



© 1995-2026 by Isidoro Martínez

# MAGNITUDES, UNIDADES Y MEDIDA

Introducción .....	1
Sistema Internacional de magnitudes y unidades .....	3
Prefijos para los múltiplos y submúltiplos de las unidades del SI.....	5
Historia.....	5
¿Para qué necesita el hombre medir? .....	5
Filosofía de la racionalización metrológica enciclopedista .....	8
Algunas preguntas y sentencias breves .....	9
Definiciones de las unidades básicas del SI.....	10
Referencias.....	13

## Introducción

Magnitud es algo cuantificable, es decir, medible, ponderable (ya en el libro de la Sabiduría se dice: "Tú lo has regulado todo con medida, número y peso", Sab. XI-20). Las magnitudes pueden ser directamente apreciables por nuestros sentidos, como los tamaños y pesos de las cosas, o más indirectas (aceleraciones, energías). Medir implica realizar un experimento de cuantificación, normalmente con un instrumento especial (reloj, balanza, termómetro).

Cuando se consigue que la cuantificación sea objetiva (no dependa del observador y todos coincidan en la medida) se llama magnitud física (tiempos, longitudes, masas, temperaturas, aceleraciones, energías). Hay otras magnitudes que no resultan cuantificables universalmente: gustos, sabores, colores, ruidos, texturas, aunque puede existir alguna propiedad física relacionada, como la potencia sonora con el ruido, la longitud de onda de la luz con el color, etc.

Medir es relacionar una magnitud con otra u otras (de la misma especie o no) que se consideran patrones universalmente aceptados, estableciendo una comparación de igualdad, de orden y de número. Es decir, el resultado de una medida lleva asociado tres entidades: una magnitud (dimensiones), una unidad (suele indicar también las dimensiones) y una precisión (normalmente entendida como una incertidumbre del 50% en la post-última cifra significativa). Ejemplo: medir, dentro de cierto margen, si dos cuerpos tienen la misma masa o la misma temperatura, medir cuál de los dos cuerpos tiene más masa o más temperatura, medir cuánta más masa o más temperatura tiene uno respecto al otro. La incertidumbre es innata a la medida; puede ser disminuida pero nunca anulada.

Los patrones básicos se llaman unidades de medida. Para especificar el valor de una magnitud hay que dar la unidad de medida y el número que relaciona ambos valores. De nada sirve decir que la altura de un árbol es de 5 veces no sé qué, que decir que es de no sé cuántos metros. Aunque la relación del valor numérico con la unidad de medida es multiplicativa (e.g. 5 veces un metro), la norma de escritura es separar con un espacio en blanco ambos términos. Por ejemplo, cuando se escribe  $L=1500$  m, que se lee "le igual a mil quinientos metros" se quiere decir que la longitud denominada  $L$  mide aproximadamente 1500 veces más que la longitud del metro patrón, que es lo mismo que decir  $L=1,5$  km (por convenio, no se consideran cifras significativas los ceros finales, excepto si son cifras decimales), y que no tiene

sentido si sólo se dice " $L=1,5$ ". Incluso si toda la Humanidad llegase a usar exclusivamente un único sistema de unidades sin múltiplos ni submúltiplos, se seguiría indicando la unidad patrón para reconocer el tipo de magnitud física involucrada.

Toda relación entre magnitudes físicas (ecuación física) ha de ser dimensionalmente homogénea (no como en el ejemplo de la Tabla 1).

Tabla 1. Ejemplo de relación sin sentido físico (la suma total).

(tiempo) Mi fecha de nacimiento (año de la era presente)	1951
(longitud) Mi altura (cm)	170
(masa) Mi masa (kg)	85
(entidades individuales) Mis hijos	2
TOTAL	2208

La elección de unidades ha sido siempre antropométrica al ser el hombre el sujeto que mide ("El hombre es la medida de todas las cosas", Protágoras, s. V a.C.): el ritmo día/noche, la longitud de un paso, la temperatura del cuerpo humano, etc. En muchos casos la elección fue harto caprichosa; e.g. Luis XIV eligió la longitud de su pie como unidad patrón, Jorge III de Inglaterra eligió hacia 1770 como unidad de volumen patrón la capacidad de su orinal (Galón Imperial), enviando como patrón secundario a las colonias americanas el orinal de su mujer (Galón USA); anecdóticamente, las colonias americanas declararon su independencia en 1776 y en 1811 Jorge III fue apartado del trono por enajenación mental.

