

El sistema internacional d'unitats

Traducció de la 9a edició 2019



Versió catalana

**El sistema internacional
d'unitats (SI)**

Societat Catalana de Física
Societat Catalana de Tecnologia
Institut d'Estudis Catalans

**Oficina Internacional
de Pesos i Mesures**

El sistema internacional d'unitats (SI)

**9a edició
2019**

Traducció al català
2022

v1.08

Oficina Internacional de Pesos i Mesures, autor

[Système international d'unités (SI). Català]

El Sistema Internacional d'Unitats (SI). — Primera edició

Títol original: Système international d'unités (SI), versió 1.08 de la 9a edició 2019. — Índex

ISBN 9788499656632

I. Parellada Salvatella, Carme, traductor II. Institut d'Estudis Catalans, entitat editora III. Títol

1. Sistema mètric

006.915.1

Aquest document ha estat traduït per iniciativa de la Societat Catalana de Física i la Societat Catalana de Tecnologia (Secció Catalana de Metrologia), filials de l'Institut d'Estudis Catalans, a partir de la versió 1.08 de la 9a edició 2019 de l'opuscle publicat per l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures (BIPM, Bureau International des Poids et Mesures) en les versions francesa i anglesa. El BIPM no accepta cap responsabilitat derivada de la idoneïtat, l'exactitud, la integritat o la qualitat de la informació i dels materials oferts en qualsevol traducció. L'única versió oficial és la publicada pel BIPM.

Amb el suport del Departament de Cultura



Generalitat de Catalunya
**Departament
de Cultura**

Traducció del francès: Carme Parellada Salvatella

Supervisió: Eugeni Vilalta López

Editat per l'Institut d'Estudis Catalans

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: juliol del 2022

Text revisat lingüísticament per la Unitat d'Edició del Servei Editorial de l'IEC

ISBN: 978-84-9965-663-2

Dipòsit Legal: B 15363-2022

DOI: 10.2436/10.2001.02.1

L'opuscle sobre el sistema internacional d'unitats (SI) es distribueix d'acord amb les condicions de la llicència Creative Commons Attribution 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/>), que en permet l'ús sense restriccions, la distribució i la reproducció en qualsevol mitjà, sempre que se n'esmentin els autors originals i la font, es proporcioni un enllaç a la llicència de Creative Commons i s'indiqui si s'hi han dut a terme canvis.

L'Oficina Internacional de Pesos i Mesures i la Convenció del Metre

L'Oficina Internacional de Pesos i Mesures (BIPM, del francès Bureau International des Poids et Mesures) va ser creada per la Convenció del Metre signada a París el 20 de maig de 1875 per disset estats, en la darrera sessió de la Conferència diplomàtica del Metre. La Convenció es va modificar el 1921.

El BIPM té la seu a prop de París, al recinte (43 520 m²) del Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) que el Govern francès va posar a disposició seva. Del seu manteniment econòmic, se'n fan càrrec d'una manera conjunta els estats membres de la Convenció del Metre.

La missió del BIPM és assegurar la unificació mundial dels mesuraments. Té els objectius següents:

- Representar la comunitat metrològica internacional per tal de maximitzar-ne el reconeixement i l'impacte.
- Esdevenir un centre de col·laboració científica i tècnica entre els estats membres, permetent-los desenvolupar aptituds per a les comparacions internacionals de mesura, sota el principi dels costos compartits.
- Coordinar el sistema mundial de mesura, garantint la comparabilitat i el reconeixement a escala internacional dels resultats de les mesures.

El BIPM funciona sota la supervisió exclusiva del Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM) que, al seu torn, es troba sota l'autoritat de la Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM) a qui presenta el seu informe sobre la feina duta a terme pel BIPM.

La Conferència General aplega delegats de tots els estats membres i es reuneix normalment cada quatre anys amb l'objectiu de:

- Discutir i iniciar les mesures necessàries per a assegurar la propagació i la millora del sistema internacional d'unitats (SI), forma moderna del sistema mètric.
- Confirmar els resultats de les noves determinacions metrològiques fonamentals i adoptar diverses resolucions científiques d'abast internacional.
- Prendre totes les decisions importants referents al finançament, l'organització i el desenvolupament del BIPM.

El Comitè Internacional comprèn divuit membres pertanyents a estats diferents. Actualment es reuneixen un cop l'any. La seva oficina presenta als governs dels estats membres un informe anual sobre la situació administrativa i financera del BIPM. La tasca principal del Comitè Internacional és assegurar la unificació mundial de les unitats de mesura, tant d'una manera directa com presentant propostes a la CGPM.

El 20 de maig de 2019 hi havia cinquanta-nou estats membres: Alemanya, Aràbia Saudita, Argentina, Austràlia, Àustria, Bèlgica, Brasil, Bulgària, Canadà, Colòmbia, Corea del Sud, Croàcia, Dinamarca, Egipte, Emirats Àrabs Units, Eslovàquia, Eslovènia, Espanya, Estats Units d'Amèrica, Finlàndia, França, Grècia, Hongria, Índia, Indonèsia, Iran, Iraq, Irlanda, Israel, Itàlia, Japó, Kazakhstan, Kènia, Lituània, Malàisia, Mèxic, Montenegro, Noruega, Nova Zelanda, Països Baixos, Pakistan, Polònia, Portugal, Regne Unit, Romania, Rússia, Sèrbia, Singapur, Sud-àfrica, Suècia, Suïssa, Tailàndia, Tunísia, Turquia, Txèquia, Ucraïna, Uruguai, Xile i Xina.

Associats a la Conferència General de Pesos i Mesures hi ha quaranta-dos estats i entitats econòmiques: Albània, Azerbaidjan, Bangladesh, Bielorússia, Bolívia, Bòsnia i Hercegovina, Botswana, Comunitat del Carib (CARICOM), Costa Rica, Cuba, Equador, Estònia, Etiòpia, Filipines, Geòrgia, Ghana, Hong Kong (Xina), Jamaica, Kuwait, Letònia, Luxemburg, Malta, Maurici, Moldàvia, Mongòlia, Namíbia, Oman, Panamà, Paraguai, Perú, Qatar, República de Macedònia del Nord, Seychelles, Síria, Sri Lanka, Sudan, Taiwan, Tanzània, Uzbekistan, Vietnam, Zàmbia i Zimbàbue.

Les activitats del BIPM, que al principi es limitaven a les mesures de la longitud i la massa i a altres estudis metrofògics relacionats amb aquestes magnituds, es van estendre als patrons elèctrics (1927), fotofògics i radiofògics (1937), de les radiacions ionitzants (1960), a les escales de temps (1988) i a la química (2000). Amb aquesta finalitat, el 1929, es van ampliar els laboratoris originals, construïts entre 1876 i 1878. Els anys 1963 i 1964 es van construir nous edificis per als laboratoris de la secció de radiacions ionitzants; el 1984, per a les feines relacionades amb els làsers, i el 1988, per a la biblioteca i oficines. El 2001 es van inaugurar un edifici per al taller, oficines i sales de reunions.

Treballen als laboratoris del BIPM al voltant de quaranta-cinc físics i tècnics. Sobretot duen a terme recerca metrofògica, comparacions internacionals de realitzacions d'unitats i calibratges de patrons. Aquests treballs són objecte d'un informe anual per part del director.

Davant l'extensió de les tasques confiades al BIPM el 1927, el CIPM va establir, amb la denominació *comitès consultius*, els òrgans destinats a proporcionar-li informació sobre els assumptes que aquest els remet per a estudi o assessorament. Aquests comitès consultius, que poden formar grups de treball permanents o temporals per a l'estudi de temes concrets, són els encarregats de coordinar els treballs internacionals realitzats en els seus camps respectius i de proposar al CIPM recomanacions relacionades amb les unitats.

