



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL ROSARIO  
DEPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA**

## **CATEDRA DE INTEGRACIÓN II**



## **SISTEMAS DE UNIDADES**

# SISTEMAS DE UNIDADES

## 1. PROCESOS DE MEDICIÓN

La física es una ciencia experimental. Estudia los procesos del mundo físico y establece un cierto número limitado de leyes con las cuales se puede explicar la mayor variedad posible de los fenómenos observados y predecir el resultado de experiencias nuevas. Que sea ciencia experimental significa que los fenómenos en análisis deben **observarse y medirse**. Cualquier aseveración en física, la cual no sea comprobable experimentalmente, carece de sentido.

Vamos a analizar el **proceso de medición**: proceso fundamental para la ingeniería. El proceso de medición es un proceso físico, una operación física experimental, en la que intervienen necesariamente tres sistemas:

- El sistema objeto al cual queremos medir.-
- El sistema de medición o aparato de medición.-
- El sistema de comparación, que definimos como unidad, y que suele venir unido o estar incluido en el aparato o instrumento de medición.

Por ejemplo: en el llamado “medición de longitud” interviene:

- El objeto cuya medición queremos medir.-
- El instrumento, por ejemplo, una regla.
- La unidad (cierta escala marcada en la misma regla, o en cierta barra patrón).

Para definir unívocamente el proceso de medición es necesario dar además la técnica mediante la cual deben ponerse en interacción el sistema objeto, el aparato de medición y la unidad. En particular, el proceso físico correspondiente a esta técnica, realizado entre el aparato de medición y la unidad, se denomina “calibración” del aparato.

Por ejemplo: la técnica para medición de longitudes sería: tómesese un cierto instrumento denominado regla, en la que están marcadas ciertos números de divisiones; hágase coincidir la primera división de la regla con el extremo del objeto cuya longitud se quiere determinar; determínese la división que coincide con el otro extremo del objeto. Por otra parte, realícese el mismo procedimiento con el objeto que se definió como unidad (calibración de la regla).

Medir temperaturas significa: tomar un instrumento llamado termómetro, ponerlo en contacto térmico con el sistema que queremos medir, esperar que se establezca el equilibrio térmico, medir la longitud de la columna de mercurio, etc...

Medir el peso de un cuerpo significa: tomar el cuerpo, ponerlo sobre el platillo de un instrumento llamado balanza, colocar pesos unidad en el otro platillo hasta equilibrar la balanza, leer el número de pesos unidad.

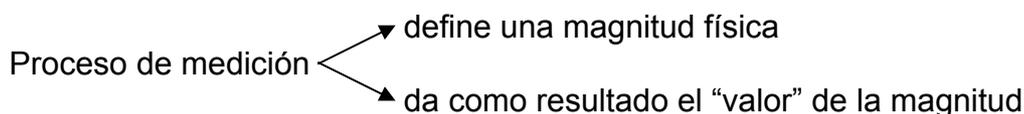
Cada proceso de medición define lo que se llama una **magnitud física**. Estas últimas están unívocamente determinadas por el proceso de medición. Por ejemplo, se define como “longitud” aquello que se mide en el proceso descrito como “medición de longitud”. “Peso” es aquello que se mide con el proceso físico

denominado “pesar un cuerpo”. Esto podría parecer trivial; sin embargo, es importante notar que no hay otra forma de definir una magnitud física mas que por la descripción del proceso de medición en si. En otras palabras, el concepto físico primario es el del proceso de medición, y no el de la magnitud física.

Hay muchos procesos de medición que definen una misma magnitud. Por ejemplo, hay muchas formas de medir una longitud. Son procesos de medición equivalentes.

El resultado de un proceso de medición es un número real, que se llama **valor de la magnitud** en cuestión. Se lo interpreta intuitivamente como el “numero de veces que la unidad esta contenida en la magnitud en cuestión”. Dos objetos tienen una cierta magnitud dada igual cuando el resultado del proceso de medición (que define la magnitud en cuestión) aplicada a ambos objetos es el mismo, o sea cuando se obtiene el mismo valor numérico.

Tenemos en resumen dos conceptos definidos a partir del proceso de medición:



La **suma** de dos magnitudes (de igual tipo, por supuesto) debe definirse como un proceso físico. Por ejemplo, la longitud “suma” de las longitudes de dos varillas, es la longitud del sistema que se obtiene alineando las dos varillas en fila, una a continuación de la otra, haciendo coincidir el extremo de una con el principio de la otra, en forma paralela. Una magnitud física es “**genuina**” cuando el valor de la magnitud suma es la suma de los valores de las magnitudes originales. Esto no es trivial. Si ello no sucediera, la magnitud en cuestión no es una magnitud física genuina. Por ejemplo, la temperatura no es aditiva. Si quisiéramos definir la operación “suma” de temperaturas como proceso físico (juntando dos cuerpos de temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  y esperando que se establezca el equilibrio térmico), vemos invariablemente que el valor numérico de la temperatura del sistema final o suma, no es la suma de los valores  $T_1 + T_2$ .

El valor de una magnitud dada es independiente del proceso particular de medición, dependiendo solo de la unidad elegida. Como esta unidad, en principio, es arbitraria y se fija por convención, es necesario añadir un símbolo al valor numérico de una magnitud dada, para indicar cual unidad se ha utilizado como comparación. por ejemplo, se escribe “1 m”, “10 pies”, “25 seg.”, etc. Decir que una longitud es de “2,5” no tiene sentido físico, si no se indica la unidad de referencia.

## 2. DIMENSIONES

Una dimensión es una unidad generalizada. Todo lo que se puede medir en unidades de masa tiene dimensiones de masa (**M**). Análogamente la longitud se mide en función de unidades que tienen la dimensión **L**, etc. Se puede definir una nueva dimensión si se dispone de la ley física que la forma, por ejemplo se puede definir fuerza (**F**) en función de la masa y la aceleración a través de la segunda ley de Newton.

$$F = m \cdot a$$

Las dimensiones serán:  $[F] = [M] \cdot [L] \cdot [\theta]$

### 3. MEDICIÓN DE MAGNITUDES

En los estudios de las operaciones y procesos de la Ingeniería Química se necesitan llegar a estudiar fórmulas matemáticas que definen el proceso. Estas expresiones matemáticas que relacionan a las magnitudes son las ecuaciones funcionales del fenómeno y representan leyes naturales o convenciones. Para expresar la cantidad de todas las magnitudes posibles no es necesario disponer más de unas pocas unidades, basta con tomar unas pocas magnitudes como fundamentales, fijando arbitrariamente la cantidad de cada una que fijemos como unidad.

En los sistemas mecánicos normalmente son suficientes tres magnitudes (que pueden ser longitud, masa o fuerza y tiempo). Partiendo de esas magnitudes fundamentales se pueden definir otras que denominaremos como derivadas (como por ejemplo, velocidad, aceleración, presión, trabajo, energía, etc.).

Cuando cambiamos de unidad, el valor numérico de la misma magnitud cambia. Esto lo que se denomina **cambio o conversión de unidades** y es necesario conocer las reglas de transformación para los valores numéricos de las magnitudes.

### 4. SISTEMAS DE UNIDADES

#### 4.1. HISTORIA DE LAS UNIDADES.

Las diferencias de los sistemas de pesos y medidas utilizados por los distintos países generaba (y aun genera) confusiones y equivocaciones en el tráfico comercial que se realizaba. Irlanda, Liberia, Birmania y las ex colonias inglesas todavía tienen su propio sistema de medición, que entre los británicos tiene una tradición de 800 años. En realidad, Gran Bretaña se incorporó oficialmente al **Sistema Métrico Decimal** en 1995, pero lo oficial no siempre coincide con lo real. Por ejemplo, mantienen las distancias de los carteles indicadores de las carreteras en millas. En Irlanda la reconversión marcha a un ritmo más lento, aunque las carreteras ya tienen carteles indicadores en kilómetros y la nafta se vende en litros. No obstante comidas y bebidas se venden indistintamente en el sistema métrico y el inglés. Respecto a la temperatura, en Estados Unidos se sigue midiendo en grados Fahrenheit, como así también la electricidad tiene un voltaje de 110 voltios y 60 ciclos, mientras que en la Argentina se trabaja con 220 voltios y 50 ciclos. Otras diferencias se dan con las grandes cifras: el número 1.000.000.000, que para nosotros sería mil millones para los estadounidenses es un billón, nuestro billón es el trillón de ellos y así sucesivamente.

Las antiguas unidades normalmente se fijaban arbitrariamente, por ejemplo la tradición indica que la pulgada (2,54 cm.) correspondería a la medida tomada desde la uña a la base del pulgar del rey David I; el pie (30,48 cm.) sería la medida del largo del pie de Carlomagno; la yarda (91,44 cm) sería la medida desde el hombro

hasta la punta de los dedos del rey Enrique I de Inglaterra; la milla provendría de los "Mille Passum" o los mil pasos que podía dar un soldado romano (un paso correspondía a 1,61 m, por lo que la milla es 1,61 km); la legua era el radio de la máxima visión en un terreno plano; el acre, la superficie arable en una mañana; etc. Estas medidas definidas arbitrariamente tenían el problema de reproducirlas en cualquier momento, por lo cual se indujo a definir las, pero a veces se hacía en forma muy imprecisa, como lo indica estos ejemplos: "la pulgada es la longitud de tres granos de cebada tomados desde la mitad de la espiga" (Estatuto inglés); "para determinar la longitud de una vara en forma recta y legal y de acuerdo a los usos científicos, debe reunirse a la salida de la Iglesia en día domingo, una vez terminado el oficio religioso, a 16 hombres de la concurrencia, altos y bajos y alinearlos con sus respectivos pies izquierdos unos a continuación de otros; la longitud obtenida es la recta y legal vara para medir la tierra, y su décima parte, la recta y legal longitud del pie" (definición de Köbel, 1514).

Como los patrones o modelos de las unidades de medida no se podían determinar con precisión, dado su carácter convencional, eran protegidos de las adulteraciones fraudulentas y normalmente se confiaba su custodia a los sacerdotes o se esculpían en los basamentos de algunos monumentos (por ejemplo en Roma, en la estatua de Vespasiano y en Londres, en la de Nelson se grabó la longitud de la yarda). También se acostumbraba a fijar los de longitud, por la distancia entre dos garfios de hierro empotrados en los muros de la ciudad.

Como es de imaginar, la variedad de medidas utilizadas, aun dentro de un mismo territorio dificultaba el intercambio comercial que estaba expuesto a toda clase de engaños, por la ignorancia de sus equivalencias. En todos los países se producía este fenómeno; así, por ejemplo, en Francia, en la Edad Media, había unas 200 medidas impuestas por los señores feudales en sus respectivos territorios y en España, cada región y aun cada pueblo, tenía su vara, su libra, etc.

A pesar de estas unidades de medidas convencionales y que variaba de acuerdo a cada civilización, en la antigüedad se pudieron realizar mediciones con bastante exactitud, como por ejemplo la determinación del radio de la Tierra realizada por Eratóstenes 200 años antes de Cristo. Su método, aunque muy simple, muestra un alto grado de visión e ingenuidad. Las bases de la técnica de Eratóstenes descansan en la comprensión de que a causa de que la distancia entre la Tierra y el Sol es tan grande, comparada con el tamaño de nuestro planeta, de que los rayos del Sol que llegan a la Tierra son prácticamente paralelos. Desde luego, el Sol debía estar a una distancia infinita para que los rayos fueran exactamente paralelos, pero la divergencia es tan pequeña que para fines prácticos es insignificante.

Eratóstenes vivió en Alejandría, Egipto. Había aprendido que en el primer día de verano, en la ciudad de Siene (actualmente Asuan), a unos 5000 estadios al sur de Alejandría, el Sol de mediodía estaba directamente sobre su cabeza. (Un estadio era una unidad griega de longitud, que se cree que era igual a cerca de 1/6 de km) La posición del Sol sobre la cabeza era aparente, porque los profundos pozos de Siene eran iluminados en toda su longitud hasta el fondo, y un palo vertical no producía sombra a medio día.

