

INTRODUCCIÓ A LA METROLOGIA PER A PROFESSIONALS DE L'ENGINYERIA I LA TECNOLOGIA: LA METROLOGIA CIENTÍFICA

Albert Garcia-Benadí

Universitat Politècnica de Catalunya. albert.garcia-benadi@upc.edu

Secció Catalana de Metrologia. Societat Catalana de Tecnologia. Institut d'Estudis Catalans. sc-metro@iec.cat

Resum: L'objectiu d'aquest article és donar a conèixer l'existència i la finalitat de la metrologia científica, mitjançant un repàs a la seva història, la seva vinculació a la tecnologia mitjançant la definició del sistema internacional d'unitats (SI) i l'estat actual de les definicions de les magnituds.

Paraules clau: sistema internacional d'unitats (SI), metrologia, constants fonamentals.

AN INTRODUCTION TO METROLOGY FOR ENGINEERING AND TECHNOLOGY PROFESSIONALS: SCIENTIFIC METROLOGY

Abstract: The aim of this paper is to introduce the existence and purpose of scientific metrology by making a review of its history, of its link to technology through the definition of the International System of Units (SI), and of the current state of the definitions of magnitudes.

Keywords: International System of Units (SI), metrology, fundamental constants.

Introducció

Comencem analitzant la paraula *metrologia*, provinent del grec i formada per l'arrel (*μέτρον* [*metron*], que es tradueix com a 'mesura', i el sufix *-λογία* [*loguía*], que es tradueix com a 'ciència'). Per tant, la metrologia és la ciència dels mesuraments.

Però, què vol dir aquesta definició? I el més important: és útil en la vida diària? Bé, primer de tot hem de dir que sense la metrologia les civilitzacions no haurien pogut assolir els avenços tecnològics, com la creació de màquines complexes, per exemple, el rellotge d'aigua o el cargol d'Arquímedes, entre d'altres, o la producció distribuïda. Malgrat que no ens n'adonem, la metrologia ens envolta; per exemple, quan anem a comprar carn i demanem 500 grams de llom: com sabem que ens n'han donat 500 grams o 200 grams? I el més important: què és un gram?... Totes aquestes qüestions són tractades en el camp de la metrologia.

La metrologia es troba inclosa en totes les ciències i disciplines en les quals es dona un resultat i es fa una anàlisi, però, si analitzem les diferents branques de la metrologia, la podríem dividir en tres grans àrees: la científica, la legal i la de qualitat. La finalitat d'aquest article és donar a conèixer la metrologia científica, amb les seves particularitats, així com certs conceptes que sempre s'han de tenir presents.

Història

La metrologia científica és la branca de la metrologia que se centra, per una banda, en la definició de les unitats de mesura d'una manera inalterable i repetible i, per una altra, en la recerca de la metodologia per poder materialitzar aquestes noves definicions mitjançant nous patrons. Però, abans d'entrar en més detall en aquests dos aspectes, val la pena fer una mirada enrere per entendre d'on venim. Ja en la antiguitat, que situem en l'antic Egipte, l'antiga Xina i en l'Imperi Romà, la metrologia tenia un paper rellevant arran de l'aparició dels primers sistemes de mesura, que es basaven en paràmetres anatòmics del cos humà, com, per exemple, el peu i el braç, entre d'altres (figura 1). Alguns d'aquests elements de mesura encara es conserven avui dia i a la figura 2 es mostra un d'aquests artefactes de l'antic Egipte, datat del 3000 abans de Crist, on es detalla el sistema de mesura de la longitud, la superfície, el volum i els pesos.

El sistema de mesura sempre s'aplicava en l'àmbit local i regional, fet que donava lloc a possibles conflictes en el comerç entre terres llunyanes, on s'utilitzaven altres sistemes. I aquí radica la importància de la unificació del sistema de mesura.

Actualment, aquests sistemes de mesura regionals o locals ens semblen molt llunyans en el temps, ja que anteriorment hem parlat dels antics egipcis, xinesos i

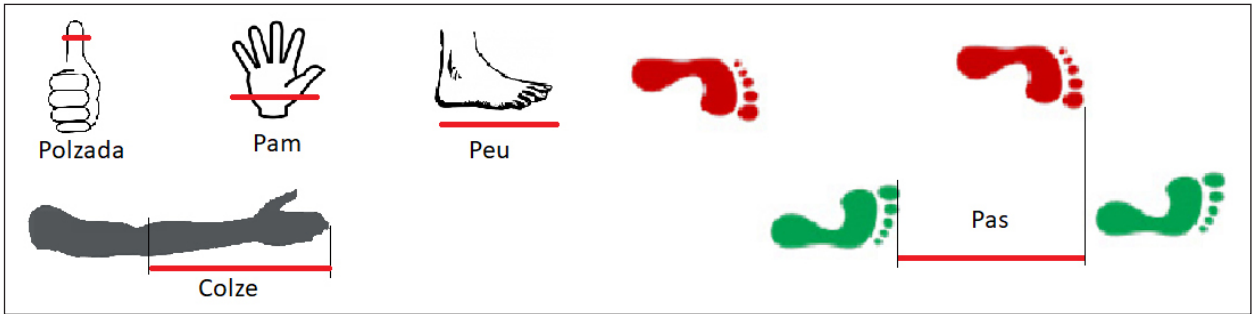


FIGURA 1. Unitats bàsiques de mesura dimensional basades en paràmetres anatòmics del cos humà.
FONT: Elaboració pròpia.