Els comitès consultius tenen un reglament comú (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*) i es reuneixen a intervals irregulars. El CIPM designa el president de cada comitè consultiu, que habitualment és un membre del CIPM. Els comitès consultius tenen com a membres laboratoris de metrologia i instituts especialitzats, la llista dels quals és establerta pel CIPM, que envien els delegats que han escollit. També s'hi inclouen membres nominalment designats pel CIPM i un representant del BIPM (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*). Actualment hi ha deu comitès:

1. El Comitè Consultiu de l'Electricitat i el Magnetisme (CCEM), denominació nova assignada el 1997 al Comitè Consultiu de l'Electricitat (CCE), creat el 1927.
2. El Comitè Consultiu de la Fotometria i la Radiometria (CCPR), denominació nova assignada el 1971 al Comitè Consultiu de Fotometria (CCP), creat el 1933 (entre el 1930 i el 1933 el CCE s'ocupava dels temes relacionats amb la fotometria).
3. El Comitè Consultiu de Termometria (CCT), creat el 1937.
4. El Comitè Consultiu de les Longituds (CCL), denominació nova assignada el 1997 al Comitè Consultiu per a la Definició del Metre (CCDM), creat el 1952.
5. El Comitè Consultiu del Temps i les Freqüències (CCTF), denominació nova assignada el 1997 al Comitè Consultiu per a la Definició del Segon (CCDS), creat el 1956.
6. El Comitè Consultiu de les Radiacions Ionitzants (CCRI), denominació nova assignada el 1997 al Comitè Consultiu per als Patrons de Mesura de les Radiacions Ionitzants (CCEMRI), creat el 1958. El 1969, aquest comitè va establir quatre seccions: Secció I (Raigs X i γ , Electrons), Secció II (Mesures de Radionúclids), Secció III (Mesures Neutròniques), Secció IV (Patrons d'Energia α). Aquesta darrera secció es va dissoldre el 1975 i el seu camp d'activitat es va assignar a la Secció II.
7. El Comitè Consultiu de les Unitats (CCU), creat el 1964 (aquest comitè va substituir el Comitè del Sistema d'Unitats, creat el 1954 pel CIPM).

8. El Comitè Consultiu de la Massa i les magnituds que hi tenen relació (CCM), creat el 1980.
9. El Comitè Consultiu de la Quantitat de Substància: Metrologia en Química i en Biologia (CCQM), creat el 1993.
10. El Comitè Consultiu de l'Acústica, els Ultrasons i les Vibracions (CCAUV), creat el 1999.

El BIPM publica les actes de la CGPM i del CIPM en les sèries següents:

- *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures.*
- *Procès-verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures.*

El 2003, el CIPM va decidir que els informes sobre les sessions dels comitès consultius no s'imprimarien més, sinó que es penjarien al lloc web del BIPM, en la seva llengua original.

El BIPM també publica monografies sobre temes metrològics concrets i, amb el títol *Le Système international d'unités (SI)*, un opuscle, que s'actualitza periòdicament, en què s'agrupen totes les decisions i recomanacions relacionades amb les unitats.

La sèrie *Travaux et mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (vint-i-dos volums publicats entre el 1881 i el 1966) s'ha suspès per decisió del CIPM, així com el *Recueil de travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (onze volums publicats entre el 1966 i el 1988).

Els treballs del BIPM es publiquen en revistes científiques.

Des del 1965, la revista internacional *Metrologia*, editada sota els auspicis del CIPM, publica articles sobre la metrologia científica, la millora dels mètodes de mesura, els treballs sobre els patrons i les unitats, així com informes relacionats amb les activitats, les decisions i les recomanacions dels òrgans de la Convenció del Metre.

El sistema internacional d'unitats

Índex

Pròleg a la 9a edició	10
1 Introducció	13
1.1 El SI definit en funció de les constants físiques	13
1.2 Motivació quant a l'ús de les constants per a definir el SI	13
1.3 Implementació del SI	14
2 El sistema internacional d'unitats	15
2.1 Definició de la unitat d'una magnitud	15
2.2 Definició del SI	15
2.2.1 Naturalesa de les set constants que defineixen el SI	16
2.3 Definicions de les unitats del SI	17
2.3.1 Les unitats bàsiques	18
2.3.2 Realització pràctica de les unitats del SI	23
2.3.3 Dimensions de les magnituds	24
2.3.4 Unitats derivades	25
2.3.5 Unitats de les magnituds que descriuen efectes biològics i fisiològics	29
2.3.6 Les unitats SI en el marc de la teoria de la relativitat general	30
3 Múltiples i submúltiples decimals de les unitats SI	31
4 Unitats que no pertanyen al SI l'ús de les quals s'accepta en el SI	32
5 Normes d'escriptura dels noms i símbols de les unitats i expressió dels valors de les magnituds	34
5.1 Ús dels símbols i noms de les unitats	34
5.2 Símbols de les unitats	34
5.3 Noms de les unitats	35
5.4 Normes i convencions estilístiques per a expressar els valors de les magnituds	35
5.4.1 Valor i valor numèric d'una magnitud, i ús del càlcul formal	35
5.4.2 Símbols de les magnituds i les unitats	36
5.4.3 Escriptura del valor d'una magnitud	36
5.4.4 Escriptura dels nombres i separador decimal	37
5.4.5 Expressió de la incertesa de mesura associada al valor d'una magnitud	37
5.4.6 Multiplicació o divisió dels símbols de les magnituds, dels valors de les magnituds i dels nombres	38
5.4.7 Escriptura dels valors de les magnituds expressades per nombres	38
5.4.8 Angles plans, angles sòlids i angles de fase	38

Annex 1. Decisions de la CGPM i del CIPM	41
Annex 2. Realització pràctica de les principals unitats	95
Annex 3. Unitats per a la mesura de les magnituds fotoquímiques i fotobiològiques	97
Annex 4. Notes històriques sobre l'evolució del sistema internacional d'unitats i les seves unitats bàsiques	99
Part 1. Evolució històrica de la realització de les unitats del SI	99
Part 2. Evolució històrica del sistema internacional	101
Part 3. Perspectiva històrica sobre les unitats bàsiques del SI	104
Llista de les sigles usades en aquest volum	109
Índex	111

Pròleg a la 9a edició

Des que es va establir el 1960 mitjançant una resolució adoptada per la Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM) en la seva 11a reunió, el sistema internacional d'unitats (SI) s'ha utilitzat arreu del món com el sistema preferit d'unitats i com a llengua fonamental de la ciència, la tecnologia, la indústria i el comerç.

Aquest opuscle sobre el SI ha estat publicat per l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures (BIPM) per tal d'explicar i promoure el SI. Recull les resolucions de la CGPM i les decisions del Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM) més importants pel que fa al sistema mètric des de la primera reunió de la CGPM el 1889.

El SI ha estat sempre un sistema pràctic i dinàmic que ha evolucionat a fi d'explotar els avenços científics i tecnològics més recents. En particular, els avenços extraordinaris en física atòmica i metrologia quàntica que s'han assolit els darrers cinquanta anys han permès revisar les definicions del segon i del metre i ajustar la representació pràctica de les unitats elèctriques per tal de treure profit dels fenòmens atòmics i quàntics per a aconseguir, durant la realització d'aquestes unitats, uns nivells d'exactitud limitats només per les nostres capacitats tècniques i no per les definicions en si mateixes. Aquests avenços científics, així com l'evolució de les tecnologies de mesura, han permès canvis en el SI que han estat descrits en les edicions anteriors d'aquest opuscle.

La 9a edició de l'opuscle sobre el SI s'ha preparat després de l'adopció per part de la CGPM a la seva 26a reunió d'un conjunt de canvis profunds. La CGPM ha adoptat una nova manera de formular les definicions de les unitats en general, i les de les set unitats bàsiques en particular, fixant el valor numèric de set constants que defineixen el SI. Entre aquestes constants hi ha constants fonamentals de la natura, com la constant de Planck i la velocitat de la llum; així, les definicions prenen com a base, i representen, la nostra comprensió actual de les lleis de la física. Per primer cop disposem d'un conjunt complet de definicions que no fa referència a patrons físics, propietats materials o descripcions de mesures. Els canvis aportats al SI permeten la realització de totes les unitats amb un grau d'exactitud que, en darrer terme, està limitat només per l'estructura quàntica de la natura i les nostres capacitats tècniques i no pas per les definicions. Tota equació vàlida de la física que relacioni una unitat i les constants que defineixen el SI es pot fer servir per a realitzar la unitat en qüestió, obrint camí per a noves possibilitats d'innovació, realitzant la unitat arreu amb un grau d'exactitud creixent a mesura que les tecnologies progressen. Per tant, aquesta revisió del SI constitueix un avenç històric fonamental.

La CGPM va adoptar la revisió del SI el novembre de 2018 i les noves definicions van entrar en vigència a partir del 20 de maig de 2019, aniversari de la signatura de la Convenció del Metre, que se celebra com a Dia Mundial de la Metrologia. Certament, els canvis comportaran repercussions importants, si bé s'ha posat molta atenció per tal de garantir la

coherència d'aquestes definicions amb les vigents en el moment de la implementació de la revisió del SI.

