

# Passat, present i futur del Sistema Internacional d'Unitats

**Pepe Pedro**

Professor de Física i Química · IES Matemàtic V. Caselles Costa

**Quan mesurem** o calculem una magnitud física determinada, com, per exemple, la longitud, la massa, la temperatura o la velocitat, és necessari expressar-la com el producte d'un número i una unitat. Així per exemple, podem dir que la longitud d'un cotxe és de 3 m o que la seua velocitat és de 72 km/h. Aquest fet, fa necessari comptar amb un conjunt d'unitats ben definit, accessible a tot el món i que siga reconegut universalment. A l'hora d'establir un sistema d'unitats de mesura, és necessari primer escollir convenientment unes magnituds i unitats bàsiques o fonamentals, a partir de les quals ja es definiran la resta de magnituds i unitats derivades.

En la segona meitat del segle XVIII el nombre d'unitats de mesura de longitud i pes a Europa era tan gran que dificultava el desenvolupament del comerç, la indústria i la ciència. A França, per exemple, la vara de mesura variava d'una província a una altra, i fins i tot en els territoris d'una mateixa província. Van ser les reformes fetes durant la Revolució Francesa les que posaren les bases del moderns sistemes d'unitats de mesura. Entre elles, va ser la de donar el 1791 la primera definició de metre com «la deumilionèsima part del quadrant del meridià terrestre», concretament, la distància a través de la superfície de la Terra des del Pol Nord fins a l'Equador passant pel meridià de París. El metre complia les tres exigències que s'havien establert a aquesta unitat fonamental: universal, extreta de la natura i invariable. La titànica missió de mesurar el quadrant del meridià ja va ser tractada en diferents articles dels números 9 i 10 de DAUALDEU.

El 1795, com a conseqüència de la demora en les mesures del meridià, s'estableix mitjançant un Decret de l'Assemblea Nacional Francesa un metre provisional basat en mesures del meridià d'uns 50 anys i que eren menys exactes que les que s'estaven realitzant en aquest moment. Aquest decret incloïa les definicions de metre, kilogram i litre, així com els prefixes decimals. Del metre derivarien la resta d'unitats de mesura. La unitat de massa, el quilogram, es va definir com la massa d'un decímetre cúbic (1 litre) d'aigua destil·lada a la temperatura a la qual aquesta presenta la seua màxima densitat (4 °C). Es van proposar prefixes per a indicar els múltiples i submúltiples de 10, els primers provenen d'arrels gregues (*deca*, *hecto*, *quilo*, *miria*) i els segons d'arrels llatines (*deci*, *centi*, *mili*). Quedava així establert el *Sistema Mètric*, que va començar a anomenar-se *Sistema Mètric Decimal* (SMD).

Una vegada conclosa la mesura del meridià, el 22 de juny de 1799 en un Congrés Internacional convocat per l'Acadèmia de Ciències de París a la qual assistirien savis d'altres països, en una gran cerimònia, es presenten el metre patró i el quilogram patró, una barra i un cilindre construïts amb platí i iridi. A cadascun d'aquests savis estrangers se li va donar un facsímil de ferro.

A poc a poc, el Sistema Mètric comença a introduir-se en els diferents països. El 1816, es va declarar d'ús obligatori als Països Baixos. A França, després de ser temporalment relegat durant la Restauració, es fa d'ús obligatori el 1837. A Espanya, va ser d'utilització obligatòria el 1849 per ordre d'Isabel II. El 1864, es va autoritzar el seu ús a Anglaterra i el 1866, en els Estats Units. Ara bé, una cosa és imposar per llei l'ús d'un sistema d'unitats i una altra és fer que la gent canvie els seus patrons i l'utilitze.