FIGURA 2. Retaule de l'antic Egipte del sistema de mesura de la longitud, superfície, volum i pesos, de l'any 3000 abans de Crist.
FONT: Bakha, «Représentation de la coudée royale égyptienne de Turin», a *Wikimedia Commons* (en línia), <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coud%C3%A9e-turin.jpg>>, sota llicència Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.5 Generic, <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/deed.en>>.

romans, però la realitat és que aquesta sistemàtica no és tan antiga. De fet, a Catalunya, el 1585 es va publicar la constitució número 89 Per levar... (Bajet Royo, 2009) (figura 3), en què es tracta la reducció, entenent la reducció com una unificació de totes les unitats de mesura de Catalunya a les unitats barcelonines. Com a curiositat, cal comentar que alguns materials de referència que menciona la constitució número 89 eren l'aigua clara per a mesures de volum, utilitzades per a la mesura del vi i l'oli, i el gra de mill com a referència per a la mesura de grans d'altres elements. Així doncs, el sistema de mesura local encara era vigent al segle XVI.

Tot això va canviar amb la Revolució Francesa. El 1789 es va reformular el paradigma existent —en què la referència de la mesura estava controlada pels senyors feudals, que podien modificar-la a la seva conveniència abusiva i criminal— per un sistema que fos just per a tot el poble. Amb aquesta nova filosofia, amb la qual es volia assegurar que una mesura fos igual per a tots els pobles i inalterable en el temps, va sorgir una frase que avui dia encara és vàlida: «À tous les temps, à tous les peuples», que es podria traduir per 'per a tots els temps, per a tots els pobles'.

Aquest canvi de mentalitat va fer repensar les definicions de les magnituds. Per aconseguir una independència de les mesures basades en l'anatomia del cos humà, es va passar a utilitzar magnituds mesurables de la Terra. Per exemple, en el cas del metre, la definició fa referència a la mesura del meridià entre el pol Nord i l'equador, passant per París (figura 4, on el meridià està marcat amb una línia vermella contínua). Com a curiositat, comentem la mesura del meridià verd, tram del meridià de referència que es va mesurar entre Dunkerque i la platja del Masnou, que va contribuir a definir el metre com una deu milionèsima part de la mesura d'aquest meridià entre el pol Nord i l'equador, passant per París.



FIGURA 3. Portada de la Constitució catalana del 1585.
FONT: «Constitutions y altres drets de Cathalunya compilats en virtut del Capítol de Cort XXIIII de las Corts per la S. C. y Reyál Maiestat del Rey Don Philip II, nostre senyor, celebradas en la vila de Montsó. Any MDLXXXV», a *Viquipèdia* (en línia), <https://ca.m.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Llibre_de_les_Constitucions_de_Catalunya_compilat_despr%C3%A8s_de_la_Cort_de_Felip_II_a_la_vila_de_Monts%C3%B3_de_1585.jpg>, de domini públic.

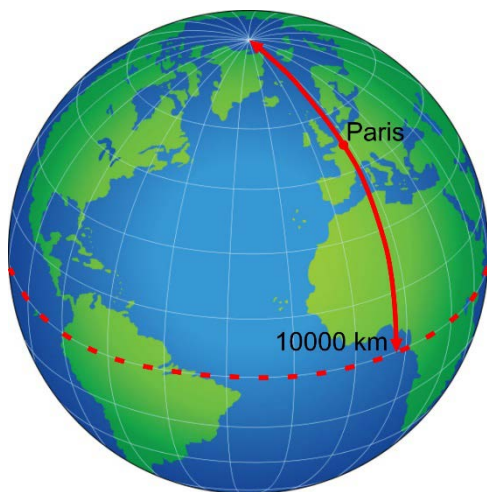


FIGURA 4. Definició del metre basada en una mesura de la Terra.
 FONT: United States Government, «Kilometre definition», adaptat de Martinv, a *Wikimedia Commons* (en línia), <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kilometre_definition.svg>, de domini públic.

Però què implica aquesta definició en la vida quotidiana de la gent? Per respondre aquesta qüestió és important entendre la diferència entre la definició d'una magnitud i la seva materialització. La definició d'una magnitud ha d'estar basada en un mètode experimental, que es pot reproduir i mesurar, i que, per tant, demostrï la definició. L'execució del mètode experimental sempre és costosa i la dificultat tècnica pot ser elevada, i, per tant, aquest mètode està reservat a poques entitats, bàsicament a laboratoris de referència d'àmbit estatal. Així doncs, per a la vida quotidiana sempre existeixen materialitzacions de la definició que es podrien comparar amb la definició de la magnitud, la qual (és important recordar-ho) ha de complir dos requisits: ha de ser inalterable en el temps i reproduïble.

La unificació del sistema de mesura no es va realitzar ràpidament, va ser una tasca llarga i dura, incloent-hi períodes amb guerres. Però aquesta unificació del sistema de

mesura té un gran avantatge a l'hora d'afavorir la relació tecnològica i econòmica entre regions, i per aquest motiu va ser adoptada progressivament per diferents països, malgrat tots els entrebancs que van aparèixer.

El 20 de maig de 1875, en la convenció del metre es va crear la Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM) i el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), vigents en l'actualitat. Els membres de la CGPM es reuneixen cada quatre anys, amb representants degudament nomenats pels estats membres, amb la finalitat de vetllar per conservar els patrons de les unitats de mesura. En la primera reunió de la CGPM es van definir les unitats del metre i el kilogram, que es van materialitzar en uns objectes fets d'un aliatge de platí i iridi, que es poden veure en la figura 5, i que avui dia encara es conserven en el BIPM en les mateixes condicions definides el 1889. La finalitat d'aquests artefactes era homogeneïtzar el patró de longitud i massa a qualsevol zona del planeta, i, per tant, es van fer còpies de l'artefacte que es van repartir en altres països. És interessant remarcar que, en aquest cas, tant la definició com la materialització eren artefactes físics. Actualment aquests artefactes es conserven per motius històrics.