Cridem l'atenció sobre el fet que des que es va establir, el 1960, el sistema internacional d'unitats ha estat sempre designat, d'una manera abreujada, com a «SI». Aquest principi s'ha mantingut en les vuit edicions precedents de l'opuscle i va ser reafirmada en la Resolució 1 adoptada per la CGPM en la seva 26a reunió, que també va confirmar que el títol d'aquest opuscle és simplement *El sistema internacional d'unitats*. Aquesta coherència de les referències al SI reflecteix els esforços de la CGPM i del CIPM per tal d'assegurar la continuïtat dels valors de les mesures expressades en unitats del SI durant cada canvi que s'ha fet.

El text de l'opuscle té com a objectiu proporcionar una descripció completa del SI i oferir-ne el context històric. A més, l'opuscle conté quatre annexos:

L'annex 1 reproduïx, per ordre cronològic, totes les decisions (resolucions, recomanacions, declaracions) promulgades des de 1889 per la CGPM i pel CIPM sobre les unitats de mesura del sistema internacional d'unitats.

L'annex 2 només està disponible en format electrònic (www.bipm.org). Descriu la realització pràctica de les set unitats bàsiques i d'altres unitats importants per a cada camp metroloògic. Aquest annex s'actualitzarà regularment per tal de reflectir els progressos de les tècniques experimentals utilitzades per a realitzar les unitats.

L'annex 3 només està disponible en format electrònic (www.bipm.org). Descriu les unitats que permeten mesurar les magnituds fotoquímiques i fotobiològiques.

L'annex 4 conté informació sobre l'evolució històrica del SI.

Com a conclusió, expressem el nostre agraïment als membres del Comitè Consultiu de les Unitats (CCU) del CIPM, responsables de preparar aquest opuscle. Tant el CCU com el CIPM han aprovat el text final.

Març de 2019



B. Inglis

President del CIPM



J. Ullrich

President del CCU



M. J. T. Milton

Director del BIPM

NOTA SOBRE AQUESTA EDICIÓ EN CATALÀ

La 22a CGPM (2003) va decidir, arran d'una decisió presa pel CIPM el 1997, que «el símbol del separador decimal pot ser tant el punt sobre la línia com la coma sobre la línia». D'acord amb aquesta decisió, i segons l'ús que se'n fa a cada llengua, al text original, en francès, es fan consideracions sobre l'ús en les seves versions francesa i anglesa, que no es reproduïxen aquí. En aquesta versió catalana se segueix l'ús tradicional de la coma sobre la línia com a separador decimal.

Així mateix, el text original es refereix a variacions ortogràfiques dels noms de les unitats en anglès, que també s'ometen aquí. Els símbols de les unitats del SI emprades en aquest opuscle romanen idèntics en totes les llengües.

El lector ha de tenir en compte que el text oficial de les reunions de la CGPM i de les actes del CIPM és l'escrit en francès. Aquest opuscle també està disponible en anglès, però si es necessita una referència amb autoritat o si es té cap dubte sobre la interpretació del text, cal consultar el text en francès.

1 Introducció

1.1 El SI definit en funció de les constants físiques

L'opuscle sobre el SI presenta les informacions necessàries per a la definició i la utilització del sistema internacional d'unitats, universalment conegut amb l'abreviació SI i del qual té la responsabilitat la Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM). El SI va ser formalment definit i establert el 1960 per la CGPM a la seva 11a reunió; després ha estat revisat diverses vegades per tal de respondre a les exigències dels usuaris i als avenços de la ciència i la tecnologia. La revisió més recent, i probablement la més important des de la creació del SI, va ser aprovada per la CGPM en la seva 26a reunió (2018) i està descrita en aquesta 9a edició de l'opuscle sobre el SI. La Convenció del Metre i els seus òrgans, la CGPM, el Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM) i l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures (BIPM), així com els comitès consultius, estan descrits al text «L'Oficina Internacional de Pesos i Mesures i la Convenció del Metre» (pàgina 5).

El SI és un sistema d'unitats coherent que es fa servir en tots els aspectes de la vida, com el comerç internacional, la producció industrial, la salut i la seguretat, la protecció del medi ambient i les ciències fonamentals, que són la base de totes aquestes activitats. El sistema de magnituds subjacent al SI i les equacions que defineixen les relacions entre aquestes magnituds es basen en la descripció actual de la natura i tots els científics, tècnics i enginyers els coneixen.

La definició de les unitats del SI s'estableix a partir d'un conjunt de set constants físiques. A partir dels valors fixats d'aquestes set constants definidores, expressades en unitats SI, es poden deduir totes les unitats del sistema. Aquestes set constants són, així, l'element més essencial de la definició de tot el sistema d'unitats. Aquestes constants es van escollir després d'identificar-les com la millor opció, tenint en compte la definició prèvia del SI —que estava fonamentada en set unitats bàsiques— i els progressos de la ciència.

Es poden fer servir diversos mètodes experimentals, descrits pels comitès consultius del CIPM, per a realitzar les unitats; aquestes descripcions s'anomenen també *mises en pratique*. Aquestes realitzacions poden ser susceptibles de revisió quan es desenvolupin experiments nous; per aquest motiu, aquest opuscle no conté recomanacions sobre la realització de les definicions, si bé aquesta informació està disponible al lloc web del BIPM.

1.2 Motivació quant a l'ús de les constants per a definir el SI

Des de l'establiment del SI, les seves unitats s'han presentat en funció d'un conjunt d'*unitats bàsiques* —set, des de fa dècades. Totes les altres unitats, anomenades *unitats derivades*, es formen a partir de productes de potències de les unitats bàsiques.

S'han utilitzat diversos tipus de definicions per a les unitats bàsiques: propietats específiques de certs artefactes, com la massa del prototip internacional del kilogram per a la unitat *kilogram*; un estat físic particular, com el punt triple de l'aigua per a la unitat *kelvin*; descripcions experimentals que requereixen unes condicions idealitzades, com en el cas de les unitats *ampere* i *candela*, o constants de la natura, com la velocitat de la llum per a la definició de la unitat *metre*.

Per a tenir una utilitat pràctica, aquestes unitats no només han d'estar definides sinó que també han d'estar realitzades físicament per a disseminar-les. En el cas d'un artefacte, la definició i la realització són equivalents (camí que van seguir les antigues civilitzacions avançades). Encara que aquest mètode és simple i clar, els artefactes presenten un risc de pèrdua, danys o variació de les seves característiques. Els altres tipus de definicions d'unitats esdevenen cada cop més abstractes o idealitzats. Des d'un punt de vista conceptual, les realitzacions queden aleshores dissociades de les definicions, de manera que les unitats en principi es poden realitzar independentment en qualsevol lloc i en qualsevol moment. A més, es podran desenvolupar realitzacions noves i millors gràcies als progressos de la ciència i la tecnologia, sense que calgui redefinir la unitat. Aquests avantatges, com demostra la història de la definició del metre —basada primer en artefactes, després en una transició atòmica de referència i, finalment, en la fixació d'un valor numèric de la velocitat de la llum—, van dur a prendre la decisió de definir totes les unitats mitjançant constants definidores.

L'elecció de les unitats bàsiques no es va imposar mai, sinó que es va anar afirmant amb els anys i actualment ja és ben coneguda pels usuaris del SI. La descripció del SI en termes d'unitats bàsiques i unitats derivades es conserva en aquest opuscle, però ha estat reformulada arran de l'adopció de les constants definidores del SI.

1.3 Implementació del SI

Les definicions de les unitats del SI, tal com han estat adoptades per la CGPM, representen el nivell de referència més elevat en matèria de traçabilitat de mesura al SI.

Els laboratoris de metrologia d'arreu del món posen a punt realitzacions pràctiques de les definicions per tal de permetre la traçabilitat de les seves mesures al SI. Els comitès consultius determinen el marc que permet establir l'equivalència de les realitzacions per a harmonitzar la traçabilitat a escala mundial.

Els organismes de normalització poden proporcionar informació suplementària sobre les magnituds i les unitats, així com sobre les seves normes d'aplicació, quan les necessiten les parts interessades. Quan les unitats del SI es mencionen en normes, aquestes normes han de referir-se a les definicions adoptades per la CGPM. Aquestes informacions estan especialment incloses en les normes internacionals elaborades per l'Organització Internacional de Normalització (ISO, International Standard Organization) i la Comissió Electrotècnica Internacional (IEC, International Electrotechnical Commission), com les normes de la sèrie ISO/IEC 80000.