Es muy importante, aunque no imprescindible, que las unidades sean universales en el sentido de que su valor sea independiente de la posible variación de otras magnitudes externas, y en particular del tiempo. Así, si se elige el día como unidad de tiempo, convendría que la duración del día fuese la misma hoy que ayer o mañana, y la misma en Atenas que en Londres, lo cual, si se toma el conjunto día-noche, es suficientemente aproximado para la mayoría de las actividades humanas (ver "Medida del tiempo", más abajo). No es tan fácil elegir una unidad de medida de longitudes, pues no aparecen valores tan universales como el día; la longitud del brazo humano adulto no varía mucho entre individuos de una generación a otra o de un país a otro, mucho menos que la longitud de un paso, pero ya la incertidumbre resultaba inaceptable en el antiguo Egipto y hubo que poner orden estableciendo que el estándar era el codo del faraón (en realidad de una de una estatua, por razones obvias). Si se eligiese como unidad de medida de temperaturas la temperatura del cuerpo humano, convendría que ésta no variase de un sujeto a otro, ni con la edad, ni con el tiempo. Cuanto más universales son las unidades, más sencillas son las relaciones entre ellas en los modelos matemáticos que describen el comportamiento observado de la Naturaleza, las llamadas "Leyes de la Física"; e.g., se podría prescindir de la constante universal de los gases si se eligiese el número de Avogadro un poco más pequeño (el número de partículas de un gas ideal en un volumen unitario a la presión y temperatura unidad, i.e. unas  $0,7 \cdot 10^{23}$  entidades/mol).

Antiguamente se elegían muchas unidades de referencia para medir un mismo tipo de magnitud, una unidad pequeña para valores pequeños, una grande para valores grandes, tratando de que los números que resultan de comparar la magnitud a medir con su unidad sean números sencillos: números de dos o tres cifras y tal vez un decimal o dos. Así, la masa de las piedras preciosas se medía en quilates (no confundir Magnitudes, unidades y medida

este quilate, que es una semilla de masa 0,2 g de un árbol árabe, con el kilate o fracción másica multiplicada por 24 de oro en una aleación), mientras que las de las cosechas se medían en toneladas. Una segunda opción es adoptar una única unidad y usarla junto a sus múltiplos y submúltiplos: e.g. m, mm, km. Una tercera opción es adoptar una única unidad y tolerar que los números que relacionan la magnitud medida con la unidad no sean sencillos: e.g. que el diámetro de una aguja sea  $8,5 \cdot 10^{-5}$  m (que se lee "ocho coma cinco por diez elevado a menos cinco") y el de la Tierra sea  $1,27 \cdot 10^7$  m. En resumen, puede concluirse que:

- El uso de más de una unidad casi nunca es bueno; la única excepción puede ser en la medida de tiempos, pues hay dos unidades naturales al menos, el día y el año, a las que nos sería muy enojoso no ajustar el ritmo de la vida humana: sueño diario, cosechas anuales... Y todavía hay otras unidades de tiempo (segundo, minuto, hora, semana, mes) de uso generalizado.
- El uso de una unidad y de sus múltiplos y submúltiplos es lo mejor en el lenguaje hablado y en los textos descriptivos (e.g. micrómetros, milímetros, kilómetros).
- El uso exclusivo de la unidad básica es lo mejor en el lenguaje científico en general.

En la nomenclatura científica los símbolos usados para las unidades y las variables medidas no son abreviaturas ortográficas sino símbolos (significantes que directamente recuerdan su significado) con sus correspondientes reglas de escritura y pronunciación. En general las variables son letras del alfabeto latino o griego, tal vez con subíndices y rara vez con superíndices, y se escriben en letra cursiva (*itálica*), mientras que las unidades son letras simples o excepcionalmente parejas y tríadas que siempre se escriben en caracteres rectos. El cociente entre unidades se escribe y pronuncia con un 'por' de reparto (no de multiplicación (e.g. metros por segundo es m/s), mientras que para el producto de unidades no se añade nada (e.g. newton metro es N·m).

Las normas para la correcta utilización de magnitudes, unidades y símbolos científicos las proponen las asociaciones científicas internacionales (en este caso el Comité Internacional de Pesas y Medidas, CIPM) y las adoptan las Administraciones de cada país, con el fin de facilitar los intercambios de información y las transacciones materiales (particularmente entre organismos y empresas multinacionales).

## **Sistema Internacional de magnitudes y unidades**

Actualmente rige en todo el mundo el Sistema Internacional de magnitudes y unidades, denominado abreviadamente SI (Système International), o ISQ (International System of Quantities), si bien hay que señalar que Estados Unidos sigue todavía en proceso de transición, desde que en 1875 adoptara formalmente el Sistema Métrico Decimal.

Pese al gran coste que supone trabajar con sistemas incoherentes de unidades de medida, debido a los frecuentes errores a que ello da lugar en la práctica, muchas publicaciones científicas y administraciones públicas no exigen su cumplimiento, a pesar de las adopciones y exclusiones legales de carácter formativo o industrial vigentes en cada país (en España el Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida, BOE de 21/1/2010, y su corrección). Como rara vez se penalizan las infracciones administrativas en este sentido, y toda innovación conlleva un coste de Magnitudes, unidades y medida

adaptación inicial (e.g. transición al euro), sigue siendo muy frecuente ver aparatos destinados a medir presión graduados en "kg/cm<sup>2</sup>", por ejemplo, y características de calderas y refrigeradores medidas en "calorías" y "frigorías", respectivamente.

Además de homogeneizar las transacciones científicas, técnicas y comerciales, una de las mayores ventajas de un sistema coherente de unidades como el SI es que facilita la comparación de valores dispares de una misma magnitud (e.g. distancias microscópicas y astronómicas), y las relaciones entre diferentes magnitudes (no aparecen constantes de ajuste de unidades en las leyes físicas).