L'evolució de la definició va continuar, i a mitjans del segle xx es van començar a emprar constants fonamentals de la natura, ja que es va comprovar que existien algunes petites variacions entre l'artefacte original i les còpies repartides als altres països, detectades gràcies a l'avenç de la tecnologia dels sistemes de mesura.

Va ser el 1956 quan la CGPM va definir per primera vegada el sistema internacional d'unitats (SI) o sistema mètric, que es componia de les unitats següents: metre, kilogram, segon, ampere, kelvin i candela.

Com a exemple, es detalla l'evolució de les definicions que s'han produït en el cas del metre a partir del 1889.

La definició del metre de 1889, és a dir, la longitud del prototip internacional de platí i iridi, va ser substituïda en

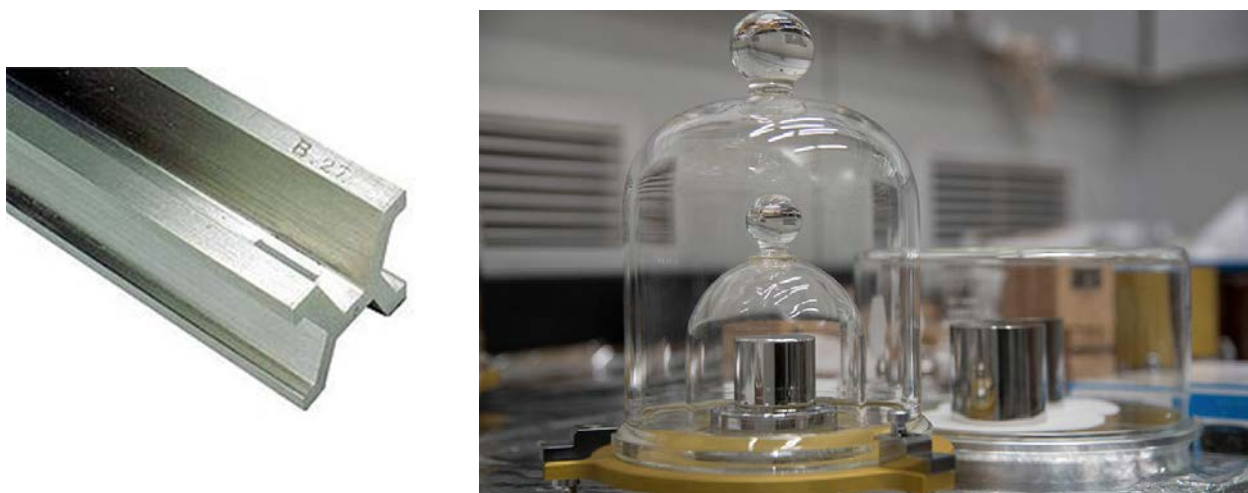


FIGURA 5. A l'esquerra, la materialització del patró de longitud, el metre. A la dreta, la materialització del patró de massa, el kilogram.
 FONT: United States Government, «US national length meter», a *Wikimedia Commons* (en línia), <https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:US_National_Length_Meter.JPG>, de domini públic (esquerra), i National Institute of Standard and Technology (NIST), «Kilogram: The past» (en línia), <<https://www.nist.gov/si-redefinition/kilogram-past>> (dreta).

l'11a edició de la CGPM (1960) per una definició basada en la longitud d'ona de la radiació corresponent a una transició particular en el criptó 86. Aquest canvi es va adoptar per tal de millorar la precisió amb la qual es podia realitzar la definició del metre —que s'aconsegueix utilitzant un interferòmetre amb un microscopi itinerant per mesurar la diferència de ruta òptica a mesura que es comptaven les franges—, així com per evitar la creació de còpies de l'artefacte patró, en què s'apreciaven diferents valors de deriva. En la figura 6 es pot veure l'equip utilitzat per a l'experiment, així com un segell commemoratiu que visualment dona la idea del canvi.

Aquesta nova definició va ser substituïda el 1983 en la 17a edició de la CGPM (resolució 1), amb una definició que pren com a referència la distància que la llum viatja en el buit en un interval de temps especificat. Per tal de deixar clara la dependència del valor numèric fix de la velocitat de la llum, c , la redacció de la definició es va modificar en la resolució 1 de la 26a edició de la CGPM (2018).

El prototip internacional original del metre, que va ser sancionat per la 1a edició de la CGPM el 1889, encara es

manté al BIPM en condicions especificades el 1889 amb finalitats històriques, però sense ús pràctic.

Una vegada exposada, en format abreujat, la història dels antics sistemes de mesura i la presentació de l'actual sistema internacional d'unitats (SI), és molt important conèixer quin és l'ús en l'àmbit mundial. Actualment encara hi ha certs països, marcats en vermell en la figura 7, que conserven i fan servir les seves pròpies unitats en la vida quotidiana. Malgrat que aquests països no reconeixen les unitats del SI, dins el camp científicotècnic sí que utilitzen les unitats definides en el SI.

Canvi profund el 2019

Com s'ha comentat anteriorment, l'evolució tecnològica ha permès anar millorant les definicions del SI. Però és molt important remarcar un fet sense precedents que va succeir el 2019, quan, per primera vegada, es van modificar totes les definicions de les unitats.