No obstante, en Alejandría, unos 800 km al norte, Eratóstenes observó que un palo vertical producía sombra a la mitad del día, con una longitud de 1/8 de la del palo. Esto corresponde a un ángulo de  $7,1^\circ$  entre los rayos del Sol y la vertical (ver

**Figura 1).** Dado que las líneas que se extienden a través del pozo en Siene y a través de la vertical del palo en Alejandría se interceptan en el centro de la Tierra, la distancia angular entre estas locaciones es también 7,1°.

Entonces, Eratóstenes razonó que la longitud del arco de 800 km era al ángulo de 7,1° como la circunferencia total de la Tierra era a 360°, el número de grados en un círculo completo. Esto es, en forma de relación,

$$\text{Circunferencia de la Tierra}/360^\circ = 800 \text{ km}/7,1^\circ$$

Por lo que:

$$\text{Circunferencia de la Tierra} = 360^\circ \times 800 \text{ Km}/7,1^\circ = 40.600 \text{ Km}$$

El radio de la Tierra (**R**) se puede calcular con facilidad a partir de la circunferencia (**C**), dado que:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot R$$

$$R = \frac{C}{2 \cdot \pi} = \frac{40.600 \text{ km}}{2 \cdot \pi} = 6.462 \text{ Km}$$

Esto está muy cerca del valor actual de 6378 km para el radio ecuatorial de la Tierra. No se puede estar seguro de la exactitud del resultado de Eratóstenes debido a los diferentes estadios griegos de varias longitudes que estaban en uso en aquel tiempo. (Puede darse cuenta por qué es importante el tener unidades estándar.) Aún así, su método era sólido, y la circunferencia de la Tierra se midió hace ya más de 2000 años.

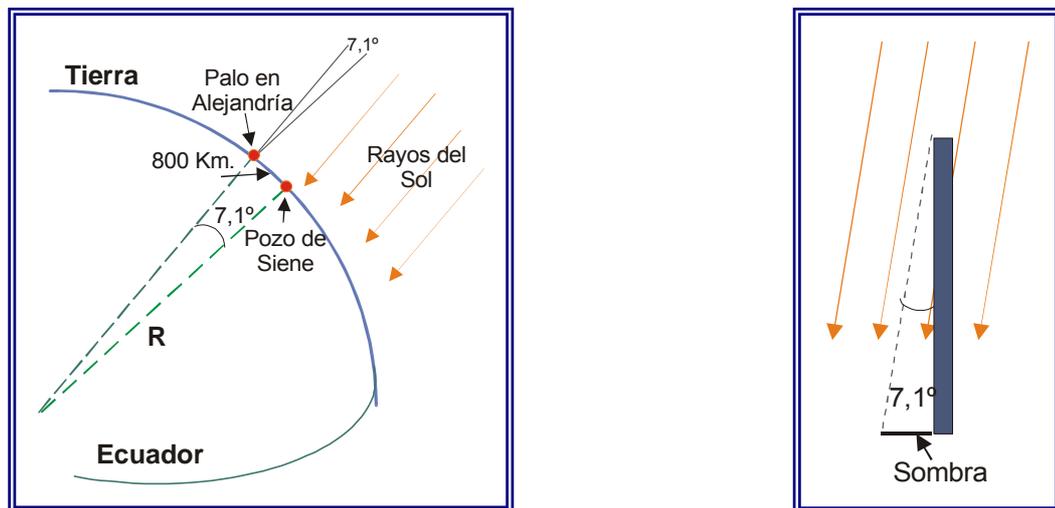


Figura 1

## **4.2. EVOLUCIÓN DE LAS UNIDADES EN EL TIEMPO**

### **PRIMERAS SOCIEDADES SEDENTARIAS**

La armonización de las medidas es un proceso que no ha parado desde que el hombre existe. Los primitivos sistemas de unidades se orientaron hacia la definición de unas cantidades de referencia, simples e impuestas por el desarrollo de dicha sociedad.

Mientras las grandes distancias se definían por el número de días o lunas que debían pasar antes de alcanzar el objetivo, las primeras unidades de medida de longitud para espacios más cortos poseían un origen antropomórfico, el hombre ponía como referencia su propio cuerpo y medía el mundo que le rodeaba en dedos, palmos, pulgadas, pies, pasos, codos, etc. Con dichas unidades construían su sociedad y mantenían unas transacciones comerciales.

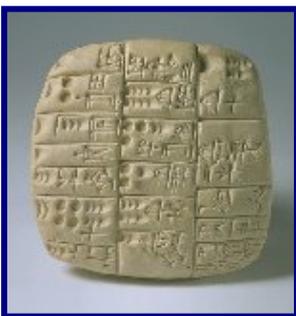
Las primeras sociedades sedentarias construían sus casas, sus templos y obras públicas basándose en sistemas de medida establecidos por los personajes más influyentes.

### **MESOPOTAMIA**

Es en esta región donde aparece por primera vez una administración política, militar y religiosa para administrar estas nuevas estructuras complejas que son las ciudades. Es en la Mesopotamia, precisamente en Uruk, alrededor de 3100 a.C., que la escritura, hizo su aparición por primera vez en el mundo; escritura pictográfica en un primer tiempo, "dibujando" los elementos del mundo real. Con el desarrollo de las regiones, la escritura cuneiforme hará también su aparición.

### **Escritura cuneiforme.**

Un gran avance en la escritura cuneiforme de los sumerios supone la introducción de un sistema numérico posicional, que simplificó enormemente los cálculos. Uno de los primeros vestigios de una unidad de longitud es el de una estatuilla Caldea que se encuentra en el Museo del Louvre.



Representa al Príncipe sumerio Gudea de la ciudad de Lagash (denominada "El arquitecto") que data de 2130 a.C. En dicha estatuilla se hace presente una regla graduada.

En la Mesopotámia, sumerios y babilonios, emplearon sistemas sexagesimales y decimales. Las principales unidades en Babilonia eran el **codo** (longitud aproximada: 50 cm), el **qa** (volumen = 144ª parte del codo cúbico, aproximadamente: 840 cm<sup>3</sup>) y la **mina** (peso de volumen de agua de la 240ª parte del codo cúbico aproximadamente: 50 Nw). Un sistema completo de unidades, múltiplos y submúltiplos que, como se aprecia, tiene su base fundamentada en la unidad de longitud (codo).

## **CULTURA EGIPCIA**

En el antiguo Egipto (aproximadamente en el 3<sup>er</sup> milenio a.C.) el sistema utilizado era en base decimal, pero, contrariamente a las civilizaciones antes citadas, desconocían la notación de posición, lo que obligaba a repetir los símbolos tantas veces como resultaba preciso para representar la cifra. En la cultura egipcia también se emplearon múltiplos y submúltiplos pero no se hizo de forma sistemática en las diferentes magnitudes.

### **Escritura Jeroglífica**

Unidad de medida: **AunaAsí**, de la unidad de longitud, el **codo** (auna faraónica o cúbito egipcio) definido como la longitud del antebrazo del faraón; derivaban múltiplos decimales como la **vara** (100 codos), y submúltiplos sexagesimales como el **palmo** (6ª parte del codo). Los egipcios utilizaban dos codos: el **codo real** o codo grande (0,525 m), y el **codo pequeño** (0,450 m). Dichas unidades las esculpieron en piedra (hasta 1500 a.C.) y en madera (entre 1500 - 700 a.C.), practicándoles un filo biselado.

## **CULTURA GRIEGA Y ROMANA**

En el período que se extiende desde el siglo V a.C. hasta el siglo III d.C. se caracteriza por importantes acontecimientos políticos en los pueblos mediterráneos que influyeron decisivamente en su desarrollo cultural, económico y social.

La Ciencia Helénica no se desarrolló de igual forma en todas las disciplinas. Los griegos consiguieron avances importantes en medicina, matemática e historia natural pero no prestaron igual atención a la física, a excepción de la astronomía y geografía matemática que tuvo gran desarrollo en Alejandría durante el período helenístico.

Los griegos utilizaron también atributos del cuerpo humano para medir, el **estadio griego** equivalía a 100 **pasos dobles** (aprox. 600 pies). Durante la dominación romana, éstos impulsaron de forma muy notable la construcción y las obras públicas, sentando, además, las bases de la ciencia jurídica, pero la matemática y las ciencias naturales continuaron siendo patrimonio griego durante el imperio romano, alrededor de Alejandría cuyo museo y biblioteca constituyeron el foco emisor de los conocimientos científicos.

Los romanos utilizaron como unidad de longitud el **codo romano** (cubitus o ulna), equivalente a 0,4436 m; si bien la concatenación de medidas se hacía mediante yuxtaposición de cifras ya que no existía la notación de posición en dichas cifras.

Nuestras cifras actuales representando los números dígitos, se derivan de las cifras árabes, que, a su vez, ya fueron diferenciadas, como tales símbolos, en India en los primeros siglos de la era cristiana. La utilización de notación esencialmente decimal y de posición, con las cifras indias, se puede fijar a principios del siglo VII de nuestra era.

La herencia europea del imperio romano fue muy lentamente sustituida por las cifras árabes. El declive a partir del siglo III y posterior caída del imperio romano en Occidente, dio lugar a un confusionismo en la utilización de las unidades básicas de pesas y medidas.

En la siguiente Tabla se muestra los símbolos que adoptaron las distintas civilizaciones para los números.

	1	2	3	5	10	20	21	50	100	500	1000	10000
Babilónica	∟	∟∟	∟∟∟	∟∟∟ ∟∟	<	<<	<<∟	<<< <<	∟∟			
Egipcia (Jeroglífica)	I	II	III	III II	∧	∧∧	I∧∧	∧∧∧ ∧∧	ϩ	ϩϩϩ ϩϩ	ϩϩϩ ϩ	∟
Griega	I	II	III	Γ	Δ	ΔΔ	ΔΔI	Ϟ	II	Ϟ	X	M
Romana	I	II	III	V ∅ ∧	X	XX	XXI	L ∅ ↓	C, D ∅ ∅	D, C D, C	CD, CC M ∅ ∅	(CD)

## EDAD MEDIA

A finales del siglo VIII, Carlomagno (reinado 771 - 814) trató de unificar medidas. Estableció un patrón de longitud de unos 325 mm (pie del rey), pero esta tentativa desapareció con su imperio.

A las unidades romanas se añadieron las de los bárbaros, los pueblos nórdicos dejaron su legado alcanzándose tal diversidad de medidas que resultaba frecuente encontrar unidades específicas, sin relación entre ellas en una misma población.

En el Reino Unido las medidas de longitud, datadas, se remontan a una muy antigua, el **codo nórdico** (aprox. 26,6 pulgadas, algo superior a los pies actuales), probablemente derivaba de los patrones de Mesopotamia y Egipto. También se empleó el **pie nórdico** (aprox. 13,2 pulgadas), de origen hindú, a partir de la llegada de los sajones en el año 410. A partir del siglo XI, coincidiendo con el apogeo de la influencia islámica, se inicia en Europa una etapa de progreso técnico que se mantiene durante toda la Edad Media y que fundamenta los cimientos para el resurgir tecnológico que vendría con el Renacimiento. Los árabes dejaron en España significativos adelantos relacionados fundamentalmente con la navegación y la astronomía (el astrolabio plano, el astrolabio esférico o la azafra son ejemplos de

instrumentos utilizados para determinar la latitud). En los "Libros del Saber de Astronomía", redactados durante el reinado de Alfonso X el Sabio (1252 - 1284), se estudian gran parte de estos instrumentos de la época.

## **RENACIMIENTO**

El desarrollo de la sociedad en los siglos XV y XVI ve el nacimiento de ciudades muy importantes e independientes entre sí que, en combinación con la necesidad de un intercambio comercial entre ellas exigió concretos sistemas de pesar y medir. Los gremios habían alcanzado por entonces un protagonismo en la vida económica de las ciudades de Europa. Estas asociaciones gremiales agrupaban a los artesanos en oficios y artes, dándoles poder en la vida social al tener prerrogativas como la fijación de precios o admisión de nuevos miembros. Los instrumentos de medida estaban en poder de estos gremios pero los innumerables sistemas de medida seguían complicando las transacciones comerciales. El Renacimiento no solo fue un renacer de las artes, de las letras o las costumbres sino que también fue un renacer en lo científico. Mientras en las artes se miraba con otros ojos para realzarla en los más bellos estilos, en lo científico se ponían las bases. Y a partir del siglo XVI, diversos científicos y pensadores formularon propuestas para la unificación de un sistema de unidades, basado en patrones naturales y universales, con el objeto de abandonar definitivamente los instrumentos y patrones en uso a los que atribuían un marcado carácter específico, localista y efímero.