Els estats estableixen legislativament les normes relatives a la utilització de les unitats al seu territori, tant per a l'ús general com per a certs àmbits particulars com el comerç, la sanitat, la seguretat pública o l'ensenyament. A la majoria dels estats, la legislació està basada en la utilització del SI. L'Organització Internacional de Metrologia Legal (OIML) s'encarrega de l'harmonització mundial de les especificacions tècniques d'aquestes legislacions.

2 El sistema internacional d'unitats

2.1 Definició de la unitat d'una magnitud

El valor d'una magnitud s'expressa generalment com el producte d'un nombre per una unitat. La unitat no és res més que un exemple particular de la magnitud en qüestió, usada com a referència. El nombre és el quocient entre el valor de la magnitud i la unitat.

Es poden fer servir diferents unitats per a una magnitud concreta. Per exemple, el valor de la velocitat v d'una partícula es pot expressar $v = 25 \text{ m/s}$ o $v = 90 \text{ km/h}$, en què les unitats *metre per segon* i *kilòmetre per hora* són unitats alternatives per a expressar el mateix valor de la magnitud *velocitat*.

Abans d'expressar un resultat de mesura, és essencial que la magnitud considerada sigui descrita adequadament. Això pot ser simple, com en el cas de la longitud d'una barra concreta d'acer, però pot esdevenir més complicat quan es requereix un grau d'exactitud més elevat i quan cal especificar paràmetres addicionals, com la temperatura.

Per a expressar el resultat de mesura d'una magnitud específica, són necessaris el **valor estimat** del mesurand (la magnitud per mesurar) i la **incertesa** associada a aquest valor. Totes dues s'expressen en la mateixa unitat.

Per exemple, la velocitat de la llum en el buit (c) és una constant de la natura, i el seu valor en unitats SI s'expressa mitjançant la relació $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$, en què el valor numèric és 299 792 458 i la unitat, m/s.

2.2 Definició del SI

Com per a tota magnitud, el valor d'una constant fonamental es pot expressar com el producte d'un nombre per una unitat.

Les definicions següents especifiquen el valor numèric exacte de cada constant quan el seu valor s'expressa en la unitat del SI corresponent. En fixar el valor numèric exacte es defineix la unitat, ja que el producte del **valor numèric** per la **unitat** ha de ser igual al **valor** de la constant que, per hipòtesi, és invariant.

Les set constants que defineixen el SI s'han triat de manera que qualsevol unitat del SI es pugui expressar a partir d'una d'aquestes constants definidores o a partir dels seus productes o quocients.

Els quocients de les unitats SI es poden expressar mitjançant una barra inclinada (/) o un exponent negatiu ($^-$). Per exemple, $\text{m/s} = \text{m s}^{-1}$, $\text{mol/mol} = \text{mol mol}^{-1}$.

El sistema internacional d'unitats, el SI, és el sistema d'unitats en què:

- la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133 sense pertorbar, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, és igual a **9 192 631 770 Hz**,
- la velocitat de la llum en el buit, c , és igual a **299 792 458 m/s**,
- la constant de Planck, h , és igual a **$6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$** ,
- la càrrega elemental, e , és igual a **$1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$** ,
- la constant de Boltzmann, k , és igual a **$1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$** ,
- la constant d'Avogadro, N_{A} , és igual a **$6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$** ,
- l'eficàcia lluminosa de la radiació monocromàtica de freqüència **$540 \times 10^{12} \text{ Hz}$** , K_{cd} , és igual a **683 lm/W**,

en què les unitats hertz, joule, coulomb, lumen i watt, representades respectivament amb els símbols Hz, J, C, lm i W, estan relacionades amb les unitats *segon, metre, kilogram, ampere, kelvin, mol* i *candela*, que tenen els símbols s, m, kg, A, K, mol i cd, respectivament, segons les relacions $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ i $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$.

El valor numèric de cadascuna de les set constants que defineixen el SI no té incertesa.

Taula 1. Les set constants que defineixen el SI i les set unitats corresponents que defineixen

Constant	Símbol	Valor numèric	Unitat
frequència de la transició hiperfina del cesi	$\Delta \nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
velocitat de la llum en el buit	c	299 792 458	m s^{-1}
constant de Planck	h	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
càrrega elemental	e	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
constant de Boltzmann	k	$1,380\,649 \times 10^{-23}$	J K^{-1}
constant d'Avogadro	N_{A}	$6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$	mol^{-1}
eficàcia lluminosa	K_{cd}	683	lm W^{-1}

Sempre ha estat essencial preservar, en la mesura que es pugui, la continuïtat del sistema internacional d'unitats quan s'hi ha fet modificacions. Els valors numèrics de les set constants s'han escollit per a ser coherents amb les definicions anteriors en la mesura que els avenços en ciència i coneixement ho han permès.

2.2.1 Naturalesa de les set constants que defineixen el SI

La naturalesa de les set constants definidores del SI comprèn des de constants fonamentals de la natura fins a constants tècniques.

L'ús d'una constant per a definir una unitat dissocia la definició de la realització i obre el camí al desenvolupament de realitzacions pràctiques totalment diferents o millorades, en funció dels progressos tecnològics, sense que calgui modificar la definició de la unitat.

Una constant tècnica com K_{cd} , l'eficàcia lluminosa d'una radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz, fa referència a una aplicació específica. En principi, aquesta constant tècnica es pot triar lliurement, sobretot per a incloure factors fisiològics convencionals o altres factors de ponderació. Per contra, això no és possible, en general, quan es fa servir una constant fonamental de la natura, ja que està relacionada amb altres constants per les equacions de la física.

Les set constants definidores del SI s'han triat per a formar un conjunt que constitueixi una referència fonamental, estable i universal, les realitzacions pràctiques de les quals permetin obtenir incerteses tan petites com sigui possible. Els convenis i les especificacions tècniques triats també tenen en compte els desenvolupaments històrics.

La constant de Planck, h , i la velocitat de la llum en el buit, c , són anomenades *constants fonamentals* amb raó: regeixen, respectivament, els efectes quàntics i les propietats generals de l'espai i temps i afecten de la mateixa manera partícules i camps en totes les escales i en tots els ambients.

La càrrega elemental, e , correspon a una constant d'acoblament de la força electromagnètica a través de la constant d'estructura fina $\alpha = e^2/(2c\epsilon_0 h)$, en què ϵ_0 és la permitivitat dielèctrica del buit (també coneguda com a *constant elèctrica*). Algunes teories prediuen una variació de α amb el temps. Ara bé, els límits experimentals de la variació màxima possible de α són tan baixos que es pot excloure qualsevol efecte sobre les mesures pràctiques en el futur proper.

La constant de Boltzmann, k , és una constant de proporcionalitat entre les magnituds *temperatura* (amb unitat *kelvin*) i *energia* (amb unitat *joule*), el valor numèric de la qual s'obté a partir de raons històriques relatives a l'escala de temperatura. La temperatura d'un sistema varia amb la seva energia tèrmica, però no necessàriament amb l'energia interna del sistema. En física estadística, la constant de Boltzmann relaciona l'entropia, S , amb el nombre Ω d'estats quàntics accessibles, $S = k \ln \Omega$.

La freqüència del cesi, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133 sense pertorbar, té el caràcter d'un paràmetre atòmic, que pot ser afectat per l'ambient, com, per exemple, pels camps electromagnètics. Això no obstant, la transició subjacent és perfectament coneguda i estable i constitueix, des del punt de vista pràctic, una bona elecció de transició de referència. L'elecció d'un paràmetre atòmic com $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ no dissocia la definició de la realització com en els casos de h , c , e o k , però especifica la referència.

La constant d'Avogadro, N_A , és una constant de proporcionalitat entre la magnitud *quantitat de substància* (que té com a unitat el mol) i una magnitud de valor determinat pel recompte d'entitats (que té com a unitat el nombre «u», símbol 1). Té, doncs, el caràcter d'una constant de proporcionalitat similar a la constant de Boltzmann, k .

L'eficàcia lluminosa d'una radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz, K_{cd} , és una constant tècnica que estableix una relació numèrica exacta entre les característiques purament físiques del flux energètic que estimula l'ull humà a una freqüència de 540×10^{12} Hz (W) i la resposta fotobiològica provocada pel flux lluminós rebut per un observador mitjà (lm).

2.3 Definicions de les unitats del SI

Abans de la revisió del SI adoptada el 2018, aquest estava definit a partir de *set unitats bàsiques* amb base a les quals s'obtenien les *unitats derivades* com a productes de potències de les unitats bàsiques. En definir el SI fixant els valors numèrics de set constants específiques, aquesta distinció en principi ja no és necessària, atès que les definicions de totes les unitats, tant si són bàsiques com si són derivades, es poden obtenir directament a partir de les set constants definidores. Tanmateix, els conceptes d'unitat bàsica i unitat derivada es conserven, ja que són pràctics i històricament ben fixats; a més, la sèrie de normes ISO/IEC 80000 especifica les magnituds bàsiques i derivades que s'han de correspondre necessàriament amb les unitats bàsiques del SI i amb les unitats derivades, definides en aquest opuscle.