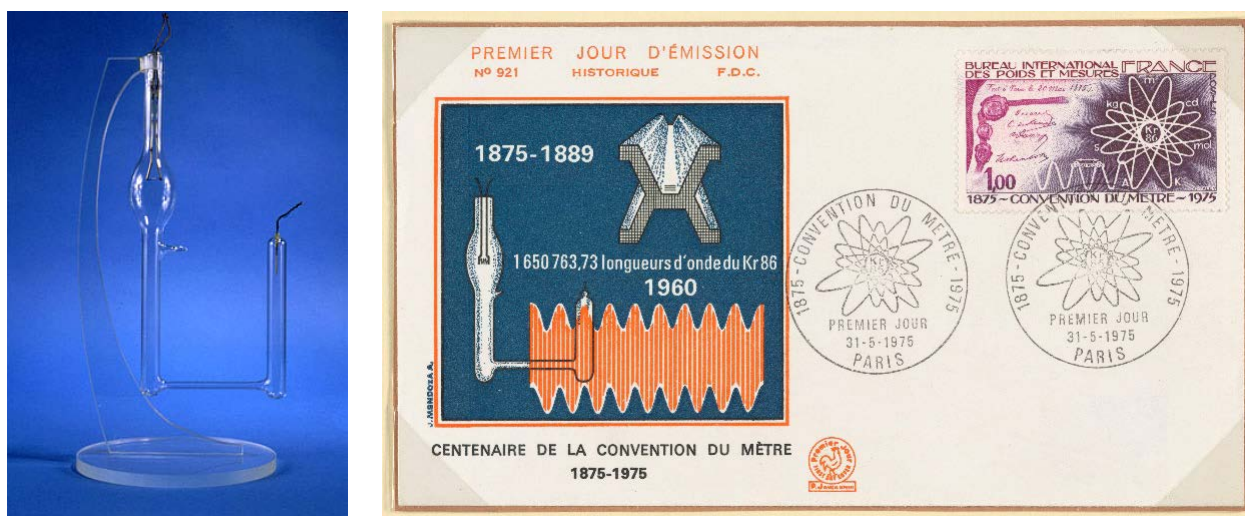


FIGURA 6. A l'esquerra, la làmpada de criptó utilitzada en l'experiment, i a la dreta, el segell commemoratiu (Mendoza, s. d.).
 FONT: NIST Museum, «Krypton-86-lamp NIST», a *Wikimedia Commons* (en línia), <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Krypton-86-lamp_NIST_49.jpg>, de domini públic (esquerra), i J. Mendoza, «First day cover commemorating the centenary of the Convention du Mètre (Treaty of the Meter)», a *Digital Collections, Science History Institute Museum & Library* (en línia), <<https://digital.sciencehistory.org/works/qz20ss53m>> (dreta).

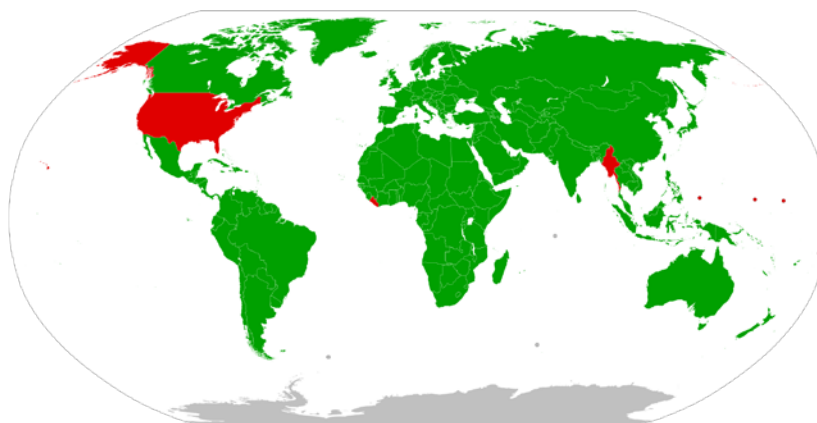
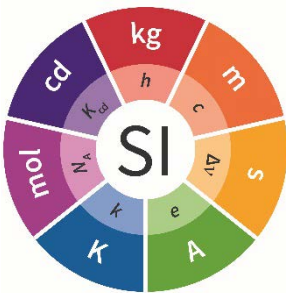


FIGURA 7. En verd, països que han adoptat el SI; en vermell, els que no l'han adoptat; els grisos, zones no poblades.
 FONT: «Metric system adoption map», a *Wikimedia Commons* (en línia), <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metric_system_adoption_map.svg>, de domini públic.



Magnitud	Símbol	Unitat bàsica	Símbol
Longitud	l	metre	m
Massa	m	kilogram	kg
Temps	t	segon	s
Corrent elèctric	I	ampere	A
Temperatura termodinàmica	T	kelvin	K
Quantitat de substància	n	mol	mol
Intensitat lluminosa	I_v	candela	cd

FIGURA 8. A l'esquerra es detallen els símbols de la unitat bàsica, al cercle exterior, amb la seva constant fonamental de la natura, al cercle interior. A la dreta, la taula de relació entre les magnituds i les unitats bàsiques amb els seus símbols.

FONT: Comité Consultatif des Unités, Comité International des Poids et Mesures (CIPM), *A concise summary of the International System of Units, SI* (en línia), BIPM, <<https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-concise-EN.pdf/2fda4656-e236-0fcb-3867-36ca74eea4e3>> (esquerra), i elaboració pròpia (dreta).

Els canvis introduïts en les set magnituds, detallades en la taula de la figura 8, es poden quantificar com a canvis en el redactat de la definició (realitzada en la longitud, el temps i la intensitat lluminosa), i canvis profunds en la definició de la magnitud (realitzada en la massa, el corrent elèctric, la temperatura termodinàmica i la quantitat de substància).