Como ejemplo de reglas de escritura científica se puede citar:

<u>Escritura correcta</u>	<u>Incorrecto</u>	<u>Incorrección</u>
$L = 0,12 \text{ m}$	$L = 0,12 \text{ m}$	la L no es cursiva. Se pronuncia L igual a 0,12 metros
	$L = 0,12\text{m}$	falta un espacio entre el número y la unidad
	$L = 0,12 \text{ m.}$	sobra el punto
	$L = 0^{\circ}12 \text{ m}$	la coma decimal debe ir abajo
	$L = 0.12 \text{ m}$	sólo se usará el punto como separador decimal en la escritura en inglés
	$L = .12 \text{ m.}$	ni en inglés se debe olvidar el cero
$L$ igual a 0,12 metros	$L = 0,12 \text{ metros}$	no debe mezclarse la simbología
$L = 6380 \text{ km}$	$L = 6380 \text{ Km}$	el múltiplo es k minúscula siempre
	$L = 6380 \text{ KM}$	el múltiplo es k minúscula siempre, y la unidad, el metro, m
$L = 6 \text{ 380 km}$	$L = 6.380 \text{ km}$	puede inducir a grave error usar separadores de miles para facilitar la lectura
$\lambda = 0,55 \mu \text{ m}$	$\lambda = 0,55 \mu$	debe escribirse y pronunciarse micrómetro y no "micra"
$V = 10 \text{ cm}^3$	$V = 10 \text{ cc}$	cc no es símbolo ni abreviatura de centímetro cúbico. Aunque pueda ponerse también $V = 10 \text{ ml}$ , no es aconsejable
$m = 0,123 \text{ kg}$	$m = 0,123 \text{ kgr}$	el símbolo para la unidad de masa es kg y, excepcionalmente*, pueden usarse el gramo, g, y sus submúltiplos
$T = 310,5 \text{ K}$	$T = 310,5 \text{ }^{\circ}\text{K}$	el símbolo para la unidad de temperatura es K y se lee kelvin (no debe decirse ni escribirse grado kelvin)
$T = 37,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 37,5^{\circ} \text{ C}$	el símbolo para la escala Celsius (no debe decirse centígrada) es $^{\circ}\text{C}$ y se separa con un espacio del número
$Q = 4200 \text{ J}$	$Q = 1 \text{ Cal}$	la única unidad de energía legal es el julio
$\Delta E = mc\Delta T$	$\Delta E = m \cdot 4200 \cdot \Delta T$	no se pueden mezclar magnitudes (valor · unidad) con valores
$\Delta E = (1/2)mv^2$	$\Delta E = 1/2mv^2$	aunque mal, significaría $\Delta E = 1/(2mv^2)$

\*Esta definición de la unidad de masa (1 kg) que incluye ya un múltiplo ( $k=10^3$ ) es una inconsistencia del SI adoptada ya en su declaración de 1960 para primar el pragmatismo (que las modificaciones no supongan grandes cambios), lo que impide aplicarle prefijos, e.g. 1 kkg para la tonelada, un mkg para el gramo; incluso suele decirse 'kilos' en vez de kilogramos. Otra incoherencia del SI es aceptar símbolos idénticos para varias unidades (metro m, día d, hora h, y tesla T) y múltiplos (mili- m, deci- d, hecto- h, y tera- T), aunque se reducen a la mitad si solo se usan los múltiplos y submúltiplos en potencias de 3. Otra inconsistencia ocurre en la notación para ángulos, que si es en grados no separa el número de la unidad (e.g.  $90^{\circ}$  y no 90 °); a propósito, de lo que no tiene culpa el SI es de la confusión que a veces parece en informes técnicos donde se usan unidades de arco para unidades de tiempo (e.g.  $5'10''$  en vez de 5 min y 10 s).

## Prefijos para los múltiplos y submúltiplos de las unidades del SI

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

### Historia

El Sistema Internacional (SI) de unidades se adoptó en 1960 (CGPM-11) por convenio entre 36 naciones (entre ellas España). El SI proviene del antiguo Sistema Métrico Decimal adoptado en la 1ª Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM, con estatus de organismo internacional con sede en Sèvres-París, Francia) ratificado en 1875 por 15 naciones (entre ellas España ¡y Estados Unidos!), y que se basaba en el sistema de medidas adoptado por Francia en 1799 y que ya entonces se trató de que fuera internacional, organizando la Conferencia del Metro, a la que asistieron representantes de 8 países, y en la que se nombró un Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) dirigido por el español Ibáñez de Ibero.

Todavía en el año 2000 el SI no se había impuesto en todo el mundo, siendo Estados Unidos la excepción más notable (aunque en Inglaterra también sigue usándose mucho el antiguo sistema imperial, y en otros países europeos el antiguo sistema técnico). El SI no es imprescindible (el hombre llegó a la Luna, y volvió, contando en millas, pies por segundo y galones), y cambiar de un sistema de unidades a otro cuesta un gran esfuerzo humano y material (en 1999 se estrelló la nave Mars Climate por una confusión de unidades); pero hay que reconocer las ventajas del SI frente a los sistemas antiguos, y estar preparado para nuevos cambios, si son para mejorar.