## **EDAD MODERNA**

Debido a esto, la Revolución Francesa, que quiso llevar el racionalismo al mundo, comenzó a propugnar un patrón universal para las medidas, pero esto llegó casi un siglo después, en 1875 cuando en París se firmó el tratado del Sistema Métrico, tomándose el metro como patrón, que equivale a la cuarenta millonésima parte del meridiano terrestre que atraviesa París. El metro, como tal, estaba representado por una tira de platino iridiado sostenido por una barra de acero en forma de **X**. Para hacerlo más exacto, en 1906 se estableció el metro como la 1.650.763,73 longitudes de onda de la raya amarilla del kriptón 86. En nuestro país el sistema métrico se instauró a partir de enero de 1879. En Estados Unidos, el Congreso lo aprobó en 1866, pero nadie lo tuvo en cuenta.

### **4.3. SISTEMAS DE UNIDADES.**

Puede haber muchos sistemas de unidades, pero una y otras difieren esencialmente al menos en estos cuatro puntos:

- Las unidades fundamentales.-
- Las cantidades que se toman de las magnitudes principales para formar la unidad respectiva.-
- Las ecuaciones de formación de las magnitudes derivadas.-
- Los valores establecidos para los coeficientes de proporcionalidad para las ecuaciones de medidas.

Cuando se pasa al campo de la termodinámica es necesario disponer de otras magnitudes fundamentales y de su correspondiente unidad, como la temperatura y

para los sistemas ingenieriles, se utiliza como unidad fundamental el calor y sus unidades pueden ser: cal, kcal, BTU.

Normalmente se utilizan siete sistemas de unidades mecánicas, cuatro métricos y tres ingleses. Las unidades que generalmente se usan como fundamentales son longitud (**L**), tiempo ( $\theta$ ), masa (**M**), Fuerza (**F**) y temperatura (**T**). La unidad fundamental tiempo es el segundo, pero las unidades de otras dimensiones varían de un sistema a otro. Para el desarrollo de un sistema de unidades se basa en la segunda ley de Newton, en donde dice que la fuerza para acelerar en forma uniformemente acelerada a una masa es proporcional al producto de la masa por la aceleración.

$$\mathbf{F} \approx \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$$

La dimensión de la aceleración es longitud sobre tiempo al cuadrado. En forma simbólica:

$$[\mathbf{a}] = \frac{[\mathbf{L}]}{[\theta^2]}$$

En todos los sistemas de unidades, para convertir la segunda ley de Newton en una igualdad se introduce una constante de conversión, denominada  $g_c$ , de manera tal que:

$$\mathbf{F} \cdot g_c = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$$

En los sistemas **M.K.S.**, **c.g.s.**, **Técnico**, **Inglés** e **Inglés Técnico** este factor de conversión se hace igual a la unidad, de manera tal que la ecuación anterior se convierte en:

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$$

De esta manera, de las cuatro unidades principales, tres son independientes y una de ellas derivada. En los sistemas denominados absolutos, la derivada es la fuerza y en los llamados gravitacionales la derivada es la masa. Como las unidades derivadas resultan a veces dificultosas de utilizar (por ejemplo, en el sistema **M.K.S.**, la unidad de fuerza tiene dimensiones de [masa].[longitud]/[tiempo<sup>2</sup>]), se adoptan para ellas nombres especiales (como por ejemplo, la unidad de fuerza en el sistema **M.K.S.** se denomina Newton)

En los sistemas ingenieriles se utilizan las cuatro unidades principales como independientes, por lo que el valor de  $g_c$  ya no es igual a la unidad. Para poder definir el valor de  $g_c$  en el sistema ingenieril, hay que tener en cuenta que una masa de 1 kg a 45° de latitud y a nivel del mar, donde se tiene una aceleración de la gravedad normal de 9,81 m/s<sup>2</sup>, pesa 1 kg<sub>f</sub>, por lo que utilizando la segunda ley de Newton es posible definir el valor de  $g_c$ ; para el sistema ingenieril decimal:

$$g_c = \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{g}}{\mathbf{P}} = 9,81 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{Kg}_f \cdot \text{s}^2}$$

Para el sistema ingenieril ingles el valor de  $g_c$  es de 32,174 (lb/lb<sub>f</sub>).(pie/seg<sup>2</sup>).

Es importante hacer notar que los sistemas ingenieriles son sistemas ligado a la Tierra.  $g_c$  es una constante, en tanto que la aceleración de la gravedad  $g$  varia ligeramente punto a punto de la Tierra, pero para cálculos ingenieriles se puede tomar como la unidad a la relación  $g/g_c$ . En un campo gravitacional muy diferente al de la Tierra, la relación  $g/g_c$  difiere de la unidad.

Las unidades ingenieriles componen una verdadera confusión. Además de la tradicional confusión generada por la utilización de las relaciones masa-fuerza, los ingenieros se deben enfrentar a dificultades parecidas en la industria nuclear o de generación de energía.

DIMENSIÓN	MASA	LONGITUD	TIEMPO	FUERZA
SISTEMA				
M.K.S.	kg	m	s	Newton
c.g.s.	gr	cm	s	dina
Técnico	U.T.M.	m	s	kg <sub>f</sub>
Ingles	lb	pie	s	poundal
Técnico Ingles	Slug	pie	s	lb <sub>f</sub>
Ingenieril	kg	m	s	kg <sub>f</sub>

#### 4.4. UNIDADES Y DIMENSIONES DE MAGNITUDES DERIVADAS

Consideremos la definición de la velocidad media:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

En física, una formula es una relación entre los números que representan los valores de las magnitudes intervinientes. Una formula es una expresión sintética que representa una relación algebraica entre números.

Ya se ha dicho que el valor de una magnitud física es un número real que representa cuantas veces la unidad esta contenida en la magnitud en cuestión. Lo de “está contenida” esta definido en cada caso por el “proceso de medición”, que describe la operación que hay que realizar para comparar una magnitud con la unidad. La unidad de las llamadas **magnitudes fundamentales** se definen por “decreto”; por ejemplo, la unidad de longitud es la distancia entre dos marcas practicadas en la barra que representa el “**metro patrón**”. La unidad de tiempo, el **segundo**, es el lapso representado por la 86.400 ava parte del “día solar medio”. La unidad de masa es la masa de cierto cuerpo llamado “**kilogramo masa patrón**”. Como se ve, en realidad no son definiciones sino convenciones.

La velocidad es una **magnitud derivada**, que se define por medio de una operación física entre magnitudes independientes (distancia y tiempo). El valor de la velocidad es el número que se obtiene al dividir el valor de la distancia recorrida por el valor del tiempo empleado. La unidad de velocidad es la de aquel móvil (con movimiento uniforme) que recorre la unidad de espacio en la unidad de tiempo.

#### 4.5 CAMBIO DE UNIDADES

Es evidentemente que el número que representa el valor de una velocidad cambiara, si cambiamos las unidades de tiempo y longitud, aun siendo la velocidad que representa siempre la misma. Efectivamente, si **L** y **T** son las unidades originales de longitud y tiempo, y **L'** y **T'** las nuevas, y si  $\lambda$  y  $\tau$  son los valores numéricos de las unidades **L** y **T** medidos con el nuevo sistema de unidades, el nuevo valor numérico de la velocidad en cuestión será:

$$v' = \frac{\Delta s'}{\Delta t'} = \frac{\Delta s \cdot \lambda}{\Delta t \cdot \tau} = v \cdot \frac{\lambda}{\tau}$$

donde  $v$  es el valor de esa misma velocidad con el sistema de unidades anterior.

Esta es una relación entre números, y nos da la regla de transformación que sufre el número que representa el valor de la velocidad cuando se cambian las unidades. Para recordarla se utiliza universalmente la convención de añadir la relación simbólica entre las unidades utilizadas; por ejemplo 3 “m/seg.”. Esta relación simbólica se denomina “dimensiones de la velocidad” se suele indicar en forma genérica:

$$[v] = \frac{[L]}{[T]} = [L] \cdot [T]^{-1}$$

La expresión “3 m/seg.” significa dos cosas:

- 1) El valor de la velocidad es 3 cuando se utilizan el metro y el segundo como unidades.
- 2) Si se cambian las unidades, a ese numero 3 hay que multiplicarlo por el valor del metro en el nuevo sistema, y dividirlo por el valor del segundo en el nuevo sistema.

En resumen, “m/seg” es una expresión simbólica que representa una regla de transformación.

Por ejemplo, si las nuevas unidades son el km y la hora, tenemos:

$$\lambda = 10^{-3} \quad \tau = \frac{1}{3600}$$

Si el valor de una velocidad era 3 m/seg., con el nuevo sistema de unidades será:

$$v' = 3 \cdot \frac{10^{-3}}{\frac{1}{3600}} = 10,8 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

o sea 10,8 “km/hr”. La igualdad 3 m/seg. = 10,8 km/hr es simbólica; físicamente significa que el valor “3” y el valor “10,8” corresponden a una misma velocidad, si las unidades son en m. y seg. y km y hora, respectivamente.

Debido a la relación que define la velocidad  $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ , es posible elegir como magnitudes independientes cualquier par interviniente, por ejemplo, la velocidad y el espacio. En este caso, el tiempo pasara a ser una unidad derivada, debiendo ser definida su unidad como aquel intervalo que tarda un móvil en recorrer la unidad de espacio con la velocidad (constante) unidad. En física moderna, por ejemplo, se suele utilizar la velocidad de la luz como unidad independiente; en aerodinámica, la velocidad del sonido (Número de Mach)

## 5. ANÁLISIS DIMENSIONAL

### 5.1. ECUACIONES ADIMENSIONALES

Cualquier fenómeno físico se puede describir en función de determinadas variables, teniendo cada variable dimensiones definidas (como longitud, masa por unidad de volumen, etc.)

Estas cantidades se miden en unidades que se puedan elegir arbitrariamente, por ejemplo, la longitud se puede medir en centímetros o pulgadas. Un principio fundamental de la física es que el comportamiento de un sistema no depende de la elección arbitraria de las unidades de medición que se utilicen.

La ecuación o ecuaciones que definen un fenómeno físico con relación entre los símbolos que representan a las variables adecuadas. Cada término de la ecuación debe tener las mismas dimensiones independientes del sistema de unidades. El conocimiento de esta propiedad simple de las ecuaciones proporciona los medios para comprobar las fórmulas. Aunque parezca elemental, al comprobar la consistencia dimensional de las ecuaciones, a menudo se descubren errores de formulación. Cuando se hace cualquier desarrollo ingenieril siempre se realiza la comprobación dimensional.

Supongamos que se desea hacer un modelo matemático de un tanque de sección transversal constante que inicialmente esta lleno de un líquido de densidad  $\rho$  hasta una altura  $h_0$  y se vacía a través de un orificio situado en su parte inferior de área  $A_0$ . Las ecuaciones a formular deben responder a las siguientes preguntas:

- 1) ¿Cuánto tardará en vaciarse el tanque?
- 2) ¿Cuánto variará la altura del líquido con el tiempo?

Antes de hacer una formulación matemática del modelo es conveniente aclarar los símbolos utilizados:

- $Q_v$ : caudal volumétrico del tanque ( $m^3/seg.$ ).
- $A$ : área de la sección del tanque ( $m^2$ ).
- $A_0$ : área de la sección del orificio ( $m^2$ ).
- $h$ : altura del líquido en cualquier momento (m)
- $\rho$ : densidad del liquido ( $Kg/m^3$ )
- $\theta$ : tiempo (seg.)

Para definir este modelo hay que tener en cuenta el principio de conservación de la masa, que indica que el caudal másico que pasa a través del orificio será igual a la velocidad con que cambia la masa dentro del tanque.