El canvi en totes les magnituds es fonamenta en el fet que avui en dia els sistemes per al càlcul de constants universals han assolit un grau d'exactitud tan elevada que les constants universals es consideren valors sense incertesa associada, en què cada magnitud es pot vincular amb aquestes constants, tal com es detalla en la part esquerra de la figura 8, en què la constant es troba en el cercle interior, i en el cercle exterior es detalla el símbol de la unitat de la magnitud.

Els valors de les constants universals, definides per consens el 2019, detallades en el cercle interior de la figura 8 i presentades amb ordre de necessitat de la definició, són les següents:

— Per definir la unitat de temps, el segon, s'utilitza la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental sense pertorbar de l'àtom de cesi $133 \Delta\nu_{Cs}$, que és $9\,192\,631\,770$ Hz.

— Per definir la unitat de distància, el metre, s'utilitza la velocitat de la llum al buit, c , ara definida com a constant amb el valor $299\,792\,458$ m/s.

— Per definir la unitat de massa, el kilogram, s'utilitza la constant de Planck, h , ara definida com a constant amb el valor $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s.

— Per definir la unitat de corrent elèctric, l'ampere, s'utilitza la càrrega elemental, e , ara definida com a constant amb el valor $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C.

— Per definir la unitat de temperatura termodinàmica, el kelvin, s'utilitza la constant de Boltzmann, k , ara definida com a constant amb el valor $1,380\,649 \times 10^{-23}$ J/K.

— Per definir la unitat de quantitat de substància, el mol, s'utilitza la constant d'Avogadro, N_A , ara definida com a constant amb el valor $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol $^{-1}$.

— Per definir la unitat de la intensitat lluminosa, la candela, s'utilitza la constant d'eficàcia lluminosa, K_{cd} de la radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} hertz, ara definida com a constant amb el valor 683 lm/W.

A continuació es detallen les definicions de les magnituds que han sofert un canvi profund en la seva definició

mitjançant la definició prèvia, el motiu del canvi i la definició actual.

Les magnituds que es detallaran són les següents: la massa, el corrent elèctric, la temperatura termodinàmica i la quantitat de substància.

La massa

La definició anterior del kilogram, que és la unitat de la massa, era: «El kilogram és la unitat de massa; i és igual a la massa del prototip internacional del kilogram (IPK)»,¹ en què l'IPK era l'artefacte creat el 1875 (figura 5) i que és un cilindre amb un diàmetre i alçària d'uns 39 mm, fet d'un aliatge del 90% de platí i el 10% d'iridi. D'aquest artefacte se'n van fer moltes còpies. Les còpies germanes de l'original són les identificades com a K1, 7, 8, 32, 43 i 47, emmagatzemades en el BIPM, però també se'n varen fer còpies per als països, cosa que va donar lloc als prototips nacionals, amb la finalitat que cada país disposés de la seva còpia. Aquestes còpies per als països també s'identifiquen amb xifres numèriques; per exemple, Finlàndia té la 23 i l'Índia disposa de la 57.

El motiu de la nova definició rau en la detecció de la variació amb el temps de la mesura de les còpies oficials de l'IPK, anomenada *deriva*, que viola el concepte d'inalterabilitat. En la figura 9 es detalla la variació de massa de les còpies oficials K1, 7, 8 i 3 en els darrers cent anys. La còpia 3 és l'artefacte en poder d'Espanya.

En la nova definició de la massa, a banda de definir la constant de Planck, s'empren altres constants, tal com es mostra en la figura 10: «El kilogram, símbol kg, és la unitat del SI de massa. Es defineix fixant el valor numèric de la constant de Planck, h , com a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$, quan s'expressa en la unitat J s, igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, en què el metre i el segon es defineixen en funció de c i $\Delta\nu_{Cs}$ ».²

En l'equació de la part superior de la figura 10 es detalla l'equivalència del kilogram respecte de la constant de Planck amb unitats. En la part inferior es detalla l'equivalència del kilogram respecte de les constants fonamentals