Entre 2006 y 2009 se unificaron las normas ISO e ICE para dar lugar a la norma ISO/IEC 80000 Cantidades y unidades, recomendándose la abreviatura ISQ para todos los idiomas (aunque la abreviatura SI es todavía la más usual).

### ¿Para qué necesita el hombre medir?

Tal vez la primera necesidad fue medir el tiempo, para planificar citas tribales, labores agrícolas, etc. y con ese fin se estableció un calendario y se adoptó como unidad básica de tiempo el día. Para darse cuenta

de la dificultad de los acuerdos universales, baste considerar que todavía hoy, tras varios milenios, hay regiones que siguen calendarios distintos (ver "Medida del tiempo").

Después surgiría la necesidad de medir otras cantidades, al desarrollarse el comercio, pues había que cuantificar el intercambio de bienes y, salvo en el caso de las cabezas de ganado, debió de presentar grandes dificultades el ponerse de acuerdo sobre la unidad para medir grano (que obviamente no puede ser tan pequeña como el grano mismo) o para medir líquidos (vino, aceites, miel), minerales, alhajas, etc.

Parece razonable suponer que al principio se confundirían las medidas de masa con las de volumen, debido a la escasa gama de densidades de los líquidos y los sólidos. Incluso hoy día se confunden las medidas de masa y peso, debido a las pequeñísimas variaciones de la gravedad local y de la densidad del aire (en la 3ª CGPM-1901 se definió el peso como peso en el vacío, i.e. en ausencia de aire, por eso pesa más un kilogramo de plomo que un kilogramo de paja, pesando en aire ambiente).

Casi al mismo tiempo debió de surgir la necesidad de medir longitudes para la utilización de troncos y tallado de piedras en la construcción, para la agrimensura (e.g. el Nilo borraba las lindes en su desbordamiento anual), para la compraventa de telas, manufactura de vestimenta, etc. Aun así, las distancias largas se medían en unidades de tiempo: en días de viaje a pie o a caballo.

Otras medidas que hoy pueden parecer ancestrales, como la de temperatura o la de energía, sólo se han cuantificado en nuestros días (es decir, hace apenas dos o tres siglos), y todavía siguen sin universalizarse. Las unidades de tiempo a lo largo de la historia han permanecido con escasa variación: el día, el mes lunar, el año solar, la hora, el minuto 'primo' y el 'minuto' segundo, todos se desarrollaron a partir de ciclos naturales casi-periódicos y sus divisiones sexagesimales de la tradición astronómica babilónica (m. 5 a.C.), ligando dichos periodos a similares graduaciones angulares. El sistema de numeración sexagesimal parece elegido por su facilidad de partición entera, pues resulta el más efectivo respecto al mínimo común múltiplo de los primeros números naturales:  $mcm(1,2)=2$ ,  $mcm(1,2,3)=6$ ,  $mcm(1,2,3,4)=12$ ,  $mcm(1,2,3,4,5)=60$ ,  $mcm(1,2,3,4,5,6)=60$ ,  $mcm(1,2,3,4,5,6,7)=420$ . Tanto arraigo tienen las unidades naturales de tiempo que la adopción de un sistema métrico, con relojes que sólo marquen segundos, kilosegundos y megasegundos (que con una modificación adecuada se podría hacer coincidir con el día solar medio), no han prosperado nunca, ni aun en la fiebre de la metrificación en Francia en que estuvo legalmente en vigor durante 12 años esta hora métrica. El problema no sólo era el de desechar todos los mecanismos de relojería existentes (el calendario con semanas de 10 días y meses poéticos no implicaba más que cambios de papel), sino el del cambio de mentalidad y de tradiciones.

Las unidades de longitud a lo largo de la historia son tal vez las que presentan mayor variedad. Los valores que se dan a continuación son orientativos, pues variaban de una región a otra y de una época a otra. Empezaron siendo antropomórficas, y ya en el mundo greco-romano se usaban el dígito=2 cm, la palma=7,5 cm, el pie=30 cm, el codo o cúbito=0,5 m, el paso(doble)=1,5 m, el estadio=185 m, y la milla o *mille-passus*=1500 m. Medievales son: la vara o yarda=1/2 braza, la braza=1,8 m y la legua=5 km. Modernamente se adoptaron unidades astronómicas como en la medida del tiempo: el metro

(diezmillonésima parte del cuadrante de meridiano terrestre), la unidad astronómica= $0,15 \cdot 10^{12}$ , el parsec= $31 \cdot 10^{15}$  m).

Las unidades de masa a lo largo de la historia también presentan gran variedad. Lo primero a señalar es que hasta época tan reciente como 1901, no se distinguía claramente entre las magnitudes de masa y de peso. Las unidades más pequeñas provenían de la Botánica: un grano= $65$  mg, un quilate(semilla de árbol)= $0,2$  g. La más usada en la antigüedad desde los tiempos de los romanos fue la libra, que en España ha perdurado hasta mediados del s. XX. Aunque en España era una libra= $360$  g, en Latinoamérica por influencia sajona era una libra=pound= $454$  g. También es de los tiempos de los romanos la onza (onza=*uncia*= $1/12$ ) y que venía a ser una onza= $30$  g.