El 1832, l'eminent matemàtic, físic, astrònom i geodesista alemany, Gauss va promoure insistentment l'aplicació del Sistema Mètric juntament amb el segon, com a unitat bàsica de temps, definit en astronomia com la fracció  $1/86400$  del dia solar mitjà, com un sistema coherent d'unitats per a les ciències físiques. El mateix Gauss va ser el primer a mesurar el valor del camp magnètic terrestre utilitzant tres unitats mecàniques: mil·límetre, gram i segon. Anys després, Gauss i Weber van començar a estendre les mesures a altres magnituds elèctriques.

Continuant la tasca de Gauss, el 1860, Maxwell i Thomson van desenvolupar les mesures en el camp de l'electricitat i el magnetisme creant l'Associació Britànica per a l'Avanç de la Ciència (BASS, hui BA). Van formular el requisit d'un sistema coherent d'unitats amb unitats de base i unitats derivades. El 1874, el BAAS va introduir el sistema CGS, un sistema unitari tridimensional coherent basat en les tres unitats mecàniques (centímetre, gram i segon) i que utilitza prefixes que van de *micro* a *mega* per a expressar múltiples i submúltiples decimals. El posterior desenvolupament de la física com a ciència experimental, es va basar en gran part en aquest sistema. Les unitats del CGS en els camps de l'electricitat i el magnetisme van presentar inconvenients, ja que eren necessaris dos sistemes d'unitats, un CGS anomenat electrostàtic i un altre, el CGS electromagnètic. Posteriorment, van ser unificats en un altre sistema: el CGS Gaussià.

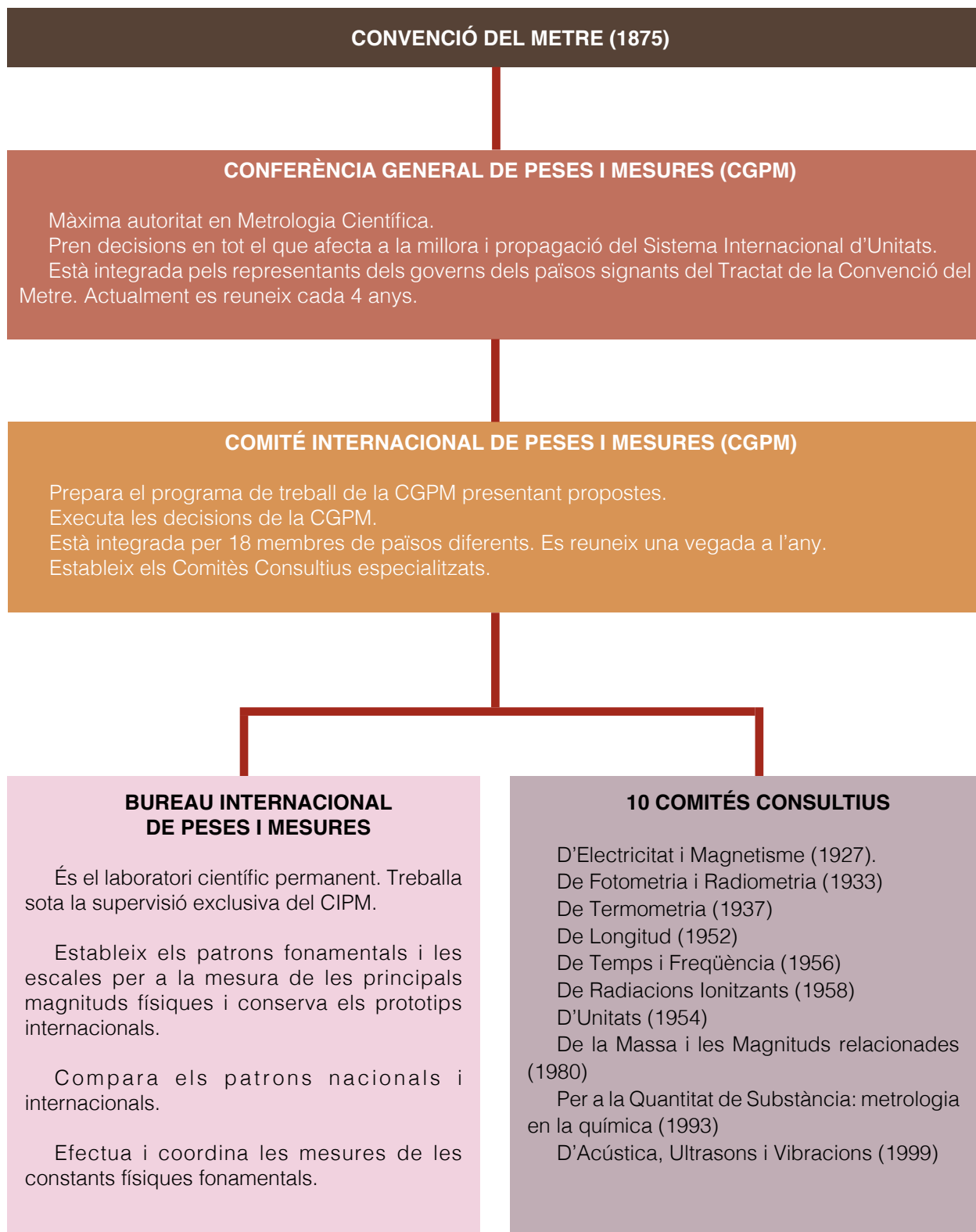
L'adopció universal del Sistema Mètric es va