2.3.1 Les unitats bàsiques

Les unitats bàsiques del SI es recullen a la taula 2.

Taula 2. Les unitats SI bàsiques

Magnitud bàsica		Unitat bàsica	
Nom	Símbol típic	Nom	Símbol
temps	t	segon	s
longitud	$l, x, r, \text{etc.}$	metre	m
massa	m	kilogram	kg
intensitat de corrent elèctric	I, i	ampere	A
temperatura termodinàmica	T	kelvin	K
quantitat de substància	n	mol	mol
intensitat lluminosa	I_v	candela	cd

Els símbols per a les magnituds s'escriuen en cursiva, són generalment una lletra de l'alfabet grec o llatí i es tracta de *recomanacions*.

Els símbols per a les unitats s'escriuen en rodona i són *obligatoris*.

Vegeu el capítol 5.

La definició del SI basada en els valors numèrics fixats de les set constants definidores permet deduir la definició de cadascuna de les set unitats bàsiques del SI, mitjançant una o més d'aquestes constants, segons el cas. Aquestes definicions s'indiquen a continuació.

El segon

El segon, amb símbol s, és la unitat SI de temps. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la freqüència del cesi, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133 sense pertorbar, igual a 9 192 631 770 quan s'expressa en Hz, que és equivalent a s^{-1} .

Aquesta definició implica la relació exacta $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$. Invertint aquesta relació, el segon s'expressa en funció de la constant $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1\text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{o} \quad 1\text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

A partir d'aquesta definició, el segon és igual a la durada de 9 192 631 770 períodes de la radiació corresponent a la transició entre els dos nivells hiperfins de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133 sense pertorbar.

Es fa referència a un àtom sense pertorbar per tal d'indicar clarament que la definició del segon del SI es basa en un àtom de cesi aïllat que no està pertorbat per cap mena de camp extern, com la radiació d'un cos negre a temperatura ambient.

El segon definit d'aquesta manera és la unitat de temps propi, com es descriu a la teoria general de la relativitat. Per a establir una escala de temps coordinat, es combinen els senyals de diferents rellotges primaris al món i després s'apliquen correccions per a tenir en compte el desplaçament relativista de freqüència entre els patrons de cesi (vegeu l'apartat 2.3.6).

El CIPM ha adoptat diferents representacions secundàries del segon basades en un nombre escollit de línies espectrals d'àtoms, ions o molècules. Les freqüències sense pertorbar d'aquestes línies es poden determinar amb una incertesa relativa no inferior a la de la realització del segon basada en la transició hiperfina de l'àtom de ^{133}Cs , però algunes es poden reproduir amb una estabilitat més gran.

El metre

El metre, amb símbol m, és la unitat SI de longitud. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la velocitat de la llum en el buit, c , igual a 299 792 458 quan s'expressa en m s^{-1} , en què el segon es defineix en funció de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Aquesta definició implica la relació exacta $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$. Invertint aquesta relació, el metre s'expressa en funció de les constants c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}.$$

A partir d'aquesta definició, el metre és la longitud del trajecte que la llum recorre en el buit durant un període de temps igual a $1/299\,792\,458$ de segon.

El kilogram

El kilogram, amb símbol kg, és la unitat SI de massa. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la constant de Planck, h , igual a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ quan s'expressa en J s , equivalent a $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, en què el metre i el segon es defineixen en funció de c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Aquesta definició implica la relació exacta $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$. Invertint aquesta relació, el kilogram s'expressa unívocament en funció de les tres constants h , $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ i c :

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s}$$

que equival a

$$1 \text{ kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,475\,5214 \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}.$$

Aquesta definició permet determinar la unitat $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ (la unitat de les magnituds físiques *acció* i *moment cinètic*). Associada també a les definicions del segon i del metre, la unitat de massa s'expressa en funció de la constant de Planck h .

La definició anterior del kilogram fixava el valor de la massa del prototip internacional del kilogram \mathcal{K} , $m(\mathcal{K})$, en un kilogram exactament; el valor de la constant de Planck, h , havia de ser determinat, per tant, experimentalment. La definició actual del kilogram fixa el valor numèric de h d'una manera exacta i la massa del prototip ha de ser, a partir d'ara, determinada experimentalment.

El nombre escollit per a fixar el valor numèric de la constant de Planck és tal que, en el moment de l'adopció d'aquesta definició de la unitat de massa, el kilogram era igual a la massa del prototip internacional $m(\mathcal{K}) = 1 \text{ kg}$ amb una incertesa estàndard relativa igual a 1×10^{-8} , que era la incertesa estàndard de la combinació de les millors estimacions del valor de la constant de Planck en aquell moment.

Cal remarcar que aquesta definició de la unitat de massa permet establir, en principi, realitzacions primàries en qualsevol punt de l'escala de massa.

L'ampere

L'ampere, amb símbol A, és la unitat SI d'intensitat de corrent elèctric. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la càrrega elemental, e , igual a $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ quan s'expressa en C, que equival a A s, en què el segon es defineix en funció de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Aquesta definició implica la relació exacta $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ A s. Invertint aquesta relació, l'ampere s'expressa en funció de les constants e i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1\ \text{A} = \left(\frac{e}{1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}} \right) \text{s}^{-1}$$

que equival a

$$1\ \text{A} = \frac{1}{(9\ 192\ 631\ 770)(1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{\text{Cs}} \cdot e \approx 6,789\ 6868 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} \cdot e.$$

A partir d'aquesta definició, un ampere és igual a la intensitat de corrent elèctric que correspon al flux d' $1/(1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})$ càrregues elementals per segon.

La definició anterior de l'ampere, basada en la força produïda entre dos conductors pels quals passa corrent, fixava el valor de la permeabilitat magnètica del buit μ_0 (també coneguda com a *constant magnètica*) exactament en $4\pi \times 10^{-7}$ H m⁻¹ = $4\pi \times 10^{-7}$ N A⁻², en què H i N representen les unitats derivades coherents *henry* i *newton*, respectivament. La nova definició de l'ampere fixa el valor numèric de e en comptes del de μ_0 . En conseqüència, μ_0 s'ha de determinar de forma experimental.

D'aquesta manera, com que la permitivitat elèctrica del buit ϵ_0 (també coneguda com a *constant elèctrica*), la impedància característica del buit, Z_0 , i l'admitància del buit, Y_0 , són iguals a $1/\mu_0 c^2$, $\mu_0 c$ i $1/\mu_0 c$, respectivament, els valors de ϵ_0 , Z_0 i Y_0 també han de ser determinats, a partir d'ara, experimentalment i tenen la mateixa incertesa estàndard relativa que μ_0 , ja que el valor de c es coneix exactament. El producte $\epsilon_0 \cdot \mu_0 = 1/c^2$ i el quocient $Z_0/\mu_0 = c$ es mantenen exactes. En el moment de l'adopció de la definició actual de l'ampere, μ_0 era igual a $4\pi \times 10^{-7}$ H/m amb una incertesa estàndard relativa de $2,3 \times 10^{-10}$.

El kelvin

El kelvin, amb símbol K, és la unitat SI de temperatura termodinàmica. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la constant de Boltzmann, k , igual a $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ quan s'expressa en J · K⁻¹, que equival a kg · m² · s⁻² · K⁻¹, en què el kilogram, el metre i el segon es defineixen en funció de h , c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Aquesta definició implica la relació exacta $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23}$ kg · m² · s⁻² · K⁻¹. Invertint aquesta relació, el kelvin s'expressa en funció de les constants k , h i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1\ \text{K} = \left(\frac{1,380\ 649 \times 10^{-23}}{k} \right) \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$$

que equival a

$$1\ \text{K} = \frac{1,380\ 649 \times 10^{-23}}{(6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34})(9\ 192\ 631\ 770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2,266\ 6653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}.$$

A partir d'aquesta definició, un kelvin és igual al canvi de temperatura termodinàmica que resulta d'un canvi de l'energia tèrmica kT d' $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J.