Las unidades de temperatura (el nombre oficial en el SI es "temperatura termodinámica", pero ¿existe otra?) también han sido muy dispares desde que Galileo introdujo el primer termómetro rudimentario (en realidad un termo-baroscopio). Aunque resulte sorprendente, ya a finales del s. XVII el meteorólogo francés G. Amontons (1663-1705), dedujo que para un gas a  $V=\text{cte}$  se verificaba  $p=aT+b$ , sugiriendo que se adoptara una escala termométrica  $T'=(aT+b)c$  tal que  $p=cT'$  (y hasta llegó a dar valores numéricos:  $T_{\text{hielo}}=51$  'amontones' y  $T_{\text{eb}}=73$  'amontones', es decir  $1$  'amonton' $\cong 5$  kélvines).

En 1714 Fahrenheit construyó el primer termómetro de precisión, de mercurio con capilar sellado, tomando como puntos de referencia el de máximo frío de una disolución salina y el del calor del cuerpo humano, con 96 divisiones (fruto de sus múltiples subdivisiones de la vieja escala florentina de 12 grados).

En 1726 Réaumur construyó un termómetro de menor precisión, con una mezcla de agua y etanol, pero fue el primero en elegir como puntos de referencia el del hielo y el vapor, dividiendo en 80 grados para que cada grado correspondiese a un 1% de dilatación del fluido termométrico.

En 1741 Celsius construyó un termómetro con 100 divisiones entre el punto de hielo y el de vapor, pero con la escala invertida; muchos seguidores del 'termómetro sueco' le dieron la vuelta a la escala (el primero parece que fue el francés Christin en 1743).

En la CGPM-9-1948 a la escala 'centígrada' se le puso el nombre de Celsius (nótese que °C puede pensarse que se refiere a centígrado, Celsius e incluso Christin, pero debe pronunciarse como grados Celsius, o simplemente grados en el lenguaje coloquial).

En la CGPM-13-1967 se sustituyó la "escala kelvin" (definida a partir de la Celsius "centígrada") por la unidad de temperatura llamada kelvin (ya no más grado kelvin), de símbolo K (ya no más "°K").

Las unidades angulares apenas han cambiado desde hace milenios, usándose los grados, minutos y segundos sexagesimales babilónicos. En el s. XVIII se introdujo el radián. Con la decimalización imperante en la Revolución Francesa se introdujo el grado centesimal, llamando un "grad" a la centésima

parte de un ángulo recto (con ello se hicieron los cálculos geodésicos del metro y se siguió usando en Francia). El astrónomo inglés Fred Hoyle sugirió en su libro "Astronomy" (1962) usar como medida de ángulos la vuelta= $360^\circ=2\pi$  rad, la milivuelta y la microvuelta.

Las unidades de energía y de potencia han sufrido una evolución caótica durante los 2 o 3 siglos en que se viene utilizando. La primera unidad de potencia fue el caballo (*horsepower*, hp) introducida por J. Watt a finales del s. XVIII para promocionar su máquina de vapor (él calculó que los caballos de las minas tiraban con una fuerza equivalente al peso de unos 80 kg y a un 1 m/s;  $80 \cdot 9.8 \cdot 1 \cong 784 \text{ W}$ ). Fue Siemens en 1882 quien propuso como unidad el vatio (en honor de Watt).

En resumen, el origen del SI puede situarse en 1791, durante la Revolución Francesa (iniciada en 1789 y finalizada con el golpe de estado de Napoleón en 1799), año en que la Asamblea Nacional encargó a la Academia de Ciencias que pusiera orden en los pesos y medidas. Participaron Lagrange, Monge, Laplace, Talleyrand y otros, presididos por el astrónomo-cartógrafo-marino Borda y siendo Lavoisier el secretario. En 1791 la Asamblea Constituyente aceptó la propuesta del sistema "métrico". Desde 1791 hasta 1799 trabajó la expedición geodésica (Borda, Delambre y Méchain) para medir los  $10^\circ$  de arco del meridiano de París desde Dunquerque a Barcelona (ciudades ambas a nivel del mar). En 1799 se convocó una reunión internacional, la Conferencia del Metro a la que sólo acudieron representantes de 8 países (por el estado revolucionario local), y ese mismo año se aprobó la ley en Francia. Luego Napoleón no le hizo mucho caso (aunque sus conquistas ayudaron a extender el sistema métrico por toda Europa), pero a partir de 1837 se llegó a penalizar en Francia el uso de las unidades antiguas.

### **Filosofía de la racionalización metrológica enciclopedista**

El encargo de la Asamblea Nacional francesa a la Academia de Ciencias en 1791 fue que pusiera orden en los pesos y medidas.

Lo primero que se fijó fue la base de numeración, eligiendo la decimal o base 10 (parece que Lagrange defendía la base 11 y algunos otros la base 12).