La masa que se encuentra en el tanque es igual a la densidad multiplicada por el volumen del líquido contenido:

$$\rho \cdot A \cdot h$$

Como el tanque se va vaciando, la masa contenida va disminuyendo, por lo que la variación de la masa respecto al tiempo será:

$$\frac{d(\rho \cdot A \cdot h)}{dt}$$

y esta tiene que ser igual al caudal volumétrico multiplicado por la densidad:

$$\frac{d(\rho \cdot A \cdot h)}{dt} = -\rho \cdot Q_v$$

donde el signo menos indica que el flujo es hacia afuera con lo que se obtiene una disminución de masa. Como  $\rho$  y  $A$  son constantes:

$$\rho \cdot A \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right) = -\rho \cdot Q_v \Rightarrow \frac{dh}{dt} = -\frac{Q_v}{A}$$

Esta es una ecuación sencilla que consta de dos variables desconocidas, la altura del líquido y el caudal volumétrico, por lo que se tiene dos incógnitas con una sola ecuación. En esta ecuación hay que verificar si dimensionalmente es compatible, que se determina reemplazando cada valor por su unidad.

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q_v}{A} \quad \frac{m}{s} = \frac{m^3/s}{m^2} = \frac{m}{s}$$

$$\Rightarrow \frac{m}{s} = \frac{m}{s}$$

por lo que la ecuación es dimensionalmente consistente.

Tomemos la ecuación que da la distancia que recorre un móvil en un movimiento uniformemente acelerado:

$$d = v_0 \cdot \theta + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \theta^2$$

$d$ : distancia recorrida

$v_0$ : velocidad inicial

$\theta$ : tiempo

$a$ : aceleración

si dividimos la ecuación por d

$$1 = \frac{v_0 \cdot \theta}{d} + \frac{1}{2} \cdot \frac{a \cdot \theta^2}{d}$$

Se comprueba que los términos del segundo miembro son adimensionales (o de dimensión 1).

## 5.2. ECUACIONES DIMENSIONALES

En relaciones que se han obtenido por métodos empíricos, en la que los resultados experimentales se relacionan por medio de ecuaciones también empíricas, normalmente no son homogéneas dimensionalmente y contienen términos de dimensiones diferentes. Las ecuaciones de este tipo se denominan ecuaciones dimensionales o dimensionalmente heterogéneas. En tales ecuaciones no existe la ventaja de utilizar unidades acordes y en la misma ecuación pueden aparecer dos o más unidades de una misma dimensión diferentes, como el metro o el centímetro.

Así por ejemplo, la fórmula que da la velocidad de pérdida de calor desde un tubo horizontal a la atmósfera por conducción y convección es:

$$\frac{Q_c}{A} = 0,5 \cdot \left[ \frac{(\Delta t_s)^{1,25}}{(D_0')^{0,25}} \right]$$

donde:

$Q_c$ : pérdida de calor por conducción y convección (BTU)

$A$ : superficie de la cañería (pie<sup>2</sup>)

$\Delta t_s$ : diferencia de temperatura entre la pared de la tubería y la atmósfera (°F)

$D_0'$ : diámetro de la tubería (pulgadas)

Las dimensiones de  $Q_c/A$  no son las mismas que las del segundo miembro, por lo que la ecuación es dimensionalmente heterogénea. Las cantidades que se sustituyan en la ecuación tienen que expresarse en las unidades dadas, por lo que si no se obtendrían resultados erróneos.

Otro ejemplo de ecuaciones dimensionalmente heterogéneas es la ecuación de Palmer para predecir la conductividad de un líquido:

$$k = \left[ \frac{\left[ 0,0947 \cdot c_p \cdot \left( \frac{\rho}{PM} \right)^{\frac{1}{3}} \right]}{\frac{\Delta H_v}{T_b}} \right]$$

donde:

$k$ : conductividad calorífica del líquido {Kcal}/{hr.m<sup>2</sup>.(°C/m)}

$c_p$ : calor específico del líquido (cal/gr.°C)

$\rho$ : densidad del líquido (gr/cm<sup>3</sup>)

$PM$ : peso molecular

$T_b$ : temperatura de ebullición (°C)

$\Delta H_v$ : calor latente de ebullición (Kcal/Kg)

El valor de la constante 0,0947 depende de las dimensiones elegidas para cada una de las variables.

## 6. SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Como consecuencia de una resolución de la **9º Conferencia General de Pesas y Medidas** (1948), el Comité Internacional de Pesas y Medidas inicio los estudios y consultas necesarias para establecer un sistema práctico de unidades de medida. Tal sistema fue adoptado por la **11º Conferencia General de Pesas y Medidas** (1960), bajo el nombre de **Sistema Internacional de Unidades (SI)**. A partir de aquella fecha prácticamente todos los países del mundo han incorporado el **SI** a sus textos legales y reglamentaciones, con lo cual se ha alcanzado con creces uno de los objetivos expresados en la resolución de 1948: que el sistema sea susceptible de ser adoptado por todos los países signatarios de la Convención del Metro.

El **SI** esta constituido a partir de nueve unidades (siete fundamentales y dos suplementarias) que corresponden a magnitudes consideradas independientes. A partir de estas se obtienen las unidades derivadas correspondientes a las restantes magnitudes.

### 6.1 GLOSARIO

A fin de tratar el **Sistema Internacional de Unidades** se establecerá un glosario con el objeto de no repetir estos términos a lo largo del apunte.

**BIPM:** Bureau International des Poids et Mesures (Oficina Internacional de Pesas y Medidas)

**CIE:** Comisión Internacional sobre la Iluminación

**CGPM:** Conférence Générale des Poids et Mesures (Conferencia General de Pesas y Medidas).

**CIPM:** Comité International des Poids et Mesures (Comité Internacional de Pesas y Medidas).

**ISO:** International Standardization Organization (Organización Internacional para la Estandarización)

**IUPAC:** Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada.

**IUPAP:** Unión Internacional de la Física Pura y Aplicada.

**SI:** Sistema Internacional de Unidades

**OIML:** Organización Internationale de Métrologie Légale (Organización Internacional de Metrología Legal).

### 6.2 HISTORIA

El **BIPM** se constituyó durante la Convención del Metro, que se realizó en la ciudad de París el 20 mayo 1875 en donde asistieron diecisiete Estados. El **BIPM** tiene su oficina central cerca de París, en la zona del Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud); su mantenimiento se financia conjuntamente por los Estados miembros de la Convención del Metro.

El objetivo del **BIPM** es la de asegurar la unificación mundial de medidas físicas; siendo sus funciones:

- Establecer normas fundamentales y las escalas para la medida de las cantidades principales físicas y mantener los patrones internacionales.
- Realizar las comparaciones de normas nacionales e internacionales.
- Asegurar la coordinación de correspondientes técnicas de medición.
- Realizar y coordinar las medición de las principales constantes físicas.

El **BIPM** funciona bajo la supervisión exclusiva del **CIPM**, que a su vez está bajo la autoridad de la **CGPM**) y eleva un informe sobre el trabajo realizado por el **BIPM**.

Los delegados de todos los estados miembros de la Convención del Metro se reúnen cada cuatro años en la Conferencia General. La función de estas reuniones son:

- Discutir e iniciar las disposiciones requeridas para asegurar la propagación y la mejora del Sistema Internacional de Unidades (**SI**), que es la forma moderna del sistema métrico.
- Confirmar los resultados de nuevas determinaciones metrológicas fundamentales y las diversas resoluciones científicas de alcance internacional.
- Tomar todas las decisiones principales acerca de las finanzas, la organización y el desarrollo del **BIPM**.

Desde el 31 de diciembre 1997, cuarenta ocho Estados son los miembros de esta Convención: Argentina, Australia, Austria, Bélgica, Brasil, Bulgaria, Camerún, Canadá, Chile, China, la República Checa, Dinamarca, República Dominicana, Egipto, Finlandia, Francia, Alemania, Hungría, India, Indonesia, Irán, Irlanda, Israel, Italia, Japón, Corea del Norte y del Sur, México, Países Bajos, Nueva Zelanda, Noruega, Paquistán, Polonia, Portugal, Rumania, Federación Rusa, Singapur, Eslovaquia, Sudáfrica, España, Suecia, Suiza, Tailandia, Turquía, el Reino Unido, los Estados Unidos, Uruguay, Venezuela.

El Comité Internacional tiene dieciocho miembros, de diferentes Estados integrantes. Actualmente, estos se reúnen cada año. Los integrantes de este comité presentan un informe anual de la posición financiera del **BIPM** a los Gobiernos de los Estados miembros de la Convención del Metro.

La tarea principal del **CIPM** es la de asegurar la uniformidad mundial en las unidades de medida. Esto se hace por la acción directa o realizando propuestas al **CGPM**. Las actividades del **BIPM**, que en el principio se limitaba a las medidas de longitud y masa, se ha ampliado a las normas de medidas de electricidad (1927), la fotometría y radiometría (1937), la radiaciones ionizantes (1960) y a las escalas del tiempo (1988).

Después del trabajo confiado al **BIPM** en 1927, el **CIPM** ha establecido el **Comité de Consulta**, cuya función es la de proporcionar información y asesoramiento. Este Comité de Consulta, puede formar grupos temporales o permanentes a fin de trabajar en estudios de temas especiales.

El presidente de cada Comité de Consulta es designado por el **CIPM** y es normalmente un miembro del **CIPM**. Pueden ser miembros de los Comité de Consulta laboratorios de metrología y institutos especializados, convenidos por el **CIPM**, que envía a los delegados de su opción. Además, hay miembros individuales designados por el **CIPM**, y un representante del **BIPM**. Actualmente, hay nueve tales comités:

- El Comité Consultatif d'Électricité et Magnétisme (**CCEM**), nuevo nombre dado en 1997 al Comité Consultatif d'Électricité establecido en 1927;
- El Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (**CCPR**), nuevo nombre dado en 1971 al Comité Consultatif de Photométrie (**CCP**) establecido en 1933 (entre 1930 y 1933 el Comité Consultatif d'Électricité se ocupó de asuntos acerca de la fotometría);
- El Comité Consultatif de Thermométrie (**CCT**), establecido en 1937;
- El Comité Consultatif des Longueurs (**CCL**), nombre nuevo dado en 1997 al Comité Consultatif vierte Définition la du Mètre (**CCDM**), se estableció en 1952;
- El Comité Consultatif du Temps et des Fréquences (**CCTF**), nombre nuevo dado en 1997 al Comité Consultatif vierte Définition la Seconde de la (CCDS) establecido en 1956
- El Comité Consultatif des Rayonnements Ionisants (**CCRI**), el nombre nuevo dado en 1997 al Comité Consultatif vierte les Étalons de Mesure des Rayonne - ments Ionisants (**CCEMRI**) establecido en 1958
- El Comité Consultatif des Unités (**CCU**), establecido en 1964 (este comité substituyó a la "Comisión para el Sistema de Unidades " establecido por el **CIPM** en 1954);
- El Comité Consultatif vierte la Masa la et Esplendores les Apparentées (**CCM**), se establece en 1980;
- El Comité Consultatif vierte Quantité la de Matière (**CCQM**), se establece en 1993.

### 6.3 NOTA HISTÓRICA

La 9º **CGPM** (1948) instruyeron al **CIPM** a:

- Estudiar para establecer un juego completo de reglas para las unidades de medida;
- A tal fin, recabar la opinión que prevalece en círculos científicos, técnicos y educativos de todos países;
- Hacer recomendaciones sobre el establecimiento **de un sistema práctico de las unidades de medida** conveniente para la adopción por todos los signatarios a la **Convención del Metro**.

Esto también dejó principios generales para la escritura de símbolos de unidades y puso en una lista las unidades que les han sido asignados nombres especiales.

La 10º **CGPM** (1954), y la 14º **CGPM** (1971) adoptaron como las unidades fundamentales de este sistema de unidades, las unidades de las siguientes siete cantidades: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura termodinámica,

cantidad de sustancia e intensidad luminosa, como o unidades suplementarias se adoptaron el ángulo plano y el ángulo sólido.

La 11° **CGPM** (1960), adoptó el nombre de **Sistema Internacional de Unidades**, con la abreviatura internacional **SI**, para este sistema; reglas para los prefijos; unidades derivadas y otros temas; estableciéndose así una especificación comprensiva para las unidades de medida. Las reuniones sucesivas del **CGPM** y **CIPM** han agregado y modificado cuando fue necesario, la estructura original del **SI** para tomar en cuenta el avance de la ciencia y las necesidades de los usuarios.