La definició anterior del kelvin establia la temperatura del punt triple de l'aigua, T_{TPW} , com exactament igual a 273,16 K. Com que la definició actual del kelvin fixa el valor numèric de k en comptes del de T_{TPW} , a partir d'ara, aquest s'ha de determinar experimentalment. En el moment de l'adopció de la definició actual del kelvin, T_{TPW} era igual a 273,16 K, amb una incertesa estàndard relativa de $3,7 \times 10^{-7}$, determinada a partir dels mesuraments de k fets abans de la redefinició.

Com a resultat de la manera en què es definien usualment les escales de temperatura, es manté com a ús habitual expressar la temperatura termodinàmica, amb símbol T , en funció de la seva diferència respecte de la temperatura de referència $T_0 = 273,15$ K, propera al punt de congelació de l'aigua. Aquesta diferència de temperatura s'anomena *temperatura Celsius*, amb símbol t , que es defineix per l'equació entre magnituds:

$$t = T - T_0.$$

La unitat de temperatura Celsius és el grau Celsius, amb símbol $^{\circ}\text{C}$, que per definició és igual en grandària a la unitat *kelvin*. Una diferència o un interval de temperatura es pot expressar tant en kèlvins com en graus Celsius, i el valor numèric de la diferència de temperatura és el mateix en tots dos casos. El valor numèric de la temperatura Celsius expressada en graus Celsius està relacionat amb el valor numèric de la temperatura termodinàmica expressada en kèlvins mitjançant la relació:

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

(vegeu l'apartat 5.4.1 per a una explicació de la notació emprada aquí).

El kelvin i el grau Celsius són també les unitats de l'escala internacional de temperatura de 1990 (EIT-90) adoptada pel CIPM el 1989 a la seva Recomanació 5 (CI-1989, PV, 57, 26, 115).¹ Cal tenir en compte que l'EIT-90 defineix dues magnituds, T_{90} i t_{90} , que són molt bones aproximacions de les temperatures termodinàmiques corresponents T i t .

Igualment, cal tenir en compte que la definició actual de la temperatura termodinàmica permet establir, en principi, realitzacions primàries del kelvin en qualsevol punt de l'escala de temperatura.

El mol

El mol, amb símbol mol, és la unitat SI de quantitat de substància. Un mol conté exactament $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ 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.

Aquesta definició implica la relació exacta $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Invertint aquesta relació, s'obté l'expressió exacta del mol en funció de la constant N_A :

$$1 \text{ mol} = \left(\frac{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right).$$

1. A partir del volum 56, els *Procès-verbaux* (PV) que recullen les actes de les reunions del CIPM inclouen també una versió anglesa dels acords. Per aquesta raó, les referències tenen una doble numeració de pàgina: la primera correspon al francès i la segona, a l'anglès.

A partir d'aquesta definició, el mol és la quantitat de substància d'un sistema que conté $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entitats elementals especificades.

La definició anterior del mol fixava el valor de la massa molar del carboni 12, $M(^{12}\text{C})$, com exactament igual a 0,012 kg/mol. Segons la definició actual del mol, $M(^{12}\text{C})$ ja no es coneix amb exactitud i ha de ser determinada experimentalment. El valor triat per a N_A és tal que, en el moment de l'adopció de la definició actual del mol, $M(^{12}\text{C})$ era igual a 0,012 kg/mol amb una incertesa estàndard relativa de $4,5 \times 10^{-10}$.

La massa molar d'un àtom o d'una molècula X es pot obtenir sempre a partir de la seva massa atòmica relativa mitjançant l'equació:

$$M(\text{X}) = A_r(\text{X}) [M(^{12}\text{C})/12] = A_r(\text{X}) M_u$$

i la massa molar d'un àtom o d'una molècula X també està relacionada amb la massa de l'entitat elemental $m(\text{X})$ per l'equació:

$$M(\text{X}) = N_A m(\text{X}) = N_A A_r(\text{X}) m_u.$$

En aquestes equacions, M_u és la constant de massa molar, igual a $M(^{12}\text{C})/12$, i m_u és la constant de massa atòmica unificada, igual a $m(^{12}\text{C})/12$. Estan relacionades amb la constant d'Avogadro per l'equació:

$$M_u = N_A m_u.$$

En el terme *quantitat de substància*, el mot *substància* generalment es reemplaçarà per altres mots que especifiquin la substància en qüestió per a cada aplicació particular; es podrà parlar, per exemple, de *quantitat de clorur d'hidrogen*, HCl, o de *quantitat de benzè*, C₆H₆. És important definir amb precisió l'entitat en qüestió (com remarca la definició del mol), preferiblement especificant la fórmula química molecular del material de què es tracta. Tot i que el mot *quantitat* té una definició més general al diccionari, aquesta abreviació de l'expressió completa *quantitat de substància* es fa servir de vegades per motius de concisió. Això s'aplica també a les magnituds derivades com la *concentració de quantitat de substància*, que es pot designar simplement *concentració de quantitat*. En el camp de la química clínica, el terme *concentració de quantitat de substància* generalment s'abreuja a *concentració de substància*.

La candela

La candela, amb símbol cd, és la unitat SI d'intensitat lluminosa en una direcció determinada. Es defineix prenent el valor numèric fixat de l'eficàcia lluminosa de la radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz, K_{cd} , que és igual a 683 quan s'expressa en $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, que equival a $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$, o bé a $\text{cd} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, en què el kilogram, el metre i el segon es defineixen en funció de h , c i $\Delta\nu_{Cs}$.

Aquesta definició implica la relació exacta $K_{cd} = 683 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, per a la radiació monocromàtica de freqüència $\nu = 540 \times 10^{12}$ Hz. Invertint aquesta relació, la candela s'expressa en funció de les constants definidores K_{cd} , h i $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$$

que equival a

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)^2 683} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 \cdot h \cdot K_{\text{cd}}$$

$$\approx 2,614\,8305 \times 10^{10} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 \cdot h \cdot K_{\text{cd}}.$$

A partir d'aquesta definició, una candela és la intensitat lluminosa, en una direcció determinada, d'una font que emet una radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz i que té una intensitat radiant en aquesta direcció igual a $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$. La definició de *stereoradian* es dona al peu de la taula 4.

2.3.2 Realització pràctica de les unitats del SI

Els mètodes experimentals d'alt nivell utilitzats per a realitzar les unitats amb l'ajuda de les equacions de la física s'anomenen *mètodes primaris*. Un mètode primari té com a característica principal permetre mesurar una magnitud en una unitat particular usant només mesures de magnituds que no impliquin la unitat en qüestió. En la formulació actual del SI, la base de les definicions és diferent de la usada anteriorment, per això es poden utilitzar nous mètodes per a la realització pràctica de les unitats del SI.

Cada definició que indica una condició particular o un estat físic específic imposa un límit fonamental a l'exactitud de la realització. L'usuari té ara la llibertat d'escollir qualsevol equació de la física convenient que relacioni les constants definidores del SI amb la magnitud que es vol mesurar. Aquest enfocament per a definir les unitats de mesura més habituals és molt més general, ja que no està limitat per l'estat actual de la ciència o la tecnologia; en funció dels progressos futurs es podran desenvolupar altres maneres de realitzar les unitats a un nivell d'exactitud més elevat. Amb un sistema d'unitats com aquest, en principi no hi ha cap límit pel que fa a l'exactitud amb què es pot realitzar una unitat. N'és una excepció la definició del segon, en què la transició de microona del cesi s'ha de mantenir, de moment, com a base de la definició.

Per a una descripció més detallada de la realització de les unitats del SI, vegeu l'annex 2.

2.3.3 Dimensions de les magnituds

Les magnituds físiques es poden organitzar segons un sistema de dimensions que ha estat decidit per conveni. Es considera que cadascuna de les set magnituds bàsiques del SI té la seva pròpia dimensió. Els símbols utilitzats per a les magnituds bàsiques i els símbols emprats per a indicar-ne la dimensió es mostren a la taula 3.

Taula 3. Magnituds bàsiques i dimensions usades en el SI

Magnitud bàsica	Símbol característic de la magnitud	Símbol de la dimensió
temps	t	T
longitud	$l, x, r, \text{etc.}$	L
massa	m	M
intensitat de corrent elèctric	I, i	I
temperatura termodinàmica	T	Θ
quantitat de substància	n	N
intensitat lluminosa	I_v	J

Totes les altres magnituds, exceptuant aquelles el valor de les quals es determina per recompte, són magnituds derivades que es poden expressar en funció de les magnituds bàsiques amb l'ajuda de les equacions de la física. Les dimensions de les magnituds derivades s'escriuen en forma de productes de potències de les dimensions de les magnituds bàsiques mitjançant equacions que relacionen les magnituds derivades amb les bàsiques. En general, la dimensió d'una magnitud Q s'escriu com un producte dimensional:

$$\dim Q = T^\alpha L^\beta M^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta$$

en què els exponents $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta$ i η , que en general són nombres petits enters, positius, negatius o nuls, s'anomenen *exponents dimensionals*.