1. Definició extreta d'<https://www.bipm.org/en/history-si/kilogram>. La traducció és de l'autor.

2. Definició extreta d'<https://www.bipm.org/en/si-base-units/kilogram>. La traducció és de l'autor.

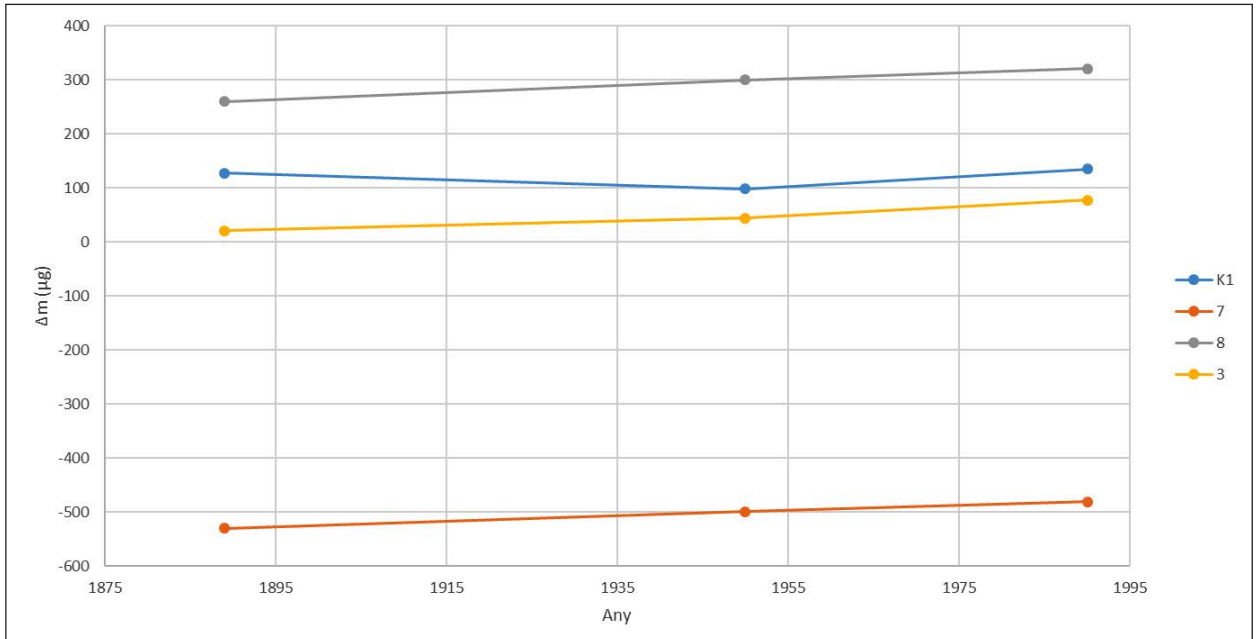


FIGURA 9. Evolució de la deriva respecte a l'IPK de les còpies del prototip (la número 3 correspon a la còpia d'Espanya).
 FONT: Elaboració pròpia amb les dades de Girard (1994).

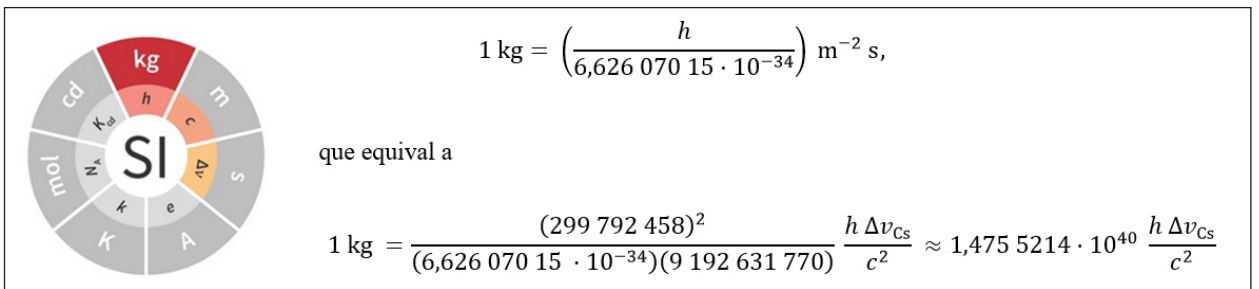


FIGURA 10. Definició numèrica del kilogram i la implicació de les altres constants en el càlcul.
 FONT: Adaptat de Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), *SI base unit: kilogram (kg)* (en línia), <<https://www.bipm.org/en/si-base-units/kilogram>>.

(h , Δv_{Cs} , c), i per això no s'expressa en unitats, que queden implícites amb les constants.

Destaquem que ara el kilogram, amb la nova definició, ja no depèn d'un artefacte (IPK). Un dels mètodes experimentals per trobar el kilogram es basa en la balança de Kibble (Robinson i Schlamminger, 2016), en què la massa es troba per comparació del watt elèctric i el watt mecànic (figura 11), utilitzant una balança.

En el procés experimental es fa servir una balança, en un dels plats de la qual es crea un camp magnètic permanent, generat per un imant, i sota el plat disposem d'una bobina per la qual circula corrent elèctric. En l'altra banda de la balança es disposa l'objecte del qual volem conèixer la massa. La realització experimental de la definició consisteix a fer passar corrent per la bobina, que, amb el camp magnètic, genera una força induïda elèctricament. Quan aquesta força iguali el pes de l'objecte, serem capaços de trobar la massa de l'objecte. Si resollem les equacions, obtenim que la massa m és:

$$m = \frac{nn' f_j f'_j}{r g v} \frac{1}{4} h.$$

on n i n' són el nombre d'unions Josephson emprades per obtenir un valor de tensió comparable a la generada en la balança. f_j i f'_j són les freqüències de microones emprades en les unions Josephson per conèixer la tensió. El quocient del pont de resistències utilitzat està inclòs en r .

El corrent elèctric

La definició del corrent elèctric prèvia al canvi era: «L'amperè és el corrent constant que produiria una força a igual a 2×10^{-7} newtons per metre de longitud entre dos conductors rectes i paral·lels de longitud infinita, col·locats a 1 metre de distància al buit, on la secció circular és insignificant».³ La mateixa definició implica que la permeabilitat elèctrica en el buit, μ_0 , tingui el valor de $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Com és evident, no existeixen conductors de longitud infinita, i, per tant, era necessària una nova redefinició.

3. Definició extreta d'<https://www.bipm.org/en/history-si/ampere>. La traducció és de l'autor.

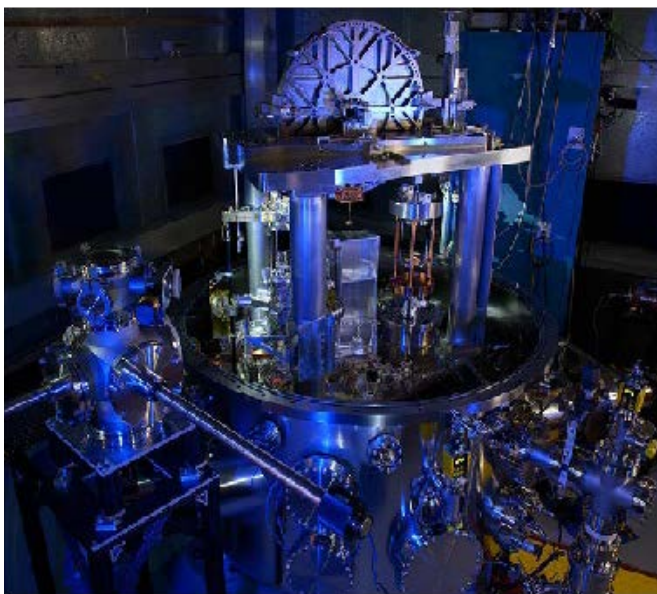


FIGURA 11. Fotografia d'una balança de Kibble, o balança de watt, en què la massa es troba per comparació del watt elèctric i el watt mecànic.