Históricamente, los más importantes sucesos que condujeron a la creación del **CGPM** puede ser resumida así:

- La creación del **Sistema Métrico Decimal** durante la Revolución Francesa y el depósito subsiguiente de dos patrones construidos en platino que representan el metro y el kilogramo, el 22 de junio de 1799, en los Archivos de la República en París lo que se puede tomar como el primer paso para el desarrollo del Sistema Internacional de Unidades.
- En 1832, Gauss promovió fuertemente el uso de este Sistema Métrico, junto con el segundo, como unidad de tiempo, definido astronómicamente, para ser usado como un sistema coherente de unidades para las ciencias físicas. Gauss fue el primero para establecer las medidas *absolutas* del campo magnético de la Tierra en términos de un sistema decimal basado en tres unidades mecánicas, el milímetro, el gramo y el segundo para, las medidas de longitud, masa y tiempo respectivamente. En años posteriores Gauss y Weber ampliaron estas medidas para incluir fenómenos eléctricos.
- Estas aplicaciones en el campo de la electricidad y el magnetismo fueron desarrollados más profundamente, en los años 1860, bajo el liderazgo de Maxwell y Thomson en la **Asociación Británica para el Avance de Ciencia (BAAS)**. Ellos formularon la exigencia para **un sistema coherente de unidades, con unidades fundamentales y unidades derivadas**. En 1874 el **BAAS** introdujo **el sistema CGS**, un coherente sistema de unidades mecánicas, basado en tres unidades fundamentales: el centímetro, el gramo y el segundo, usando prefijos en el rango de micro a mega para expresar submúltiplos y múltiplos decimales. El desarrollo siguiente de la física como una ciencia experimental, en gran parte se basó en este sistema.
- Los tamaños de las unidades fundamentales del sistema **CGS** en los campos de electricidad y el magnetismo demostraron ser inadecuados. En 1880, el **BAAS** y el Congreso Internacional Eléctrico, el precursor de la Comisión Internacional Electrotécnica (**IEC**), aprobaron mutuamente un sistema coherente de unidades prácticas. Entre ellos estaba el ohmio como unidad de resistencia eléctrica, el voltio para la fuerza de electromotriz, y el amperio para la corriente eléctrica.
- Después del establecimiento de la Convención del Metro, el 20 mayo de 1875, el **CIPM** se concentró en la construcción de patrones nuevos que toman el metro y kilogramo como las unidades fundamentales de longitud y masa. En 1889 la 1° **CGPM** sancionó los patrones internacionales para el metro y el kilogramo. Juntos

con el segundo astronómico como la unidad de tiempo, estas unidades constituyeron un sistema de unidad mecánico tridimensional similar al sistema **CGS**, pero con el metro, el kilogramo y el segundo como unidades fundamentales. Se lo denominó **sistema MKS**.

- En 1901 Giorgi mostró que es posible combinar el sistema de unidades mecánicas **MKS** con las unidades prácticas eléctricas para conformar un solo sistema dimensional, sumando a las tres unidades fundamentales, una cuarta unidad de naturaleza eléctrica, como el amperio o el ohmio, volviendo a escribir las ecuaciones que ocurren en el electromagnetismo en base a este sistema. La oferta de Giorgi abrió el camino a nuevos acontecimientos.
- Después de la revisión que la Convención del Metro por la 6° **CGPM** en 1921, que amplió el alcance y las responsabilidades del **BIPM** a otros campos de la física, y la creación subsiguiente del **CCE** por la 7° **CGPM** en 1927, la oferta de Giorgi ha sido discutida a fondo por el **IEC**, el **IUPAP** y otras organizaciones internacionales. Esto condujo al **CCE** a proponer, en 1939, la adopción de un sistema de cuatro dimensiones fundamentales basado en el metro, el kilogramo, el segundo y el amperio, el sistema **MKSA**, una oferta aprobada por el **CIPM** en 1946.
- Después de una encuesta internacional realizada por el **BIPM**, que comenzó en 1948, en la 10° **CGPM**, realizado en 1954, se aprobó la introducción del *amperio*, *el kelvin* y *la candela* como unidades fundamentales, para la intensidad de corriente eléctrica, temperatura termodinámica y de intensidad luminosa respectivamente. Le dieron el nombre de **Systeme d'Unités Internacional (SI)** al sistema aprobado por la 11° **CGPM** en 1960. En la 14° **CGPM** en 1971 la versión usada del **SI** se completa por el agregado del *mol* como unidad fundamental para la cantidad de sustancia, llevando el número total de unidades fundamentales a siete.

## 6.4 INTRODUCCIÓN.

EL **CGPM** promulgó ciertas decisiones sobre unidades y la terminología. En números, la coma (la práctica francesa) o el punto (la práctica Británica) se usa sólo para separar la parte de números enteros de la parte decimal. Los números enteros pueden ser divididos en grupos de tres para facilitar la lectura; ni los puntos ni las comas deben ser insertados en espacios entre grupos. En este apunte como símbolo para separar la parte entera de la decimal de un número, se utilizará la coma.

Las unidades **SI** se dividen en dos clases:

- Unidades *fundamentales* (siete unidades)
- Unidades *suplementarias* (dos unidades)

Desde el punto de vista científico, la división de unidades **SI** en estas dos clases es hasta cierto punto arbitraria, porque esto no es esencial para la física. Sin embargo, el **CGPM**, considerando las ventajas de un único y práctico sistema mundial de unidades, que sirviera para las relaciones internacionales, enseñanza y el trabajo científico, decidió basar el **Sistema Internacional** en un sistema de siete

unidades bien definidas, las que según la convención son consideradas como dimensionalmente independiente: longitud (metro), masa (kilogramo), tiempo (segundo), intensidad de corriente eléctrica (amperio), temperatura termodinámica (kelvin), cantidad de materia (mol), e intensidad luminosa (candela). Esas unidades **SI** son denominadas **unidades fundamentales**.

Las unidades **SI** suplementarias son el ángulo plano (radián) y el ángulo sólido (estereorradián)

A partir de las unidades **SI** se conforman las **unidades derivadas**. Estos son las unidades que se forman por multiplicación o división de las unidades **SI**, según las relaciones algebraicas que unen las cantidades afectadas. Los nombres y los símbolos de algunas unidades así formadas en esas condiciones, en función de las unidades fundamentales, pueden ser substituidos por nombres especiales, las cuales, a su vez, pueden ser usados para formar otras expresiones y símbolos para obtener otras unidades derivadas.

Las unidades **SI** de estas dos clases forman un juego **coherente** de unidades, donde coherente es usado en el sentido de un sistema cuyas unidades son relacionadas mutuamente por las reglas de multiplicación y la división sin otro factor numérico que 1. Todas las unidades de este grupo coherente de unidades son designadas por el nombre **unidades SI**.

Es importante acentuar que cada cantidad física tiene sólo una unidad **SI**, aunque esta unidad puede ser expresada en formas diferentes. El inverso, sin embargo, no es verdadero; en algunos casos la misma unidad **SI** puede ser usada para expresar los valores de diferentes cantidades.

## **6.5. LOS PREFIJOS SI.**

El **CGPM** adoptó una serie de prefijos para la formación de los múltiplos y los submúltiplos decimales de unidades **SI**, estos son designados por el nombre **prefijos SI**.

Las unidades **SI**, es decir las unidades fundamentales y derivadas del **SI**, formar un juego coherente que se denomina **juego de unidades SI**. Los múltiplos y los submúltiplos de las **unidades SI** formadas usando las **unidades SI** combinadas con **prefijos SI** son designados por su nombre completo, **múltiplos y submúltiplos decimales de unidades SI**.

## **6.6. SISTEMA DE CANTIDADES**

El sistema de cantidades usadas con las unidades **SI** son tratados por el **Comité Técnico 12** de la **Organización Internacional para la Estandarización (ISO/TC 12)** y no es tratado aquí. Desde 1955, el **ISO/TC 12** ha publicado una serie de Normas Internacionales sobre las cantidades y sus unidades, recomendando intensamente el empleo del Sistema Internacional de Unidades. En estas Normas Internacionales, la **ISO** ha adoptado un sistema de cantidades físicas basadas en siete cantidades fundamentales que se corresponden a las siete unidades del **SI**, a saber: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa. Otras cantidades, cantidades denominadas derivadas, están definidas en función de estas siete cantidades

fundamentales. Las relaciones entre cantidades derivadas y fundamentales son expresadas por un sistema de ecuaciones. Este sistema de cantidades y ecuaciones son las que correctamente se usan con las unidades **SI**.

## 6.7. LEGISLACIÓN SOBRE UNIDADES

Según la legislación, distintos países han establecido reglas acerca del empleo de unidades sobre una base nacional, ya sea para el uso general o para áreas específicas como el comercio, la salud, la seguridad pública y la educación. En casi todos los países esta legislación se basa en el empleo del **Sistema Internacional de Unidades**. La **Organización Internationale de Métrologie Légale (OIML)**, fundada en 1955, es la encargada de la armonización internacional de estas legislaciones.

### 6.7.1. UNIDADES SI FUNDAMENTALES Y SUPLEMENTARIAS

Las definiciones formales de todas las unidades fundamentales del **SI** fueron aprobadas por la **CGPM**. Las primeras de tales definiciones han sido aprobada en 1889 y las más recientes en 1983. Estas definiciones son modificadas de vez en cuando a medida que las técnicas se desarrollan y permiten las realizaciones más exactas de las unidades fundamentales. Las unidades fundamentales y suplementarias del **Sistema Internacional** se listan en la **Tabla 1**, conjuntamente con el nombre de la unidad y su símbolo.

**Tabla 1. Unidades fundamentales y suplementarias del SI**

Unidades Fundamentales	Unidad fundamental del SI	
	Nombre	Símbolo
Longitud	metro	m
Masas	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Intensidad de corriente eléctrica	amperio	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd
Unidades Fundamentales	Nombre	Símbolo
Angulo plano	radián	rad
Angulo sólido	estereorradián	sr

### Definiciones

Aquí se darán las definiciones usuales de las unidades fundamentales y suplementarias.

## UNIDADES FUNDAMENTALES

### Longitud (metro)

El metro, a lo largo del tiempo, fue definido de muchas maneras a fin de facilitar por parte de distintos laboratorios de medida su reproducción. El metro se definió originalmente como la diez millonésima parte de la distancia desde el polo norte al ecuador a lo largo del meridiano que atraviesa París. A fin de establecer un patrón se construyó una barra de platino con un 10 % de iridio sostenido por otra barra de acero en forma de **X**, con dos marcas cuyas distancia entre sí equivalía al metro. La 7° **CGPM** (1927) definió el metro, de acuerdo al patrón internacional, indicando que: la unidad de longitud es el metro, definido por la distancia entre las marcas de las dos líneas centrales establecidas sobre la barra de platino-iridio, guardado en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas de Paris. A fin de establecer una medición, esta barra que estará a la presión estándar de una atmósfera y apoyado sobre dos cilindros de al menos un centímetro de diámetro, simétricamente colocado en el mismo plano horizontal a una distancia de 571 mm del uno al otro. Posteriormente, la definición del metro basado en el patrón internacional de platino-iridio se deroga en la 11° **CGPM** (1960) y se da una nueva definición para mejorar la exactitud con la que el metro puede ser definido y medido y se reemplaza por la siguiente definición:

El metro es la longitud igual a 1 650 763,73 longitudes de onda en el vacío de la radiación que emite el átomo de kriptón 86.

A su vez, esta ha sido substituido en la 17° **CGPM** (1984) por la siguiente definición:

***El metro es la longitud del camino que recorre la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de 1/299 792 458 de segundo.***

Hay que notar que para definir el metro de esta manera se debe fijar primero la velocidad de luz en exactamente 299.792.458 m/s.

El patrón original internacional del metro, que ha sido sancionado por la 1° **CGPM** en 1889, todavía es guardado en el **BIPM** en condiciones en que se especificaron en 1889.