fer mitjançant el Tractat anomenat “Convenció del Metre”, un acord firmat per desset països en França el 20 de maig de 1875.

En aquesta Convenció, s’estableix també la creació d’una organització científica que posseïes, per una part, una estructura permanent que permetera als països membres tindre una acció comú sobre totes les qüestions que es relacionen amb les unitats de mesura i, per l’altra, que assegurara la unificació mundial de les mesures físiques.

Els organismes que es van crear i que formen la Convenció del metre són: La Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM), el Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM) i l’Oficina Internacional de Pesos i Mesures (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM).

L’il·lustre militar i geodesista nascut a Barcelona, Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero, va jugar un paper molt important en la creació del BIPM a més de ser el primer president de la CIPM.



El CGS no determina una unitat bàsica addicional per a les magnituds elèctriques.

El 1880, el BAAS i el Congrés Internacional Elèctric, predecessor de la Comissió Electrotècnica Internacional (CEI) aprovaren un conjunt coherent d'unitats pràctiques. Entre elles estaven: l'ohm, per a la resistència elèctrica; el volt, per a la força electromotriu; i l'ampere, per a la intensitat del corrent elèctric.

La 1<sup>a</sup> CGPM es va celebrar el 1889 i en ella es van establir els prototips internacionals del metre i el kilogram, construïts amb un aliatge de platí i iridi (10%). El prototip internacional del kg, també conegut com PIK o "Gran k", és un cilindre de 39 mm d'altura i el mateix diàmetre. Està guardat des del 1899 sota tres campanes de vidre en una caixa fort en el BIPM en Sèvres, en les afores de París. Allí es guarda també el prototip del metre, una barra de 102 cm de longitud amb dues marques que delimitaven el metre. La barra té una secció en X o secció Tresca, en honor a l'enginyer francès Henry Tresca, creador del disseny ideat per a donar al prototip la màxima rigidesa amb el mínim material.

El metre i el kilogram juntament amb el segon astronòmic com a unitat de temps, constituïen un sistema d'unitats mecàniques tridimensional similar al sistema CGS, però amb les unitats de base metre, kilogram i segon, el sistema es va anomenar MKS.