Algunes magnituds derivades Q es defineixen per una equació tal que tots els exponents dimensionals de l'expressió de la dimensió de Q són igual a zero. Això és cert, en particular, per a una magnitud definida com el quocient entre dues magnituds del mateix tipus. Per exemple, l'índex de refracció d'un medi es defineix com el quocient entre dues velocitats i la permitivitat relativa, com el quocient entre la permitivitat d'un medi elèctric i la del buit. Aquestes magnituds són simplement nombres. La unitat associada és la unitat u , amb símbol 1, tot i que la unitat u rarament s'escriu explícitament (vegeu l'apartat 5.4.7).

També existeixen magnituds que no poden ser descrites mitjançant les set magnituds bàsiques del sistema internacional, però el valor de les quals es mesura per recompte. Per exemple, el nombre de molècules, d'entitats cel·lulars o bimoleculares (com ara les còpies d'una seqüència particular d'àcid nucleic) o la degeneració en mecànica quàntica. Aquestes magnituds també tenen com a unitat el nombre u .

La unitat u és necessàriament l'element neutre de qualsevol sistema d'unitats; hi és automàticament present. No hi ha la necessitat d'introduir la unitat u al SI mitjançant una decisió formal. Així doncs, es pot establir la traçabilitat formal al SI mitjançant procediments de mesura adequats i validats.

Els angles plans i sòlids, quan s'expressen respectivament en radians i estereoradians, són igualment tractats al SI com a quantitats d'unitat u (vegeu l'apartat 5.4.8). En cas de necessitat, els símbols rad i sr s'escriuen explícitament per a destacar que la magnitud considerada, per als radians o els estereoradians, és —o implica— respectivament l'angle pla o l'angle sòlid. Per als estereoradians emfasitza, per exemple, la diferència entre les unitats de flux i la intensitat en radiometria i fotometria. Tot i això, fer servir $\text{rad} = 1$ i $\text{sr} = 1$ és una pràctica establerta des de fa molt temps en matemàtiques i en tots els àmbits de la ciència. Per raons històriques, el radian i l'estereoradian es consideren unitats derivades, tal com es descriu a l'apartat 2.3.4.

És especialment important disposar d'una descripció clara de qualsevol magnitud d'unitat u (vegeu l'apartat 5.4.7) que s'expressi com el quocient entre magnituds de la mateixa mena (per exemple, quocients de longitud, fraccions molars, etc.) o com un recompte (per exemple, nombre de fotons, desintegracions, etc.).

2.3.4 Unitats derivades

Les unitats derivades es defineixen com el producte de potències de les unitats bàsiques. Quan el factor numèric d'aquest producte és u , les unitats derivades s'anomenen *unitats derivades coherents*. Les unitats bàsiques i les unitats derivades coherents del SI formen un conjunt coherent, anomenat *conjunt coherent de les unitats SI*. El terme *coherent* s'utilitza aquí en el sentit següent: quan hom utilitza les unitats coherents, les equacions que relacionen els valors numèrics de les magnituds tenen exactament la mateixa forma que les equacions que relacionen les magnituds pròpiament dites.

Algunes unitats derivades coherents del SI tenen una denominació especial. La taula 4 mostra la llista de les vint-i-dues unitats que tenen una denominació especial. Les set unitats bàsiques (vegeu la taula 2) i les unitats derivades coherents formen el nucli del conjunt d'unitats del SI. Totes les altres unitats del SI són combinacions d'algunes d'aquestes vint-i-nou unitats.

És important tenir en compte que qualsevol de les set unitats bàsiques i de les vint-i-dues unitats del SI amb una denominació especial es poden formar directament a partir de les set constants que defineixen el SI. De fet, les unitats d'aquestes set constants inclouen tant unitats bàsiques com unitats derivades.

La CGPM ha adoptat una sèrie de prefixos que serveixen per a formar múltiples i submúltiples decimals de les unitats SI coherents (vegeu el capítol 3). Aquests prefixos són útils per a expressar els valors de les magnituds més grans o més petites que la unitat coherent. Tot i això, quan un prefix es fa servir amb una unitat del SI, la unitat derivada que s'obté ja no és coherent, atès que el prefix introdueix un factor numèric diferent d' u . Els prefixos es poden fer servir amb qualsevol de les set unitats bàsiques i les vint-i-dues unitats amb denominació especial, exceptuant la unitat bàsica *kilogram*, tal com s'explicarà amb detall al capítol 3.

Taula 4. Les vint-i-dues unitats SI amb denominacions i símbols especials

Magnitud derivada	Denominació especial de la unitat	Expressió de la unitat en unitats bàsiques ^a	Expressió de la unitat en altres unitats SI
angle pla	radian ^b	rad = m/m	
angle sòlid	estereoradian ^c	sr = m ² /m ²	
freqüència	hertz ^d	Hz = s ⁻¹	
força	newton	N = kg · m · s ⁻²	
pressió, esforç	pascal	Pa = kg · m ⁻¹ · s ⁻²	
energia, treball, quantitat de calor	joule	J = kg · m ² · s ⁻²	N · m
potència, flux radiant	watt	W = kg · m ² · s ⁻³	J/s
càrrega elèctrica	coulomb	C = A · s	
diferència de potencial elèctric ^e	volt	V = kg · m ² · s ⁻³ · A ⁻¹	W/A
capacitat elèctrica	farad	F = kg ⁻¹ · m ⁻² · s ⁴ · A ²	C/V
resistència elèctrica	ohm	Ω = kg · m ² · s ⁻³ · A ⁻²	V/A
conductància elèctrica	siemens	S = kg ⁻¹ · m ⁻² · s ³ · A ²	A/V
flux magnètic	weber	Wb = kg · m ² · s ⁻² · A ⁻¹	V · s
inducció magnètica	tesla	T = kg · s ⁻² · A ⁻¹	Wb/m ²
inductància	henry	H = kg · m ² · s ⁻² · A ⁻²	Wb/A
temperatura Celsius	grau Celsius ^f	°C = K	
flux lluminós	lumen	lm = cd · sr ^g	cd · sr
il·luminació	lux	lx = cd · sr · m ⁻²	lm/m ²
activitat d'un radionúclid ^{d,h}	becquerel	Bq = s ⁻¹	
dosi absorbida, kerma	gray	Gy = m ² · s ⁻²	J/kg
dosi equivalent	sievert ⁱ	Sv = m ² · s ⁻²	J/kg
activitat catalítica	katal	kat = mol · s ⁻¹	

- a) L'ordre dels símbols de les unitats bàsiques de la taula 4 és diferent de l'emprat a la 8a edició de l'opuscle sobre el SI després de la decisió presa pel CCU a la seva 21a reunió (2013) de tornar a l'ordre original definit a la Resolució 12 adoptada per la CGPM a la seva 11a reunió (1960), segons la qual el newton s'escriu kg · m · s⁻²; el joule, kg · m² · s⁻², i J · s, kg · m² · s⁻¹. L'objectiu és reflectir els principis físics subjacents a les equacions de les magnituds corresponents, tot i que, per a certes unitats derivades més complexes, pot no ser possible.
- b) El radian és la unitat coherent de l'angle pla. Un radian és un angle comprès entre dos radis d'un cercle que, sobre la circumferència del cercle, intercepten un arc de longitud igual a la del radi. El radian també és la unitat de l'angle de fase. Per als fenòmens periòdics, l'angle de fase augmenta 2π rad a cada període. El radian va ser primerament una unitat SI suplementària, però aquesta categoria es va suprimir el 1995.
- c) L'estereoradian és la unitat coherent de l'angle sòlid. Un estereoradian és l'angle sòlid d'un con que, amb el vèrtex situat al centre d'una esfera, delimita sobre la superfície esfèrica una àrea de valor igual al radi de l'esfera al quadrat. Igual que el radian, l'estereoradian va ser primerament una unitat SI suplementària.
- d) L'hertz només s'ha d'usar per als fenòmens periòdics i el becquerel, només per als processos aleatoris relacionats amb la mesura de l'activitat d'un radionúclid.
- e) En alguns països, la diferència de potencial elèctric també s'anomena *tensió* o *tensió elèctrica*.