### Masa (kilogramo)

La masa es la magnitud fundamental que se utiliza para describir cantidad de materia. El kilogramo se definió originalmente en términos de un volumen determinado de agua (la masa de 1000 cm<sup>3</sup> de agua pura a la temperatura de su mayor densidad). Posteriormente se construyó un cilindro de platino – iridio, al igual que el patrón original del metro, el patrón internacional del kilogramo, que se guarda en el **BIPM** en las condiciones especificadas por la 1° **CGPM** en 1889, y en donde se declaró: “Este prototipo de allí en adelante, será considerada como la unidad de masa”. En la 3° **CGPM** de 1901 con la intención de terminar con la ambigüedad en el uso popular acerca de la palabra "peso", se emitió una declaración confirmando que:

***El kilogramo es la unidad de masa; esto es igual a la masa del patrón internacional del kilogramo.***

### Tiempo (segundo)

La unidad de tiempo, el segundo, estaba en un momento definido como la 1/86400 av parte del día solar medio. La definición exacta " del día solar medio " se basa en teorías astronómicas. Sin embargo, las medidas mostraron las irregularidades en la rotación de la Tierra, con lo cual esa definición no se podía tener en cuenta ya que no permite alcanzar la exactitud requerida. Para definir con mayor precisión la unidad de tiempo, en la 11° **CGPM** (1960) se adoptó una definición dada por la **Unión Internacional Astronómica**, que ha sido basada en el año tropical. Sin embargo, ya se había demostrado en un trabajo experimental, que un patrón de intervalo de tiempo, se podía basar en la transición entre dos niveles de energía de un átomo o una molécula y que podía ser realizado y reproducido con mucho más precisión. Dado que es indispensable una definición muy exacta de la unidad de tiempo para el **SI**, la 13° **CGPM** (1967-1968) substituyeron la definición del segundo por la siguiente:

***El segundo es la duración de 9.192.631.770 períodos de la radiación que se corresponde a la transición entre los dos niveles hiperfinos del átomo de cesio 133 estando este en estado estable.***

En su reunión de 1997, el **CIPM** afirmó que: esta definición se refiere a un átomo de cesio en su estado estable a una temperatura de 0 K.

### **Intensidad de corriente eléctrica (amperio)**

Las unidades eléctricas, denominadas "**internacional**", para la corriente y la resistencia han sido introducidas por el **Congreso Internacional Eléctrico** realizado en Chicago en 1893. Estas unidades (amperio "internacional" y el ohmio "internacional") fueron confirmadas en la **Conferencia Internacional de Londres** en 1908.

Aunque esto fuera ya obvio, con motivo de la 8° **CGPM** (1933), había un deseo unánime de sustituir aquellas unidades "internacionales" por unidades denominadas "absolutas", pero la decisión oficial de suprimirlos sólo fue tomada en la 9° **CGPM** (1948), que adoptó el amperio para la unidad de corriente eléctrica, después una propuesta del **CIPM** (1946) definiéndolo de la siguiente manera:

***El amperio es la corriente constante que, si se mantiene dos conductores derechos y paralelos de longitud infinita, de sección circular insignificante, y se coloca 1 metro de estos conductores en el vacío, produciría entre ellos una fuerza igual a  $2 \times 10^{-7}$  newton por metro de longitud.***

Hay que notar que al definir el amperio de esta manera se debe fijar la permeabilidad en el vacío en exactamente  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m.

### **Temperatura termodinámica (kelvin).**

En la 9° **CGPM** (1948) de tres nombres propuestos para la unidad de temperatura ("grado centígrado", "grado centesimal" y "grado Celsius"), el **CIPM** escogió "grado Celsius" (en honor al astrónomo sueco Anders Celsius que fue el que lo propuso en el siglo XVIII).

Posteriormente, en la 10° **CGPM** (1954), se define la unidad de *temperatura termodinámica*, en que seleccionó el punto triple de agua como el punto fijo fundamental y se le asignó la temperatura de 273,16 K a fin de definir la unidad. La temperatura de congelación del agua a presión normal, se tomó como 273,15 K La 13° **CGPM** (1967-1968), adoptó el nombre *kelvin* (símbolo K) en vez de "grado kelvin" (símbolo °K), y definió la unidad de temperatura termodinámica de la forma siguiente:

***El kelvin, la unidad de temperatura termodinámica, es 1/273,16 de fracción de la temperatura termodinámica del punto triple de agua.***

Debido a esta forma de definir la escala de temperatura, permanece en la práctica común para expresar una temperatura termodinámica, el símbolo **T**, en términos de su diferencia de tomar la temperatura de referencia **T<sub>0</sub>** a 273.15 K, como el punto congelación del hielo a una presión de 1 atm. La diferencia entre una temperatura en Kelvin y su temperatura de referencia se denomina temperatura de Celsius (símbolo: **t**) y se define por la siguiente ecuación:

$$t = T - T_0$$

La unidad de temperatura Celsius (o centígrada) es el grado Celsius (o grado centígrado), el símbolo °C, que es por definición igual en la magnitud al kelvin. Una diferencia o un intervalo de temperatura pueden ser expresados en kelvins o en grados Celsius (13° **CGPM**, 1967 – 1968). El valor numérico *de una temperatura de t Celsius*, expresada en grados Celsius en la siguiente ecuación:

$$t (^{\circ} \text{C}) = T (\text{K}) - 273,15$$

La escala de temperaturas adoptada en 1960 en París, se basa en la temperatura del punto triple del agua **273,15 K**. Desde este punto, hasta el que le corresponde a la ebullición del agua a dicha presión, se hacen 100 divisiones,

El kelvin y el grado Celsius son también las unidades de la **Escala Internacional de Temperaturas** de 1990, adoptadas por la **CIPM** en 1989.

### **Cantidad de sustancia (mol)**

Después el descubrimiento de las leyes fundamentales de la química, unidades denominadas por ejemplo, "átomo – gramo" o "molécula - gramo", se han usados para especificar cantidad de elementos químicos o compuestos. Estas unidades tenían una conexión directa con "pesos atómicos" y "pesos moleculares", que es de hecho la masa relativa. Los *pesos atómicos* al principio habían sido referidos al peso atómico del oxígeno tomado como 16, según el acuerdo general. Pero cuando los físicos pudieron separar los isótopos en el espectrómetro de masas, le atribuyeron el valor 16 a uno de los isótopos de este; los químicos le dieron el mismo valor (ligeramente variable) a la mezcla de los isótopos 16, 17 y 18, que era para ellos el elemento oxígeno que existía naturalmente. Finalmente, un acuerdo entre la **IUPAP** y la **IUPAC** llevó esta dualidad a un final entre los años 1959/60. Los físicos y químicos desde entonces han acordado asignar el valor 12, exactamente, "al peso atómico", a la masa relativa atómica, del isótopo de carbono 12. La escala unificada así obtenida da los valores de masa relativa atómica. Permaneció para

definir la unidad de cantidad de sustancia fijando la masa correspondiente de carbono 12; por un acuerdo internacional esta masa ha sido fijada en 0.012 kilogramo, y la unidad de esta cantidad se denominó "cantidad de sustancia", al cual se dio el nombre de "mol" (símbolo: mol). Por propuestas de: **IUPAP**, **IUPAC** e **ISO**, el **CIPM** dio una definición del mol en 1967 y lo confirmó en 1969: la que fue adoptada por la 14° **CGPM** en 1971, definiéndolo de la siguiente manera:

***El mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas unidades elementales (átomos, moléculas, iones,..) como los átomos que hay en 0.012 kilogramos de carbono 12; ( $6,023 \times 10^{23}$ , este número es el que conoce como Número de Avogadro); su símbolo es "mol".***

Cuando se usa el mol, las entidades elementales deben ser especificadas y pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas, o los grupos especificados de tales partículas.

### **Intensidad luminosa (candela)**

Las unidades de intensidad luminosa basada en la luminosidad de una llama o la intensidad de un filamento incandescente estuvieron en uso en varios países antes de 1948, los que fueron reemplazados, al principio, por "la nueva candela" basado en luminosidad de un radiador de Planck (un cuerpo negro) a la temperatura de solidificación del platino. Esta modificación había sido preparada por la **Comisión Internacional sobre Iluminación (CIE)** y por el **CIPM** antes de 1937 y cambió su definición por el **CIPM** en 1946, que fue ratificado en 1948 por la 9° **CGPM**, adoptando el nuevo nombre internacional para esta unidad de **candela** (símbolo cd); En 1967, en la 13° **CGPM** dieron una versión modificada de la definición de 1946. En 1979, debido a las dificultades experimentales en la realización de un radiador de Planck a altas temperaturas y las nuevas posibilidades ofrecidas por la radiometría. (por ejemplo, la medida óptica de la potencia de radiación), la 16° **CGPM** en 1979 adoptó una nueva definición de la candela:

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

### **UNIDADES SUPLEMENTARIAS**

#### **Angulo plano (radián)**

***El radián es la medida de un ángulo plano central, comprendido entre dos radios, que abarcan un arco de longitud igual al radio con el que ha sido trazado.***

#### **Angulo sólido (estereorradián)**

*El estereorradián es el ángulo sólido que, con vértice en el centro de una esfera, abarca un área de la superficie esférica igual a la de un cuadrado que tiene por lado, el radio de la esfera.*

### 6.7.2. UNIDADES DERIVADAS DEL SI

Las unidades derivadas son las unidades que pueden ser expresadas en términos de unidades fundamentales mediante los símbolos matemáticos de multiplicación y la división. Se han dado a ciertas unidades derivadas nombres y símbolos especiales, estos nombres especiales y sus símbolos pueden ser usados en la combinación con las unidades fundamentales y otras derivadas para expresar las unidades de otras cantidades.

#### **Unidades derivadas expresadas en función de unidades fundamentales.**

A manera de ejemplo se define la unidad de fuerza

#### **Fuerza, peso**

La palabra "el peso" denota una cantidad de la misma naturaleza que "una fuerza": el peso de un cuerpo es el producto de su masa y la aceleración debido a la gravedad; en particular, el peso estándar de un cuerpo es el producto de su masa por la aceleración estándar debido a la gravedad; el valor adoptado en el Servicio Internacional de Pesos y Medidas para la aceleración estándar debido a la gravedad es  $980,665 \text{ cm/s}^2$ , el valor ya indicado en las leyes de algunos países. Para el **SI** la unidad de fuerza (o peso) es el **Newton**, que se define como una fuerza tal que aplicada sobre una masa de un kg le imprime una aceleración de  $1 \text{ m/seg}^2$ .

La **Tabla 2** lista algunos ejemplos de unidades derivadas expresadas directamente en función de unidades fundamentales.

**Tabla 2. Ejemplos de unidades derivadas del SI expresadas en función de unidades fundamentales**

Unidad Derivada	Unidad fundamental del SI	
	Nombre	Símbolo
Superficie	Metro cuadrado	$\text{m}^2$
Volumen	Metro cúbico	$\text{m}^3$
Velocidad	Metro por segundo	$\text{m/s}$
Aceleración	Metro por segundo cuadrado	$\text{m/s}^2$
Densidad	Kilogramo por metro cúbico	$\text{kg/m}^3$
Volumen específico	Metro cúbico por kilogramo	$\text{m}^3/\text{kg}$
Densidad de corriente	Amperio por metro cuadrado	$\text{A/m}^2$
Concentración de cantidad de sustancia	mol por metro cúbico	$\text{mol /m}^3$

### 6.7.3. UNIDADES CON NOMBRES ESPECIALES Y SUS SÍMBOLOS

Por conveniencia, determinadas unidades derivadas, que se listan en la **Tabla 3**, conjuntamente con sus símbolos, se le han dado nombres especiales. Estos nombres y sus símbolos pueden ser usados para expresar otras unidades derivadas: la **Tabla 4** muestran algunos ejemplos. Los nombres especiales y sus símbolos son una forma compacta para la expresión de las unidades que se usan con más frecuencia.

En las **Tablas 3 y 4**, la columna final muestra como las unidades **SI** derivadas pueden ser expresadas en función de las unidades fundamentales de **SI**.