El 1901, Giorgi va demostrar que és possible combinar les unitats mecàniques d'aquest sistema metre-kilogram-segon amb les unitats elèctriques pràctiques per a formar un únic sistema coherent tetradimensional afegint a las tres unitats de base una quarta unitat de naturalesa elèctrica tal com l'ampere o l'ohm. La proposta de Giorgi va ser debatuda a fons per la IEC (la Comissió Electrotècnica Internacional), la Unió Internacional de Física Pura i Aplicada (IUPAP) i altres organitzacions internacionals. Com a conseqüència d'aquests debats el Comitè Consultiu d'Electricitat (CCE) va proposar el 1939 l'adopció d'un sistema quadridimensional basat en el metre, quilogram, segon i ampere, el sistema MKSA o Sistema Giorgi, una proposta aprovada per el CIPM el 1946.

La 9a CGPM de 1948, va encarregar al CIPM estudiar un conjunt complet de regles per a les unitats de mesura. A tal efecte, va realitzar una enquesta internacional a fi d'arreglar informació en l'àmbit científic, tècnic i de l'educació. La 10a CGPM, el 1954, va aprovar la introducció de les unitats ampere, el kelvin i la candela como unitats base, per a les magnituds: corrent elèctric, temperatura termodinàmica i intensitat lluminosa, respectivament. Aquestes tres unitats s'afegien al metre, kilogram i segon, quedant sis unitats bàsiques.

S'acabava de forjar el Sistema Internacional d'Unitats (SI), encara que oficialment el nom li'l van posar el 1960 en la 11<sup>a</sup> CGPM, on també es van establir les regles per als prefixos i les unitats deri-

vades. A fi de no dependre d'un patró que poguera perdre's o patir deformacions, en la mateixa conferència es va redefinir el metre com a 1650763,73 vegades la longitud d'ona, en el buit, de la radiació corresponent a la línia ataronjada de l'espectre de l'àtom de criptó-86.

Des de la seua implantació el SI no ha parat de perfeccionar-se.

La definició de segon basada en la rotació diària de la Terra no era satisfactòria degut a la inconstància de la velocitat de rotació de la Terra. El 1960 es va substituir per una altra basada en la duració de l'any tròpic. Finalment, el 1967, la 13a CGPM el va definir com la duració de 9192631770 períodes de la radiació corresponent a la transició entre els dos nivells hiperfins de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133. A llarg termini és possible que es trie una altra transició electrònica per a definir el segon.

Per a l'estudi de les reaccions químiques és convenient disposar d'una magnitud que depenga exclusivament del número de molècules o àtoms presents, aquesta magnitud és el mol. El 1971, en la 14a CGPM, després de llargues discussions entre físics i químics es va incloure el mol com a unitat bàsica de la magnitud quantitat de substància. Un mol és la quantitat de substància d'un sistema que conté tantes entitats elementals com àtoms hi ha en 0,012 kg de carboni 12. Les entitats elementals poden ser molècules, àtoms, ions, etc.

Amb la introducció del mol finalment són set les unitats bàsiques del SI.

En la XVII CGPM del 1983, el metre es va redefinir utilitzant la velocitat de la llum en el buit, que és una constant física. D'aquesta manera, el metre és la longitud del trajecte recorregut per la llum en el buit durant un interval de temps de  $1/299792458$  segon.

El kilogram és la última unitat del SI que continua dependent d'un objecte material. Cada 40 anys aproximadament, es trau "el Gran K" per comparar-lo amb les còpies patró i calibrar les còpies que s'envien a les 51 nacions signants del "Conveni del Metre". S'ha trobat que després d'un segle la majoria de les rèpliques tenien 50 micrograms més de massa que l'original. Aquesta pèrdua de massa pot semblar insignificant, però en els nivells de precisió en què treballa la ciència actual és una quantitat enorme. A més, aquesta incertesa influeix també en altres unitats tals com el newton, que depèn del kg o, el joule, que depèn del newton.

El 2007, en la 23a CGPM es va instar al CIPM a redefinir totes les unitats bàsiques del SI en funció de les constants físiques naturals, que són invariants. Per a aquest procés, el BIPM ha considerat dues etapes. En la primera, diferents laboratoris metrològics determinaran les constants físiques amb el valor més exacte possible amb el SI actual. Mentre que en la segona, una vegada fixades les constants físiques, a partir d'elles es definiran les noves unitats del SI.

