exactos por su indicación concreta y sin ambigüedades, pero no hay que olvidar que si su calibración es deficiente, su exactitud puede ser tanta o más mala que la de un instrumento analógico.

***Rango:***

Se denomina así al valor máximo que puede medir el instrumento digital.

***Error en un Instrumento Digital:***

Para determinar el error absoluto límite de un instrumento digital existen varias expresiones, pero la más difundida por la mayoría de los fabricantes puede resumirse a:

$$E_X = p + m$$

Donde

p: es un porcentaje del valor que se está midiendo, indicado en la pantalla

m: es una constante para la escala seleccionada que da el fabricante en el manual del instrumento.

***Número de Dígitos:***

Se denomina así al número máximo de dígitos que es capaz de mostrar el indicador numérico del instrumento digital.

***Dígito de Sobrerrango o Medio Dígito:***

Se denomina así al dígito que solo puede tomar los valores “0” o “1”.

***Sensibilidad de un Instrumento Digital:***

Es el valor del dígito menos significativo en el rango correspondiente. Por ejemplo: Un instrumento de 3 dígitos y medio en el rango de 200V puede detectar cambios de 0.1V. Por lo cual, esa es su sensibilidad (0.1V).

***Resolución un Instrumento Digital:***

La resolución de un instrumento digital suele expresarse sin unidades. Es la sensibilidad expresada sin unidades. Por ejemplo 0.1%.

### Función Hold:

La mayoría de los instrumentos digitales ofrecen la posibilidad de retener la lectura máxima cuando su valor es estable.

### Utilización del Multímetro

El primer instrumento digital que usaremos es un multímetro como el que se muestra en la siguiente figura. A modo de introducción, sus principales partes y funciones son:

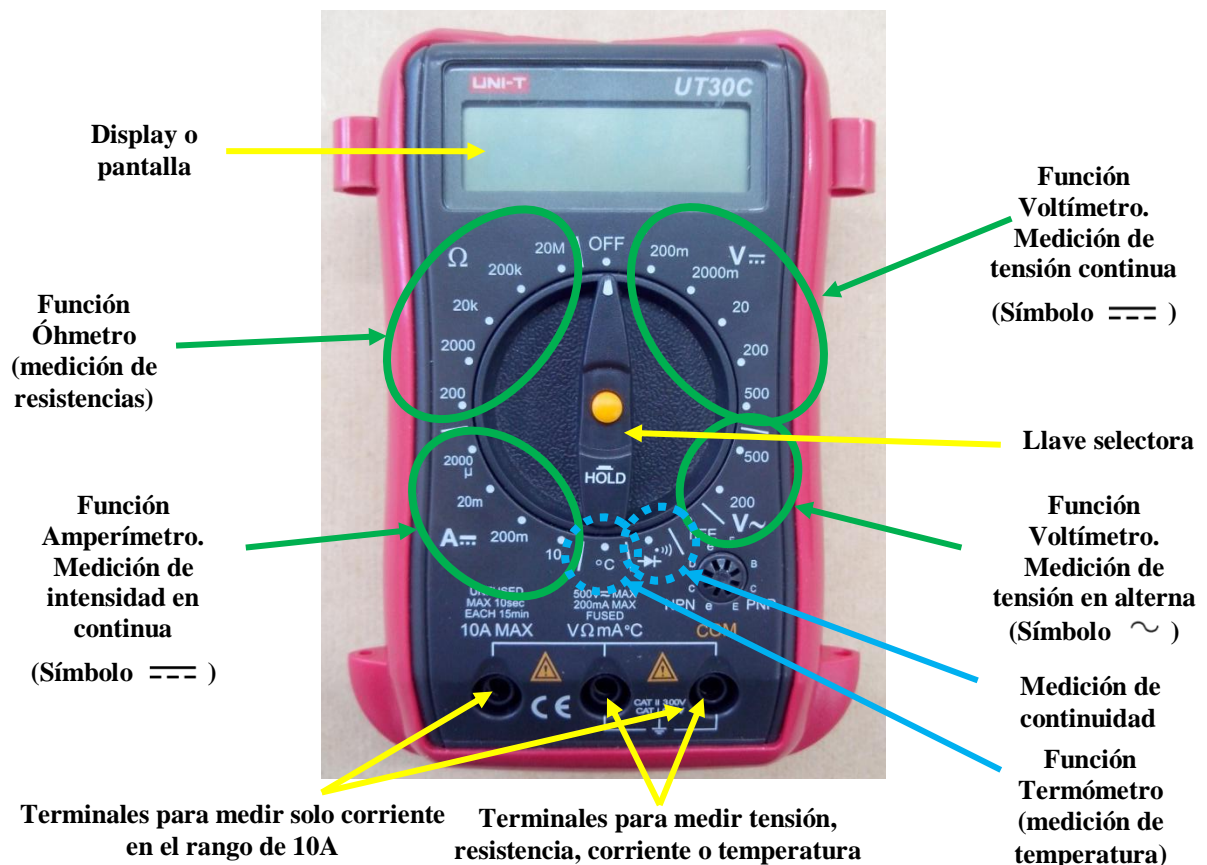


Figura 7.4: Multímetro utilizado en el Laboratorio de Medidas Eléctricas. Indicación de sus principales partes y funciones.