FONT: J. Lee/NIST, *Watt balance* (en línia), <<https://www.nist.gov/image/wattbalancersicover-3000resizedjpg>>.

En la nova definició del corrent elèctric, a banda d'expressar el valor de la càrrega elemental, s'utilitza la constant necessària per al segon, que es detalla en la figura 12: «L'ampere, símbol A, és la unitat del SI de corrent elèctric. Es defineix fixant el valor numèric de la càrrega elemental, e , com a $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ quan s'expressa en la unitat C, que és igual a A·s, on la s fa referència al segon, definit en funció de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ».⁴ Tal com es detalla en la definició, ara un ampere és el corrent elèctric que correspon al flux d' $1 / 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ càrregues elementals per segon.

En l'equació de la part superior de la figura 12 es detalla l'equivalència de l'ampere respecte a la constant de càrrega elèctrica amb unitats. En la part inferior es detalla l'equivalència de l'ampere respecte a les constants fonamentals (e , $\Delta\nu_{\text{Cs}}$), i per això no s'expressa en unitats, que queden implícites amb les constants.

La temperatura termodinàmica

La definició prèvia de la unitat de la temperatura termodinàmica era: «El kelvin, unitat de temperatura termodinàmica, és la fracció $1 / 273,16$ de la temperatura termodinàmica del punt triple de l'aigua».⁵

La nova definició és (figura 13): «El kelvin, símbol K, és la unitat del SI de temperatura termodinàmica. Es defineix fixant el valor numèric de la constant de Boltzmann, k , com a $1,380\,649 \times 10^{-23}$ quan s'expressa en la unitat J K^{-1} , que és igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, on el kilogram, el metre i el segon es defineixen en funció de h , c i de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ».⁶ Per tant, ara es defi-

neix 1 kelvin com un canvi d'energia, fixant la constant de Boltzmann, que és una constant proporcional entre la temperatura termodinàmica i l'energia tèrmica associada.

En l'equació de la part superior de la figura 13 es detalla l'equivalència del kelvin respecte a la constant de Boltzmann amb unitats. En la part inferior es presenta l'equivalència del kelvin respecte a les constants fonamentals (h , $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, k), i en què les unitats queden implícites amb les constants.

El canvi no té efecte immediat sobre la seva mesura pràctica ni sobre la traçabilitat metrològica de les mesures de temperatura basades en l'escala internacional de temperatura de 1990 (EIT-90), en què els punts fixos, com el punt triple del mercuri ($-189,344\,2\,^{\circ}\text{C}$) o la solidificació de la plata ($961,78\,^{\circ}\text{C}$), que són els valors extrems de l'escala, són exactes respecte a l'escala de temperatura, i, per tant, no tenen incertesa associada. Malgrat això, aquesta redefinició posa les bases per a futures millores, ja que ara la definició no depèn de cap material ni posa restriccions tecnològiques.

La quantitat de substància

La definició prèvia de la unitat per la quantitat de substància era: «El mol és la quantitat de substància d'un sistema, el qual conté tantes entitats com àtoms en 0,012 kilograms de carboni 12; el seu símbol és el mol».⁷ I es complementava indicant que: «Quan s'utilitza el mol, les entitats elementals han de ser especificades, i poden ser àtoms, molècules, ions, electrons, altres partícules o grups específics de tals partícules».⁸

4. Definició extreta d'<https://www.bipm.org/en/si-base-units/ampere>. La traducció és de l'autor.

5. Definició extreta d'<https://www.bipm.org/en/history-si/kelvin>. La traducció és de l'autor.

6. Definició extreta d'<https://www.bipm.org/en/si-base-units/kelvin>. La traducció és de l'autor.

7. Definició extreta d'<https://www.bipm.org/en/history-si/mole>. La traducció és de l'autor.

8. Definició extreta d'<https://www.bipm.org/en/history-si/mole>. La traducció és de l'autor.

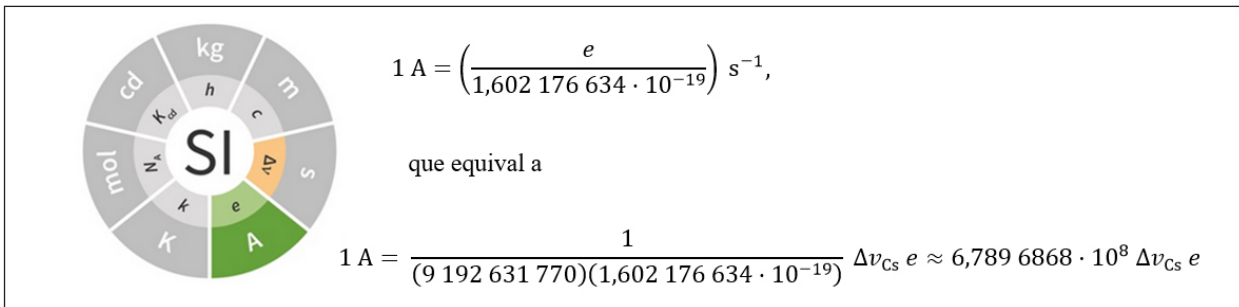


FIGURA 12. Definició numèrica de l'ampere i la implicació de les altres constants en el càlcul.
 FONT: Adaptat de Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), *SI base unit: ampere (A)* (en línia), <<https://www.bipm.org/en/si-base-units/ampere>>.