De les set constants físiques considerades per a la redefinició de les unitats bàsiques, tres d'elles no canviaran els valors que tenen actualment: la velocitat de la llum  $c$ , el valor de la freqüència de transició entre els dos estats de l'estructura hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de Cesi 133 i l'eficàcia lluminosa d'una radiació monocromàtica de freqüència a  $540 \cdot 10^{12}$  Hz i que té una intensitat radiant en aquesta direcció de  $1/683$  watt per unitat d'angle sòlid. Per a les altres quatre constants es determinarà el valor més exacte possible i es fixaran els valors exactes de: la constant de Planck  $h$ , de la càrrega elemental  $e$ , la constant de Boltzmann  $k$ , i la constant d'Avogadro,  $N_A$ . Aquestes constants no es tornaran a determinar, ja que s'entraria en un cercle vicios.

Ningú nosap segur per què «el Gran K» perd massa, però aquesta incertesa és una de les raons per la qual l'òrgan de govern del BIPM va decidir el 2011 establir un nou patró de masses. El nou kg es redefinirà, segons està anunciat, el 2018. Estarà basat en la constant de Planck,  $h$ , el valor de la qual relaciona l'energia,  $E$ , d'un fotó amb el valor de la seua freqüència  $f$ ,  $E = h \cdot f$ . Aquesta constant presenta unitats d'energia i temps, i pot relacionar-se amb l'equació d'Einstein  $E = mc^2$  (energia = massa per velocitat de la llum al quadrat). S'ha mesurat la constant de Planck, utilitzant una balança de Watts d'alta tecnologia o balança Kibble amb una incertesa de  $34/1000.000.000$ , incertesa que equival a 1,25 cm en 370 km. Aquesta balança després s'aprofitarà per a calibrar prototips de kg substituïnt al Gran K. La revista Nature ha comparat la complexitat d'aquests experiments de la mesura la constant de Planck amb la detecció del Bosó de Higgs o de les ones gravitacionals.

La definició actual d'ampere (1948) com «la intensitat de corrent constant que quan circula per dos fils conductors paral·lels, rectilinis, de longitud infinita i secció circular negligible, separats una distància d'1 m en el buit produiria entre aquests conductors una força de  $2 \cdot 10^{-7}$  N per metre de longitud de fil», resulta insatisfactòria i complicada. A més, sols es pot reproduir en el laboratori de manera aproximada, cosa que canviarà quan es redefinesca en funció de la càrrega elemental,  $e$ , constant física que equival a la càrrega elèctrica d'un electró o d'un protó.

Una altra unitat amb una definició (1979) enrevessada és la candela, «és la intensitat de la llum, emesa en una direcció determinada, per una font de llum monocromàtica de freqüència igual a  $540 \cdot 10^{12}$  Hz i que té una intensitat radiant, en aquesta direcció, de  $1/683$  watt per unitat d'angle sòlid (estereoradiant)». Aquesta peculiar definició és deguda a que s'ha volgut fer coincidir amb el valor numèric històric d'aquesta unitat que fins el 1948 s'havia basat en patrons de flama o de metalls incandescents.

La unitat de temperatura termodinàmica actual (1967), el kelvin, està basada en l'escala Kelvin la qual parteix del zero absolut, la mínima temperatura possible,  $-273,15$  °C. Està definit «com a  $1/273,16$  de la temperatura termodinàmica del punt triple de l'aigua», punt en el que es fa possible l'equilibri líquid, gas i sòlid. El kelvin serà redefinit en funció de la constant de Boltzmann,  $k$ , que relaciona la temperatura amb l'energia tèrmica del sistema:  $E = kT$

La redefinició de les unitats del SI no suposarà cap canvi per a les mesures quotidianes, però sí que tindrà una gran importància en el món de la ciència i la tecnologia.