## 8. Simbología.

Los instrumentos utilizados en medidas eléctricas pueden clasificarse de distintas formas:

- Por el principio de funcionamiento: De acuerdo con el principio de funcionamiento encontraremos instrumento denominados:
  - Electromagnéticos (como los de imán permanente y bobina móvil, imán móvil, hierro móvil),
  - electrodinámicos, electrostáticos, inducción, etc.
  - Digitales.

- b) Por el tipo de corriente que lo acciona. De corriente continua o alterna, de ambas corrientes.
- c) Por la exactitud.

***Símbolos de Representación de los Instrumentos en un Diagrama de Circuitos:***





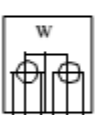




|   |   |
|---|---|
|    | Instrumento de medida, representación general                                   |
|    | Sistema de medida de indicación general   |
|    | Sistema de medida, de indicación con desviación de índice a ambos lados         |
|    | Instrumento de medida, amperímetro  |
|   | Vatímetro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

Tabla III: Símbolos de instrumentos para ser utilizados en un diagrama.

***Símbolos Ubicados en el Frente de los Instrumentos Analógicos:***

En las tablas siguientes aparecen los símbolos que normalmente se encuentran ubicados en el cuadrante de un instrumento analógico. Estos símbolos ayudan a identificar al instrumento por el tipo de grandor que mide, por el principio de funcionamiento, su posición de trabajo, su clase (índice de exactitud), tensión de prueba, etc.

| Símbolo   | Instrumento                    | Aplicaciones                        |
|---|--------------------------------|-------------------------------------|
|  | Imán permanente y bobina móvil | amperímetros, voltímetros, óhmetros |












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

Tabla IV: Símbolos de instrumentos agrupados por su principio de funcionamiento.

Símbolos vinculados a su construcción y forma operativa:

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

Tabla V: Símbolos de instrumentos agrupados por su exactitud y campo de uso.






















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

Tabla VI: Símbolos de instrumentos agrupados por su construcción.

|   |  |
|---|--|
|  | Posición de trabajo vertical (instrumentos de tablero)                 |
|  | Posición de trabajo horizontal   |
|  | Posición de trabajo inclinada con indicación del ángulo de inclinación |

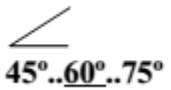
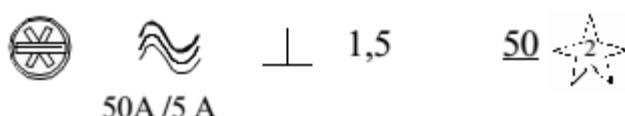
|   |  |
|---|--|
|  | Posición de trabajo inclinada con un campo nominal de uso de 45° a 75° (campo nominal de referencia 60°) |
|---|--|

Tabla VII: Símbolos de instrumentos agrupados por su posición de trabajo.

Ejemplo:

Supongáse que en un fasímetro se encuentra en la parte inferior del cuadrante los siguientes símbolos dibujados:



La interpretación de los mismos es la siguiente:

Instrumento electrodinámico del tipo cocientímetro (o logómetro) con núcleo de hierro, para corriente trifásica con un solo elemento de medida, de posición de trabajo vertical, clase 1.5, frecuencia de utilización 50 Hz, con conexión a un transformador de corriente de 50/5 A, y tensión de prueba de 2 kV.

## Bibliografía.

Patrones Nacionales. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Disponible a febrero de 2019 en el sitio web [www.inti.gob.ar/metrologia/](http://www.inti.gob.ar/metrologia/).

Medidas Eléctricas. Segunda Edición. Juan Antonio Suárez. Marzo 2006. Número ISBN 950-43-9807-3.

Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos Fundamentales y Generales, y Términos Asociados (VIM). JCGM 200:2008. Primera versión en español, 2008.

Instituto Nacional de Calidad (INACAL). Perú. Disponible a febrero de 2019 en el sitio web [www.inacal.gob.pe/metrologia/](http://www.inacal.gob.pe/metrologia/).