Lo segundo fue acordar que la unidad de longitud, que se llamaría "metro" (medida griega antigua), serviría también para las áreas y los volúmenes.

Después se acordó que sólo habría una unidad básica para todos los tamaños, formándose las unidades de tamaños distintos como múltiplos y submúltiplos, anteponiendo prefijos latinos o griegos a la unidad básica.

Después se acordó que los múltiplos y submúltiplos del metro se aplicarían también a las demás unidades. En realidad, se estableció la unidad de superficie igual a  $100 \text{ m}^2$ , que se llamó un 'área', y la de volumen igual a  $(0,1 \text{ m})^3$ , que se llamó un litro (derivado de *litron*, una vieja medida francesa de capacidad para granos, que a su vez derivaba de una medida griega de masa, no de volumen).

Después se acordó que la unidad de peso (no se distinguía de la masa) sería la de 1 millonésima de la unidad de volumen (es decir  $1 \text{ cm}^3$ ) lleno de agua a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  (la temperatura más fácil de garantizar entonces, aunque luego se adoptó  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  porque la densidad del agua pura es máxima ahí), y se llamaría un gramo (primero se llamó un ‘grave’). Finalmente, por razones prácticas se construyó un kilogramo patrón (el primero tenía  $1000,03 \text{ g}$ , pero posteriormente se corrigió).

Después se acordó elegir  $1 \text{ m}$  igual a la diezmillonésima parte ( $1/10\,000\,000$ ) del cuadrante del meridiano terrestre (hoy día esto es unos  $0,9998 \text{ m}$ ), y no la longitud del péndulo que bate segundos como defendía Talleyrand (que es de unos  $0,994 \text{ m}$ ). Estos dos métodos ya habían sido propuestos por el cura Mouton y el astrónomo Picard, independientemente, en 1670. En 1799 se fabricó el metro patrón con dos muescas en una barra en X de platino iridiado (para estabilidad mecánica, química y térmica).

También se decimalizó el tiempo, usando como unidad el día, sus múltiplos y submúltiplos. Duró 12 años este calendario (12 meses de 3 décadas cada uno más 5 o 6 días de fiesta). En realidad, el calendario (papel) se cambió fácilmente, pero cambiar los relojes (acero) nunca se consiguió. Además, las unidades de longitud y masa eran caóticas, pero sobre las de tiempo ha habido casi consenso universal siempre.

Nótese que, salvo la unidad de tiempo, difícilmente almacenable en un museo (aunque podrían guardarse péndulos batiendo, o átomos de cesio excitados), la filosofía inicial era la de disponer de patrones materiales (artefactos prototipos) para las unidades fundamentales, guardados celosamente en un museo, de los cuales se sacarían copias fidedignas para otros museos (las cuales se cotejarían periódicamente con los originales), y que servirían a los laboratorios nacionales y fabricantes de instrumentos para disponer de patrones secundarios con los que calibrar. Sin embargo, la tendencia posterior, que empezó en 1960 juntamente al SI, ha sido la de ir abandonando los prototipos materiales en favor de la universalización de las constantes físicas, e.g. en vez de guardar un metro patrón de platino iridiado, definir el metro como la distancia que recorrería la luz en el vacío durante un tiempo detallado. Es verdad que con esta nueva filosofía se pierde contacto directo para nuestros sentidos, que visualizan más fácilmente una barra metálica en un museo que el recorrido de la luz durante unas cuantas oscilaciones electrónicas atómicas, pero se gana en universalidad y precisión (sería más sencillo informar a unos posibles ‘marcianos’ de nuestras medidas sin tener que mandarles algo material). Con la revisión del SI que entró en vigor el 2019-05-20, desapareció el último patrón primario material (el kilogramo prototipo).

### Algunas preguntas y sentencias breves

Medir ¿qué es?	Es comparar una magnitud con una unidad (y sus múltiplos y submúltiplos).
Medir ¿qué?	Es medible todo lo cuantificable en términos de una unidad.
Medir ¿para qué sirve?	Para referir inequívocamente, para traficar con volúmenes, masas, para reproducir cantidades o estados, para controlar, etc.
Medir ¿cómo?	Estableciendo una relación de orden cuantificada con una referencia universalmente aceptada.
Medir ¿cuándo?	Cuando no se tenga fe en los datos y ante situaciones nuevas.