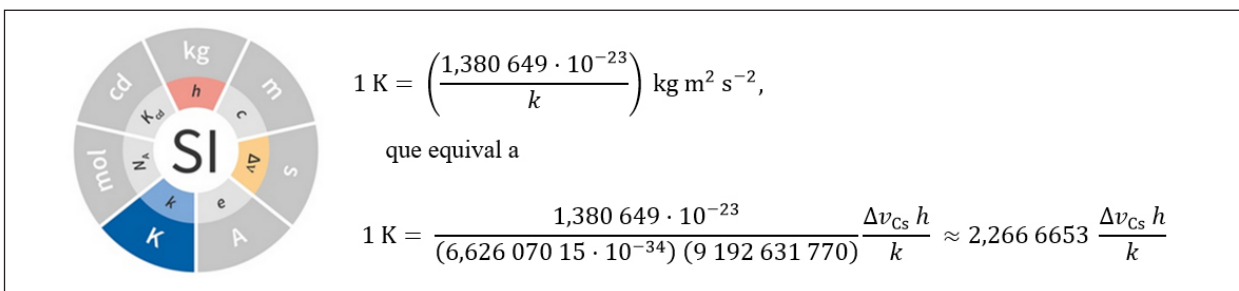


FIGURA 13. Definició numèrica del kelvin i la implicació de les altres constants en el càlcul.
 FONT: Adaptat de Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), *SI base unit: kelvin (K)* (en línia), <<https://www.bipm.org/en/si-base-units/kelvin>>.

De la definició prèvia existeix una dependència de la massa de la definició del mol, i aquest fet és el que es va corregir en la nova definició.

La nova definició és (figura 14): «El mol, amb símbol mol, és la unitat de quantitat de matèria del SI. Un mol conté exactament $6,022\ 140\ 76 \cdot 10^{23}$ entitats elementals. Aquest nombre, anomenat *nombre d'Avogadro*, és el valor numèric fixat de la constant d'Avogadro, N_A , quan s'expressa en mol^{-1} .

La quantitat de substància, amb símbol n , d'un sistema és una mesura del nombre d'entitats elementals especificades. Una entitat elemental pot ser un àtom, una molècula, un ió, un electró, o qualsevol altra partícula o grup especificat de partícules».⁹

En l'equació de la figura 14 es detalla l'equivalència del mol respecte a la constant d'Avogadro (N_A) sense unitats.

Conclusió

La finalitat de l'article és introduir el sistema internacional de mesures (SI), que hem vist que va néixer el 1956, i posar en coneixement de la comunitat el canvi fonamental realitzat el 20 de maig de 2019 amb les redefinicions de les set unitats de les magnituds, en les quals ara les constants de la natura no tenen incertesa associada. Tot aquest procés de millora neix d'una frase inspiradora, arran de la Revolució

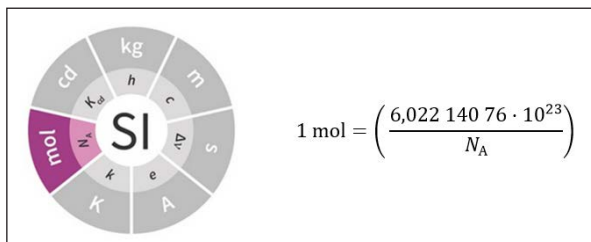


FIGURA 14. Definició numèrica del mol, en què veiem que no necessita cap altra constant.
 FONT: Adaptat de Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), *SI base unit: mole (mol)* (en línia), <<https://www.bipm.org/en/si-base-units/mole>>.

ció Francesa: «A tous les temps, à tous les peuples», i que resumeix la finalitat del metròlegs que desenvolupen la seva tasca en la metrologia científica.

Cal assenyalar que aquest canvi de paradigma ha estat possible gràcies als avenços de la tecnologia en el món científic. Seria un error pensar que aquestes definicions seran inalterables, ja que, a mesura que la tecnologia vagi progressant, permetrà noves realitzacions experimentals, que donaran lloc a una evolució i millora de les mateixes definicions.

Bibliografia

BAJET ROYO, M. (2009). «La constitucionalització dels pesos, mides i mesures de Barcelona per tot Catalunya a les Corts de 1585». A: *XI Congrés d'Història de Barcelona - La Ciutat en Xarxa* [en línia]. <<https://ajuntament.barce>>

9. Definició extreta d'<https://www.bipm.org/en/si-base-units/mole>. La traducció és de l'autor.

- lona.cat/arxiu municipal/arxiu historic/sites/default/files/pdfs_interns/XI CONGRES_bajetc.pdf> [Consulta: 8 març 2022].
- GIRARD, G. (1994). «The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988-1992)». *Metrologia* [en línia], vol. 31, núm. 4, p. 317-336. <<https://doi.org/10.1088/0026-1394/31/4/007>>.
- MENDOZA, J. (s. d.). *First day cover commemorating the centenary of the Convention du Mètre (Treaty of the Meter)* [en línia]. França: Witco Stam Collection. Science History Institute Archives. <<https://digital.sciencehistory.org/works/qz20ss53m>> [Consulta: 8 març 2022].
- ROBINSON, I. A.; SCHLAMMINGER, S. (2016). «The watt or Kibble balance: A technique for implementing the new SI definition of the unit of mass». *Metrologia* [en línia], vol. 53, núm. 5, A46A74. <<https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/a46>>.
- СТОК, М. (2011). «The watt balance: Determination of the Planck constant and redefinition of the kilogram». *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [en línia], vol. 369, p. 1953. 3936-3953. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0184>>.