Per a saber més

- Web del BIPM: <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
- "Un nuevo kilogramo". Ian Robson. Revista Investigación y Ciencia. Febrer 2007
- "Revisión del Sistema Internacional de Unidades". Robert Wynands i Ernst O. Göbel. Revista Investigación y Ciencia. Juliol 2010.
- "La renovación del kilogramo". Knyvl Sheit. Revista Investigación y Ciencia. Setembre 2016
- "El nuevo kilogramo". Tom Folger. Revista Investigación y Ciencia. Abril 2017.



# MAGNITUDS I UNITATS BÀSIQUES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

LONGITUD (l) metre (m)	
Definició històrica (1791)	El metre és la deumilionèsima part del quadrant del meridià terrestre que passa per París.
Definició actual (1983)	La distància que recorre la llum en 1/299792458 segons.
Definició proposada	S'estableix fixant el valor la velocitat de la llum en el buit, $c$ , exactament igual a 299792458 metres per segon.
TEMPS (t) segon (s)	
Definició històrica	1 segon és la fracció 1/86400 del dia solar mitjà.
Definició actual (1967)	La duració de 9192631770 períodes de la radiació corresponent a la transició entre els dos nivells hiperfins de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133.
Definició proposada	S'estableix fixant el valor de la freqüència de transició entre els dos estats de l'estructura hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de Cesi 133 en repòs i a una temperatura de 0 K exactament igual a 9192631770 Hz.
MASSA (m) quilogram (kg)	
Definició històrica (1795)	Massa d'un decímetre cúbic d'aigua destil·lada a la temperatura a la qual aquesta presenta la seua màxima densitat.
Definició actual (1889)	Massa del prototip internacional, "el gran k", un cilindre de platí i iridi guardat en el BIPM, en Sèvres, prop de París.
Definició proposada	S'estableix fixant el valor de la constant de Planck, $h$ , exactament igual a $6,62606896 \times 10^{-34}$ J·s.
INTENSITAT DEL CORRENT ELÈCTRIC (I) ampere (A)	
Definició actual (1948)	Intensitat de corrent constant, que quan circula per dos fils conductors paral·lels, rectilinis, de longitud infinita i secció circular negligible, separats una distància d'1 m en el buit produiria entre aquests conductors una força entre ells de $2 \cdot 10^{-7}$ N per metre de longitud de fil.
Definició proposada	S'estableix fixant el valor de la càrrega elemental o càrrega d'un electró, $e$ , exactament igual a $1,602176487 \times 10^{-19}$ C.
TEMPERATURA (T) kelvin (K)	
Definició actual (1967)	És equivalent a 1/273,16 de la temperatura termodinàmica del punt triple de l'aigua.
Definició proposada	S'estableix fixant el valor de la constant de Boltzmann, $k$ , exactament igual a $1,3806504 \times 10^{-23}$ J/K.
INTENSITAT DE LA LLUM ( $I_v$ ) candela (cd)	
Definició actual (1979)	Intensitat de la llum emesa en una direcció determinada, per una font de llum monocromàtica de freqüència igual a $540 \cdot 10^{12}$ Hz i que té una intensitat radiant en aquesta direcció de 1/683 watt per unitat d'angle sòlid (estereoradiant).
Definició proposada	S'estableix fixant el valor la intensitat espectral de la radiació monocromàtica de $540 \cdot 10^{12}$ Hz siga de 683 lumen/watt.
QUANTITAT DE SUBSTÀNCIA (n) mol (mol)	
Definició actual (1971)	La quantitat de substància que conté tantes entitats elementals com àtoms hi ha en 0,012 kg de carboni 12.
Definició proposada	S'estableix fixant el valor del número d'Avogadro, $N_A$ , exactament igual a $6,02214179 \times 10^{23}$ partícules/mol.

Les X que apareixen en la taula estan encara per decidir-se amb exactitud.