**TABLA 3. Unidades SI derivadas con nombres especiales y sus símbolos**

Unidad derivada	Nombre	Símbolo	Unidad derivada SI	
			Expresados en términos de otras unidades derivadas SI	Expresado en términos de unidades SI fundamentales
Frecuencia	hertz	Hz		1/s
Fuerza	newton	N		m·kg/s <sup>2</sup>
Presión	pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>	kg/(s <sup>2</sup> ·m)
Energía, trabajo, cantidad de calor	joule	J	N·m	m <sup>2</sup> ·kg/s <sup>2</sup>
Potencia, flujo radiante	vatio	W	J/s	m <sup>2</sup> ·kg/s <sup>3</sup>
Carga eléctrica, cantidad de electricidad	coulomb	C		s·A
Diferencia de potencia eléctrica, fuerza electromotriz	volt	V	W/A	m <sup>2</sup> ·kg/(s <sup>3</sup> ·A)
Capacitancia	faradio	F	C/V	s <sup>4</sup> ·A <sup>2</sup> /(m <sup>2</sup> ·kg)
Resistencia eléctrica	ohmio	Ω	V/A	m <sup>2</sup> ·kg/(s <sup>3</sup> ·A <sup>2</sup> )
Conductancia eléctrica	siemens	S	A / V	s <sup>3</sup> ·A <sup>2</sup> /(m <sup>2</sup> ·kg)
Flujo magnético	weber	Wb	V · s	m <sup>2</sup> ·kg/(s <sup>2</sup> ·A)
Densidad de flujo magnético	t e s l a	T	Wb/m <sup>2</sup>	Kg/(s <sup>2</sup> ·A)
Inductancia	h e n r y	H	Wb/A	m <sup>2</sup> ·kg/(s <sup>2</sup> ·A <sup>2</sup> )
Temperatura Celsius	Grados Celsius	°C		K
Flujo luminoso	lumen	lm	cd·sr	m <sup>2</sup> ·cd/m <sup>2</sup> = cd
Actividad (referida a radionúclidos)	becquerel	Bq		1/s

**Tabla 4. Ejemplos de unidades derivadas SI cuyos nombres y símbolos incluyen unidades derivadas SI con nombres especiales y símbolos**

Cantidad derivada	Nombre	Unidad derivada SI	
		Símbolo	Expresado en términos de unidades SI fundamentales
Viscosidad absoluta	pascal·segundo	Pa·s	kg/(m·s)
Momento	newton·metro	N·m	m <sup>2</sup> ·kg/s <sup>2</sup>
Tensión superficial	newton por metro	N/m	kg/s <sup>2</sup>
Velocidad angular	radián por segundo	rad/s	m/(m·s) = 1/s
aceleración angular	radián por segundo cuadrado	rad/s <sup>2</sup>	M/(m·s <sup>2</sup> ) = 1/s <sup>2</sup>
Densidad de flujo de calor	Vatio por metro cuadrado	W/m <sup>2</sup>	Kg/s <sup>3</sup>
Entropía	julio por kelvin	J/K	m <sup>2</sup> ·kg/(s <sup>2</sup> ·K)
Calor específico, entropía	julio/kg.K	J/(kg.K)	m <sup>2</sup> /(s <sup>2</sup> ·K)
Energía por unidad de masa	julio por kilogramo	J/kg	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Conductividad térmica	vatio/m.K	W/(m·K)	m·kg/(s <sup>3</sup> ·K)
Energía por unidad de volumen	julio por metro cúbico	J/m <sup>3</sup>	Kg/(s <sup>2</sup> ·m)

Una unidad derivada a menudo puede ser expresada de formas diferentes por combinación de los nombres de unidades fundamentales con nombres especiales para unidades derivadas. Esto, sin embargo, es una libertad algebraica para ser usada de acuerdo al sentido común según consideraciones físicas. El julio, por ejemplo, formalmente puede escrito como newton.metro, o también como kilogramo metro cuadrado por segundo cuadrado, pero en determinadas situaciones algunas formas pueden ser más útiles que otras.

En la practica, a veces se da preferencia la de expresar determinadas cantidades con el empleo de una unidad para diferenciarlas de otra que tenga la misma dimensión. Por ejemplo, la unidad **SI** de frecuencia es el hercio, antes que 1/s, y la unidad **SI** de velocidad angular es el radián por segundo más bien que 1/s. De modo similar la unidad **SI** de momento es designada como newton.metro en ves de julio.

#### **6.7.4. UNIDADES PARA CANTIDADES SIN DIMENSIONES O CANTIDADES DE DIMENSIÓN UNO.**

Ciertas cantidades son definidas como la relación entre dos cantidades de la misma dimensión, por lo que se simplifican sus unidades y no poseen dimensión, por lo que tienen una dimensión que puede ser expresada por el número uno. La unidad de tales cantidades es necesariamente una unidad derivada, coherente con otras unidades del **SI** y, ya que esto se forma como la

proporción de dos unidades idénticas **SI**, la unidad también puede ser expresada por el número uno. Los ejemplos de tales cantidades son el índice de refracción, el factor de fricción, el número de Mach, número de Reynolds, etc. Todas estas cantidades son descritas como sin dimensiones, adimensionales o de dimensión uno, y tienen la unidad coherente **SI** igual a 1. Sus valores simplemente son expresados como números y, en general, no muestran explícitamente la unidad 1. En algunos casos, sin embargo, se le da un nombre especial a esta unidad, principalmente evitar confusión entre algunas unidades derivadas (por ejemplo: el radián, estereorradián, etc.)

## 6.8. MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS DECIMALES DE UNIDADES SI

### 6.8.1. PREFIJOS SI

La 11<sup>o</sup> **CGPM** (1960) adoptó una serie de prefijos y símbolos para los mismos para formar los nombres y los símbolos de los múltiplos decimales y los submúltiplos de las unidades **SI** en los límites de  $10^{12}$  a  $10^{-12}$ . Los prefijos para  $10^{15}$  y  $10^{-18}$  han sido agregados en la 12<sup>o</sup> **CGPM** (1964), para  $10^{15}$  y  $10^{18}$  por la 15<sup>o</sup> **CGPM** (1975) y para  $10^{21}$ ,  $10^{24}$ ,  $10^{-21}$  y  $10^{-24}$  por la 19<sup>o</sup> **CGPM** (1991). En la **Tabla 5** se listan todos los prefijos aprobados y sus símbolos.

**Tabla 5. Prefijos SI**

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

**Nota:** estos prefijos **SI** se refieren estrictamente a potencias de 10, no se pueden utilizar para potencias de 2 (por ejemplo 1 kilobite representa 1000 bites y no 1024 bites)

En el año 1991, la 19<sup>o</sup> **CGPM** adoptó los nombres para los prefijos de  $10^{21}$  (zetta),  $10^{24}$  (yotta),  $10^{-21}$  (zepto) y  $10^{-24}$  (yocto). Los nombres de los prefijos **zepto** y **zetta** son derivados de sept, sugerido por el número siete (la séptima potencia de  $10^3$ ) y la letra "z" substituye a la letra "s" para evitar el doble empleo de la letra "s" como un símbolo. Los nombres de los prefijos **yocto** y **yotta** se derivan de octo, sugiriendo el número ocho (la octava potencia de  $10^3$ ); la letra "y" se agrega para evitar el empleo de la letra "o" como un símbolo porque puede ser confundido con el número cero.

Un caso especial lo constituye el kilogramo entre las unidades fundamentales del Sistema Internacional; la unidad de masa es la única cuyo nombre, por motivos históricos, contiene un prefijo. Los nombres y símbolos para múltiplos decimales y los submúltiplos de la unidad de masa son formados uniendo nombres de prefijo a la unidad denominada "gramo" y símbolos de prefijo al símbolo de unidad "g" (**CIPM**, 1967)

*Ejemplo:*  $10^{-6}$  kilogramo = 1 mg (1 miligramo)

*Pero no* 1  $\mu$ kilogramo (1 microkilogramo).

## **6.9. UNIDADES FUERA DEL SI**

Las unidades **SI** se recomiendan su uso para el empleo en todas áreas de la ciencia, la tecnología y el comercio. Estas fueron acordadas internacionalmente por la **CGPM**, y proporcionan la referencia para poder definir las otras unidades. Las unidades fundamentales y derivadas del **SI**, incluyendo aquellas con nombres especiales, tienen la importante ventaja de formar un juego coherente de sistema de unidades, con el efecto de que cuando se utiliza este sistema, no se necesita realizar conversiones de unidades. Sin embargo, esto es ampliamente reconocido, ya que muchas unidades que no pertenecen al **SI** todavía aparecen extensamente en la literatura científica, técnica y comercial, y probablemente seguirán siendo usados muchos años. Otras unidades **No - SI** (que no pertenecen al Sistema Internacional), como las unidades de tiempo, se usan extensamente en la vida diaria, y están profundamente enraizadas en la historia y la cultura de la raza humana, por lo que no hay dudas que se seguirán usando durante el futuro. Por estos motivos las unidades más importantes que no pertenecen al **SI** se listan en la Tablas siguientes.

La inclusión de la Tabla de unidades **No - SI** en este texto no implica que se deba impulsar el empleo de las mismas. Con algunas excepciones comentadas posteriormente, las unidades **SI** siempre se deben preferir a las unidades **No - SI**. En lo posible hay que evitar combinar unidades **No - SI** con unidades del **SI**; en particular tales combinaciones de unidades para formar unidades compuestas deberían ser restringida a casos especiales para conservar la ventaja de coherencia conferida por el empleo de unidades **SI**.

### **6.9.1. UNIDADES USADAS CON EL SI**

El **CIPM** (1969), reconociendo que los usuarios deseaban emplear el **SI** con las unidades que no forman parte de este sistema, pero que son importantes y ampliamente usadas, dividieron a las unidades **No - SI** en tres categorías:

- Unidades a ser mantenidas.
- Unidades para ser tolerado temporalmente.
- Unidades que deben ser evitadas.

Revisando esta clasificación, el **CIPM** (1996) realizó una nueva clasificación de unidades **No - SI**:

- Unidades aceptadas para empleo con el **SI**, (**Tabla 6**).
- Unidades aceptadas para el empleo con el **SI**, cuyos valores son obtenidos experimentalmente, (**Tabla 7**).
- Otras unidades actualmente aceptadas para empleo con el **SI** para satisfacer las necesidades de intereses especiales (**Tabla 8**).

La **Tabla 6** lista las unidades **No - SI** que son aceptados para el empleo con el **SI**. Esto incluye las unidades que se emplean en el uso continuo diario, en particular las unidades tradicionales de tiempo y de ángulo, juntos con otras unidades que han asumido importancia técnica creciente.

**Tabla 6. Unidades No - SI aceptadas para empleo con el Sistema Internacional**

Nombre	Símbolo	Valor en SI
Minuto	min	1 min = 60 s
Hora <sup>(a)</sup>	h	1 h = 60 minutos = 3600 s
Día	d	1 d = 24 h = 86400 s
Grado <sup>(b)</sup>	°	1° = (π/180) rad
Minuto	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
Segundo	''	1'' = (1/60)' = (π/648000) rad
Litro <sup>(c)</sup>	l, L	1 l = 1 dm <sup>3</sup> ó 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Tonelada <sup>(d, e)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg

(a) El símbolo de esta unidad fue aprobado en la 9° **CGPM** (1948).

(b) La **ISO 31** recomienda que el grado sea subdividido en el sistema decimal más bien que la utilización del minuto y el segundo.

(c) Esta unidad y el símbolo **l** fue adoptado por la **CIPM** en 1879. El símbolo alternativo, **L**, se adoptó por la 16° **CGPM** (1979) para evitar el riesgo de confusión entre el símbolo **l** y el número 1. La presente definición del litro se tomó en la 12° **CGPM** (1964)

(d) Esta unidad y su símbolo se adoptaron por el **CIPM** en 1879.

(e) En algunos países de habla inglesa esta unidad se denomina "tonelada métrica".

La **Tabla 7** lista tres unidades **No - SI** las que también son aceptadas para el empleo con el **SI**, cuyos valores expresados en unidades **SI** debe ser obtenidos experimentalmente y por lo tanto no se conoce su valor exacto. Estos valores se dan con sus incertidumbres. En determinados campos especializados estas unidades son de uso común.

**Tabla 7. Unidades No - SI aceptadas para el empleo con el Sistema Internacional, cuyos valores en unidades SI son obtenidos experimentalmente**

Nombre	Símbolo	Definición	Valor en SI
Electronvolt	eV	(a)	1 eV = 1,60217733 (49). $10^{-19}$ J
Unidad de Masa Atómica	u	(b)	1 u = 1.6605402 (10). $10^{-27}$ kg
Unidad Astronómica	ua	(c)	1 ua = 1,49597870691(30). $10^{11}$ m

(b) El electronvolt es la energía cinética ganada por un electrón cuando atraviesa un campo eléctrico con una diferencia de potencial de 1 V en el vacío.