Medir ¿lo no observable?	Quien dice que sólo deberían tratarse las magnitudes "observables" es que no se ha parado a pensar qué es la luz. Quien dice que hay que distinguir entre variables "observables" como el peso o la temperatura, y variables "hipotéticas" como la carga del electrón o la entropía, es que no se ha parado a pensar qué es el conocimiento y cómo se ratifica (sanciona).
Medir ¿con beneficio?	"No usarás distintas pesas (para comprar y vender)", Deuteronomio-25:13,15.
¿Por qué medir en moles?	Porque hay muchos fenómenos naturales que se comportan según el número de entidades atómico-moleculares que contengan, y como hay un número de éstas tan gigantesco en cada cuerpo, en lugar de contarlas por docenas o por gruesas (12 docenas) se cuentan en grupos de unos seiscientos mil trillones, que se llama número de Avogadro (o mejor constante de Avogadro), $N_A=6,022 \cdot 10^{23}$ . El número de Avogadro es el factor de escala antropométrico elegido para contabilizar entidades atómico-moleculares.
¿Por qué medir en kelvin y no en °C?	Porque en las fórmulas de la Termodinámica (para el trabajo con gases, rendimientos de máquinas, etc.) la magnitud que aparece es la temperatura absoluta $T$ , y si no, habría que poner siempre $T+T_0$ °C. Sin embargo, ningún termómetro de mercurio viene graduado en kélvines, todos vienen en grados Celsius, porque el mayor uso de la termometría es simplemente para comparación y no para cálculos derivados. Hay que reconocer de todas formas que la temperatura es una magnitud básica especial porque es la única unidad básica no aditiva.

## Definiciones de las unidades básicas del SI

Metro	<p>Es la longitud de la trayectoria de un rayo de luz en el vacío en un intervalo de tiempo de <math>1/299792458</math> de segundo (CGPM-17-1983). <math>\sigma = 10^{-12}</math>, siendo <math>\sigma</math> la incertidumbre relativa. <u>En 2019</u> se ha redactado de otra manera.</p> <p>Era la longitud de 165076373 longitudes de onda en el vacío de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles <math>2p^{10}</math> y <math>5d^5</math> del átomo de criptón-86 (CGPM-11-1960). <math>\sigma = 10^{-9}</math>.</p> <p>Era la longitud entre muescas de la barra de platino iridiado guardada en Sèvres, medida a 0 °C (CGPM-1-1889). <math>\sigma = 10^{-5}</math>. El metro y el kilogramo patrón (fabricados en platino iridiado en 1799) fueron las primeras unidades del sistema métrico decimal.</p> <p>Era la <math>1 / 10\,000\,000</math> del cuadrante del meridiano terrestre que pasa por París. <math>\sigma = 10^{-4}</math>.</p> <p>Para la enseñanza primaria puede decirse que un metro es la distancia entre las manos de un niño con los brazos extendidos.</p>
-------	---

<p>Kilogramo</p>	<p><u>Desde 2019</u> se define a partir de un valor exacto asignado a la constante de Planck, <math>h=6,62607015 \times 10^{-34}</math> kg·m<sup>2</sup>/s, y del metro y el segundo (CGPM-26-2018).</p> <p>Antes era la masa del prototipo que se custodiamos en la oficina internacional de pesos y medidas de Sèvres cerca de París (CGPM-3-1901). <math>\sigma = 10^{-6}</math>.</p> <p>Antes se entendía que era el peso (aunque se le llamaba masa en el protocolo) del prototipo que se custodiaba en la oficina internacional de pesos y medidas de Sèvres cerca de París (CGPM-1-1889). <math>\sigma = 10^{-6}</math>.</p> <p>En un futuro, la gran precisión en contar unidades atómico-moleculares por difracción de rayos X en sólidos monocristalinos puede aconsejar redefinir la unidad de masa a partir del mol y de la masa de un átomo concreto, desapareciendo así el último vestigio de los patrones artificiales.</p> <p>Para la enseñanza primaria puede decirse que un kilogramo es la masa del agua que cabe en una botella de un litro (o la de una piedra grande que puedan lanzar ellos).</p>
<p>Segundo</p>	<p>Es el tiempo que transcurre entre 9192631770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles energéticos hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio (CGPM-13-1967). <math>\sigma = 10^{-12}</math>. <u>En 2019</u> se ha redactado de otra manera.</p> <p>Antes era 1/31 556 926 del año medio solar (año trópico) de 1900 d.C (CGPM-11-1960). Antes era 1/86400 del día solar medio (año trópico) (CGPM-1-1889). Pero los ciclos astronómicos no son exactamente periódicos.</p> <p>Para la enseñanza primaria puede decirse que un segundo es el tiempo que transcurre entre unidades al ir contando en voz alta: uno, dos, tres, ....(mejor si a la vez se van dando pasos).</p>
<p>Kelvin</p>	<p><u>Desde 2019</u> se define a partir de un valor exacto asignado a la constante de Boltzmann, <math>k=1.380649 \times 10^{-23}</math> J/K, y del metro, el segundo, y el kilogramo; <math>1 \text{ J/K} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{s}^2 \cdot \text{K})</math> (CGPM-26-2018).</p> <p>Antes era la fracción 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (CGPM-13-1967). <math>\sigma = 10^{-4}</math>. Se fija la composición isotópica del agua: 0,00015576 moles de <sup>2</sup>H por mol de <sup>1</sup>H, 0,0003799 moles de <sup>17</sup>O por mol de <sup>16</sup>O y 0,002005 2 moles de <sup>18</sup>O por mol de <sup>16</sup>O. Aunque pueden usarse varias leyes universales de calibración (volumen de gas ideal, acústica de gas ideal, ruido eléctrico...), en la práctica, entre 13,8 K y 1235 K, se usa el termómetro de resistencia de platino.</p> <p>Antes era igual pero se llamaba grado kelvin (CGPM-10-1954).</p> <p>Antes se definía a partir de la escala Celsius centígrada.</p> <p>Para la enseñanza primaria conviene usar la escala Celsius, pero sin darle nombre, hablando sólo de "grados": a 20 °C estamos confortablemente, a 0 °C se hiela el agua, y a 100 °C hierve el agua (a partir de 50 °C ya nos quemaría el cazo).</p>
<p>Amperio</p>	<p><u>Desde 2019</u> se define a partir de un valor exacto asignado a la carga elemental del electrón, <math>e=1,602176634 \times 10^{-19}</math> C.</p>