(c) La unidad de masa atómica unificada es igual a 1/12 de la masa de un átomo de carbono 12, en su estado normal y sin excitar.

(d) La unidad astronómica es una unidad de longitud aproximadamente igual a la distancia media promedio entre el Sol y la Tierra. Este valor se usa cuándo se tiene que describir el movimiento de los cuerpos en el Sistema Solar.

La **Tabla 8** lista algunas otras unidades **No - SI** que actualmente se aceptan para el empleo con el **SI** para satisfacer las necesidades de intereses comerciales, legales y científicos especializados. Estas unidades deberían ser definidas en relación con el **SI** en cada documento en el que ellos son usados. No se recomienda su empleo.

**Tabla 8. Otras unidades No - SI actualmente aceptadas para empleo con el Sistema Internacional**

Nombre	Símbolo	Valor en SI
Milla náutica <sup>(a)</sup>		1 milla náutica = 1852 m
Nudo		1 milla náutica por hora = (1852/3600) m/s
Area <sup>(b)</sup>	a	1 area = 1 dam <sup>2</sup> = 10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
Hectárea <sup>(b)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
Bar (c)	Bar	1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa = 1000 hPa = 10 <sup>5</sup> Pa
ångström	Å	1 Å = 0.1 nm = 10 <sup>-10</sup> m

(a) La milla náutica es una unidad especial empleada para la navegación marítima y aérea para expresar distancias. El valor convencional dado en la **Tabla 8** se adoptó por la Primera Conferencia Hidrográfica Internacional Extraordinaria, realizada en Mónaco en 1929, bajo el nombre "Milla Internacional Náutica". Aún no se ha acordado internacionalmente el símbolo. Esta unidad al principio ha sido escogida porque una milla náutica sobre la superficie de la Tierra abarca aproximadamente un minuto de ángulo en el centro.

(b) Las unidades área y hectárea y sus símbolos se adoptaron por la **CIPM** en 1879 y son usados para expresar las superficies de tierra.

(c) El bar y su símbolo se incluyeron en la 9<sup>o</sup> **CGPM** (1948)

## 6.9.2. UNIDADES FUERA EL SI.

Determinadas unidades **No - SI** todavía son usadas esporádicamente. Algunas son importantes para la interpretación de viejos textos científicos. Estas unidades se listan en las **Tablas 9 y 10**, pero no se recomienda su empleo. La **Tabla 9** establece las relaciones entre las unidades **CGS** y el **SI**, y lista aquellas unidades **CGS** a las que se les asigna nombres especiales.

**TABLA 9. UNIDADES DERIVADAS CGS CON NOMBRES ESPECIALES.**

Nombre	Símbolo	Valor en el SI
ergio <sup>(a)</sup>	ergio	1 ergio = $10^{-7}$ J
dina <sup>(a)</sup>	din	1 din = $10^{-5}$ N
poise <sup>(a)</sup>	P	1 P = $1 \text{ din}\cdot\text{s}/\text{cm}^2 = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
stokes	St	1 St = $1 \text{ cm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

(a) Estas unidades y sus símbolos fueron incluidas en la 9° **CGPM** (1948)

La **Tabla 10** lista las unidades que son comunes en textos más viejos. La relación de estas unidades con el **SI** se debería especificar en cada documento en que las mismas son usadas.

**Tabla 10. Ejemplos de otras unidades No - SI**

Nombre	Símbolo	Valor en SI
Torr	Torr	1 Torr = $(101325/760)$ Pa
Atmósfera estándar	atm <sup>(a)</sup>	1 atm = 101 325 Pa
Kilogramo fuerza	kg <sub>f</sub>	1 kg <sub>f</sub> = 9,80665 N
caloría	cal	(b)
micrón	μ <sup>(c)</sup>	1 m = 1 nm = $10^{-6}$ m

(a) En la 10° **CGPM** (1954) se determinó que la designación de "atmósfera estándar" es todavía aceptable para una presión de 101 325 Pa.

(b) Varias tipos de "calorías" se han estado usando:

- Una caloría denominada "a 15 °C":  $1 \text{ cal}_{15} = 4,1855 \text{ J}$  (valor adoptado por el **CIPM** en 1950).
- Una caloría denominada IT (International Table):  $1 \text{ cal}_{IT} = 4,1868 \text{ J}$  (5ª Conferencia Internacional sobre las Propiedades del Vapor, Londres, 1956);
- Una caloría denominada "termoquímica":  $1 \text{ cal}_{th} = 4,184 \text{ J}$ .

(c) El micrón y su símbolo, se adoptó por la **CIPM** en 1879, y confirmada en la 9° **CGPM** (1948) y suprimido por la 13° **CGPM** (1967 – 1968).

## 6.10. LA ESCRITURA DE LOS NOMBRES Y SÍMBOLOS DEL SI.

### 6.10.1. PRINCIPIOS GENERALES

Los principios generales para la escritura de símbolos de las unidades y números fueron propuestos en la 9<sup>o</sup> **CGPM** (1948) Estos posteriormente han sido adoptados y elaborados por **ISO/TC 12 (ISO 31, Cantidades y Unidades)**.

#### **SI símbolos de las unidades**

Los símbolos de las unidades **SI** (y así también muchos símbolos de unidad **No - SI**) se escriben de acuerdo a las siguientes reglas:

- Los símbolos de las unidades se escriben en el alfabeto latino. En general, los símbolos de unidad se escriben en minúscula, pero, si el nombre de una unidad es un nombre propio de una persona (por ejemplo: Newton, Pascal), se escribe la primera letra en mayúscula. Cuando el nombre de una unidad se deletrea, siempre se escribe en minúsculas, excepto cuando el nombre es la primera palabra de una oración o es el nombre "grado Celsius".
- Los símbolos de unidad no se alteran en el plural.
- Los símbolos de unidad no son seguidos por un punto (por ejemplo: kg y no kg.), excepto como la puntuación normal al final de una oración.

#### **Álgebra de los símbolos de unidad SI**

En el acuerdo con los principios generales adoptados por **ISO/TC 12 (ISO 31)**, la **CIPM** recomienda que las expresiones algebraicas que implican símbolos de unidad **SI** sean expresadas en formas estándar.

- Puntos o espacios se usarán para expresar una unidad derivada formada de dos o más otras unidades por multiplicación (Ejemplo: N·m o N m).
- Una barra inclinada ( / ), una línea horizontal, o un exponente negativo se usará para expresar una unidad derivada formada de dos o más unidades por la división (Ejemplo: m /s ó  $\frac{m}{s}$  ó  $m \cdot s^{-1}$ ).
- La barra inclinada no debe seguirse por un signo de multiplicación o por un signo de división sobre la misma línea a no ser que la ambigüedad sea evitada por paréntesis. En casos complicados se puede usar los exponentes negativos o paréntesis para evitar la ambigüedad.(Ejemplo:  $m/s^2$  o  $m \cdot s^{-2}$  pero no  $m/s/s$ )

#### **Reglas para utilización de prefijos SI**

De acuerdo con los principios generales adoptados por la **ISO (ISO 31)**, la **CIPM** recomienda que se observen las reglas siguientes para el uso de los prefijos **SI**:

- Los símbolos de los prefijos se escriben en caracteres latinos (cuando correspondan), rectos sin dejar espacio entre el símbolo de prefijo y el símbolo de unidad.
- El grupo conformado por el símbolo de prefijo unido al símbolo de unidad constituye un símbolo nuevo inseparable (ya sea un múltiplo o submúltiplo de la unidad involucrada) que puede ser elevada a potencias positivas o negativas y combinadas con otros símbolos de unidad para formar símbolos de unidad compuestos. (Ejemplos:  $1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$ ;  $1 \mu\text{s}^{-1} = (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$ ;  $1 \text{ V/cm} = (1 \text{ V})/(10^{-2} \text{ m}) = 10^2 \text{ V/m}$ ;  $1 \text{ cm}^{-1} = (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1}$ ).
- Los prefijos compuestos, esto es prefijos formados por la yuxtaposición de dos o más prefijos **Si**, **no** se usan (Ejemplo: 1 nm **pero no** 1 mμm).
- Un prefijo nunca se usa solo (Ejemplo:  $10^6 /\text{m}^3$  **pero no** M/ $\text{m}^3$ ).

## 7. SISTEMA MÉTRICO LEGAL ARGENTINO (SIMELA)

El **Sistema Métrico Decimal** se creó en Francia, a fines del Siglo XVIII. La simplicidad de su manejo y sus enormes ventajas frente a los antiguos sistemas determinó su rápida propagación por otros países, justificando así la dedicatoria “a todos los tiempos, a todos los pueblos”, según consta en una medalla conmemorativa acuñada en Francia en 1840.

Ya en 1830 las unidades métricas se conocían y eran usadas en la Confederación Argentina. Un informe del año 1836, redactado por Felipe Senillosa, “Comisionado especial del gobierno para el Nuevo Arreglo y Construcción de Patrones y Medidas”, da cuenta detallada de las experiencias realizadas para fijar las equivalencias métricas de las viejas unidades de origen español o inglés, corrientemente en uso, con “el nuevo sistema del metro y el gramo”.

Se establece allí que “una vara de bronce, nuevamente construida, se cotejó con un metro de acero, que fue encargado a París y se encuentra depositado en el Departamento Topográfico y se halló que la vara excedía en una pequeña fracción a la división de ochocientos sesenta y seis milímetros, o milésimos de metro, la que fue estimada por el señor comisionado y el señor Presidente del mismo Departamento Topográfico en tres quinto de un milésimo; es decir que la vara fue hallada en ochocientos sesenta y seis milímetros más seis diez milímetros, o diez milésimas de metro”. El empleo de este submúltiplo fue justificado (en época que nada hacía prever la necesidad de su utilización) en términos que hacen honor a la sabiduría de Felipe Senillosa y le confieren la personalidad de un precursor: “Era conveniente que así se notara, a fin que este dato pueda servir para ulteriores operaciones en el departamento topográfico relativas a la geografía en general, y perfecto conocimiento del globo terráqueo”.

El estado de Buenos Aires, por ley del 6 de octubre de 1857 sancionó la legalidad de las pesas y medidas métricas decimales, con sus denominaciones técnicas y sus múltiplos y submúltiplos.

La República Argentina, durante la presidencia del Gral. Bartolomé Mitre, por Ley N° 52, del 10 de setiembre de 1863, adoptó el sistemas de pesas y medidas métrico decimal y autorizó al Poder Ejecutivo para declarar obligatorio en los diferentes departamentos de la Administración y en todo el Territorio de la República “el uso de aquellas pesas y medidas decimales que juzgue oportunas, según estén allanados los obstáculos que se opongan a su realización”.

El 20 de mayo de 1875 tuvo lugar en París la firma del tratado de la Convención del Metro, actuando en representación de nuestro país el embajador plenipotenciario, señor Mariano Balcarce. La ley 790, del 28 de agosto de 1876, aprobó la Convención del Metro “celebrada por el ministro argentino en Francia y los demás representantes que firman dicha convención”.

Por Ley N° 845, del 13 de julio de 1877, quedo establecida que “el Sistema Métrico Decimal de Pesos y Medidas adoptado por ley del 10 de setiembre de 1863 será de uso obligatorio, en todos los contratos y en todas las transacciones comerciales, a partir del 1° de enero de 1887. desde la misma fecha, queda prohibido el uso de pesas y medidas de otros sistemas”.

La Ley N° 12384 del 16 de agosto de 1938, aprobó las modificaciones introducidas a la Convención del Metro y su reglamento en la reunión de París del 6 de octubre de 1921 “para asegurar la unificación internacional y perfeccionamiento del Sistema Métrico”

La Ley N° 19511, del 2 de marzo de 1972, al instituir finalmente el **Sistema Métrico Legal Argentino**, adoptó el **Sistema Internacional de Unidades (SI)**, resultado del perfeccionamiento y ampliación del centenario Sistema Métrico Decimal.