	<p>Antes era la corriente eléctrica continua que mantenida en dos conductores paralelos delgados e infinitos separados un metro entre sí en el vacío produce una fuerza entre ellos de <math>2 \cdot 10^{-7}</math> N/m (CGPM-9-1948). <math>\sigma = 10^{-5}</math>. En la práctica, suele basarse en patrones de tensión eléctrica y de resistencia eléctrica, usando la ley de Ohm.</p> <p>Antes era la corriente eléctrica continua que hacía depositar <math>1,12 \cdot 10^{-6}</math> kg de plata en una cuba electrolítica con una disolución acuosa de <math>\text{AgNO}_3</math> de entre el 15% y el 20% en peso. Para la enseñanza primaria podría decirse, si acaso, que un amperio es el doble o el triple de la intensidad de corriente eléctrica que circula por una bombilla común.</p>
Candela	<p>Es la intensidad luminosa en una cierta dirección de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia <math>540 \cdot 10^{12}</math> Hz y que tiene una intensidad de radiación en esa dirección de <math>1/683</math> W/sr (CGPM-16-1979). <math>\sigma = 10^{-2}</math>. <u>En 2019</u> se ha redactado de otra manera.</p> <p>Antes era la intensidad luminosa en una cierta dirección de una fuente de platino fundente (2043 K) de <math>1/60</math> cm<sup>2</sup> de apertura, radiando como cuerpo negro (en el fondo de un crisol de pequeña apertura), en dirección normal a ésta (CGPM-9-1948).</p> <p>En un futuro, la radiación luminosa podría pasar a medirse como las demás radiaciones electromagnéticas (en W/sr en lugar de candelas, W/m<sup>2</sup> en lugar de luxes, etc.)</p>
Mol	<p><u>Desde 2019</u> es la cantidad de sustancia que hay en exactamente <math>6,02214076 \times 10^{23}</math> partículas.</p> <p>Antes era la cantidad de sustancia que contiene tantas entidades elementales (hay que especificarlas) cómo átomos hay en 0,012 kg de <math>^{12}\text{C}</math> (CGPM-14-1971). <math>\sigma = 10^{-6}</math>.</p> <p>Antes no existía la unidad de cantidad de sustancia, sino que 1 mol era una unidad de masa "gramomol, gmol, kmol, kgmol", que según los físicos era la masa de un sistema que tuviera tantas unidades atomicomoleculares como los que haya en 16 g del isótopo <math>^{16}\text{O}</math>, mientras que los químicos elegían la mezcla natural de isótopos de oxígeno.</p>

Conferencias Generales de Pesos y Medidas	Acuerdos más relevantes
CGPM-1-1889	Metro y kilogramo patrón
CGPM-3-1901	Litro y distinción entre masa y peso
CGPM-7-1927	Metro modificado
CGPM-9-1049	Grado kelvin y grado Celsius con el punto triple. Calor en julios. Escritura científica.
CGPM-10-1954	
CGPM-11-1960	Denominación de SI. Metro a partir del criptón-86. Segundo de efemérides de 1900.
CGPM-12-1964	
CGPM-13-1967-68	Segundo a partir del Cesio-133. Candela.
CGPM-14-1971	Mol (mol), pascal (Pa) y siemens (S).

Acrónimos:

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CGPM	Conférence General des Poids et Mesures
CIPM	Comité International des Poids et Mesures
IEC	International Electrotechnical Commission

## Referencias

1. Klein, H.A., "The science of measurement. A historical survey", Dover, 1974.
2. Universal Constants, <http://physics.nist.gov/cuu/index.html>
3. The International System of Units, <http://www.npl.co.uk/npl/reference>
4. Time, calendar and clock, <http://imartinez.etsiae.upm.es/~isidoro/ot1/Time/Time.htm>
5. The Bureau International des Poids et Mesures:  
[http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si\\_brochure\\_8\\_en.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf)
6. Centro Español de Metrología: <http://www.cem.es/>.
7. Asociación Española de Normalización y Certificación: <http://www.aenor.es/>. "Unidades de medida", AENOR, 2002. Normas UNE 82100.
8. Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida, BOE de 21/1/2010. Corregido en el BOE de 18/2/2010.
9. [http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_Internacional\\_de\\_Magnitudes](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_Internacional_de_Magnitudes).
10. [https://en.wikipedia.org/wiki/Non-SI\\_units\\_mentioned\\_in\\_the\\_SI](https://en.wikipedia.org/wiki/Non-SI_units_mentioned_in_the_SI).

([Back to Index](#))