- f) El grau Celsius es fa servir per a expressar les temperatures Celsius. El valor numèric d'una diferència de temperatura o d'un interval de temperatura és idèntic quan s'expressa en graus Celsius o en kèlvins.
- g) Generalment, en fotometria es mantenen el nom i el símbol de l'estereoradian, sr, en l'expressió de les unitats.
- h) L'activitat d'un radionúclid a vegades s'anomena, incorrectament, *radioactivitat*.
- i) Vegeu la Recomanació 2 del CIPM sobre l'ús del sievert (PV, 2002, **70**, 102, 205).

Les set unitats bàsiques i les vint-i-dues unitats amb denominacions i símbols especials es poden combinar per a expressar unitats d'altres magnituds derivades. Tenint en compte que el nombre de magnituds és il·limitat, no és possible proporcionar una llista completa de magnituds i unitats derivades. La taula 5 mostra uns quants exemples de magnituds derivades, juntament amb les unitats derivades coherents corresponents expressades en unitats bàsiques. La taula 6 presenta exemples d'unitats derivades coherents els noms i símbols de les quals inclouen igualment unitats derivades. El conjunt d'unitats SI inclou el conjunt d'unitats coherents i els múltiples i submúltiples formats a partir de prefixos SI.

Taula 5. Exemples d'unitats derivades coherents del SI expressades a partir de les unitats bàsiques

Magnitud derivada	Símbol característic de la magnitud	Unitat derivada expressada en unitats bàsiques
àrea	A	m^2
volum	V	m^3
velocitat	v	$m \cdot s^{-1}$
acceleració	a	$m \cdot s^{-2}$
nombre d'ona	σ	m^{-1}
densitat	ρ	$kg \cdot m^{-3}$
densitat superficial	ρ_A	$kg \cdot m^{-2}$
volum específic	v	$m^3 \cdot kg^{-1}$
densitat de corrent	j	$A \cdot m^{-2}$
camp magnètic	H	$A \cdot m^{-1}$
concentració de substància	c	$mol \cdot m^{-3}$
concentració en massa	ρ, γ	$kg \cdot m^{-3}$
luminància	L_v	$cd \cdot m^{-2}$

Taula 6. Exemples d'unitats derivades coherents del SI els noms i símbols de les quals inclouen unitats derivades coherents del SI amb denominacions i símbols especials

Magnitud derivada	Nom de la unitat coherent derivada	Símbol	Unitat derivada expressada en unitats bàsiques
viscositat dinàmica	pascal segon	Pa·s	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
moment d'una força	newton metre	N·m	kg·m ² ·s ⁻²
tensió superficial	newton per metre	N·m ⁻¹	kg·s ⁻²
velocitat angular, freqüència angular	radian per segon	rad·s ⁻¹	s ⁻¹
acceleració angular	radian per segon quadrat	rad·s ⁻²	s ⁻²
densitat superficial de flux tèrmic, irradiància	watt per metre quadrat	W·m ⁻²	kg·s ⁻³
capacitat calorífica, entropia	joule per kelvin	J·K ⁻¹	kg·m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
capacitat calorífica màssica, entropia màssica	joule per kilogram kelvin	J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
energia màssica	joule per kilogram	J·kg ⁻¹	m ² ·s ⁻²
conductivitat tèrmica	watt per metre kelvin	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	kg·m·s ⁻³ ·K ⁻¹
densitat d'energia	joule per metre cúbic	J·m ⁻³	kg·m ⁻¹ ·s ⁻²
camp elèctric	volt per metre	V·m ⁻¹	kg·m·s ⁻³ ·A ⁻¹
densitat de càrrega elèctrica	coulomb per metre cúbic	C·m ⁻³	A·s·m ⁻³
densitat superficial de càrrega elèctrica	coulomb per metre quadrat	C·m ⁻²	A·s·m ⁻²
densitat de flux elèctric, desplaçament elèctric	coulomb per metre quadrat	C·m ⁻²	A·s·m ⁻²
permitivitat	farad per metre	F·m ⁻¹	kg ⁻¹ ·m ⁻³ ·s ⁴ ·A ²
permeabilitat	henry per metre	H·m ⁻¹	kg·m·s ⁻² ·A ⁻²
energia molar	joule per mol	J·mol ⁻¹	kg·m ² ·s ⁻² ·mol ⁻¹
entropia molar, capacitat calorífica molar	joule per mol kelvin	J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹	kg·m ² ·s ⁻² ·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
exposició (raigs X i γ)	coulomb per kilogram	C·kg ⁻¹	A·s·kg ⁻¹
taxa de dosi absorbida	gray per segon	Gy·s ⁻¹	m ² ·s ⁻³
intensitat radiant	watt per estereoradian	W·sr ⁻¹	kg·m ² ·s ⁻³
radiància	watt per metre quadrat i per estereoradian	W·sr ⁻¹ ·m ⁻²	kg·s ⁻³
concentració de l'activitat catalítica	katal per metre cúbic	kat·m ⁻³	mol·s ⁻¹ ·m ⁻³

És important remarcar que cada magnitud física té només una unitat SI coherent, encara que aquesta unitat es pugui expressar de diverses maneres a partir de denominacions o símbols especials.

Tot i això, el contrari no és cert, ja que, d'una manera general, la mateixa unitat SI es pot fer servir per a expressar diferents magnituds. Per exemple, el joule per kelvin és la denominació de la unitat SI per a les magnituds *capacitat calorífica* i *entropia*. De la mateixa manera, l'ampere és la denominació de la unitat SI per a la magnitud bàsica *intensitat de corrent elèctric* i per a la magnitud derivada *força magnètica*. Per tant, no n'hi ha prou, i això és important, d'indicar el nom de la unitat per a especificar la magnitud mesurada. Aquesta regla s'aplica no solament als textos científics i tècnics sinó també, per exemple, als

instruments de mesura (és a dir, han de portar no sols la indicació de la unitat sinó també de la magnitud mesurada).

A la pràctica, per tal de reduir el risc de confusió entre les magnituds diferents que tenen la mateixa dimensió, expressem la unitat emprant preferentment un nom especial. En aquest cas, podem recordar com es defineix la magnitud. Per exemple, la magnitud *moment d'una força* és el resultat del producte vectorial d'un vector posició i d'un vector força: la seva unitat SI és el *newton metre*. Tot i que el moment d'una força té la mateixa dimensió que l'energia (expressada en la unitat SI *joule*), el joule no es fa servir mai per a expressar el moment d'una força.

La unitat SI de la freqüència és l'hertz, la unitat SI de la velocitat angular i de la freqüència angular és el radian per segon i la unitat SI d'activitat és el becquerel. Totes impliquen un recompte per segon. Tot i que seria correcte escriure aquestes tres unitats com a «segon a la potència menys u», l'ús de noms diferents serveix per a subratllar la naturalesa diferent de les magnituds considerades. És especialment important distingir les freqüències de les freqüències angulars, ja que per definició els seus valors numèrics difereixen en un factor² de 2π . Ignorar això pot provocar un error de 2π . Cal destacar que en alguns països els valors de freqüència s'expressen per conveni fent servir «cicle/s» o «cps» al costat de la unitat SI «Hz», tot i que «cicle» i «cps» no són unitats del SI. Així mateix, cal remarcar que és habitual, tot i que no recomanable, fer servir el terme *freqüència* per a les magnituds que s'expressen en rad/s. Per tant, és recomanable expressar sempre les magnituds *freqüència*, *freqüència angular* i *velocitat angular* de manera explícita en Hz o rad/s i no en s^{-1} .

En el camp de les radiacions ionitzants, la unitat SI utilitzada és el becquerel en lloc del segon elevat a la potència menys u, i les unitats SI *gray* i *sievert* en lloc del joule per kilogram per a la dosi absorbida i la dosi equivalent, respectivament. Els noms especials *becquerel*, *gray* i *sievert* s'han introduït atenent els perills per a la salut humana que podrien causar els errors en cas de malentès de les unitats *segon a la potència menys u* i *joule per kilogram* en la identificació de les magnituds.

L'expressió de temperatures o diferències de temperatura requereix una atenció especial. Una diferència de temperatura d'1 K equival a una diferència de temperatura d'1 °C, però s'ha de tenir en compte la diferència de 273,15 K per a expressar una temperatura termodinàmica. La unitat *grau Celsius* només és coherent quan es fa servir per a expressar diferències de temperatura.

2.3.5 Unitats de les magnituds que descriuen efectes biològics i fisiològics

Quatre de les unitats del sistema internacional que apareixen a les taules 2 i 4 inclouen coeficients fisiològics de ponderació: la candela, el lumen, el lux i el sievert.

El lumen i el lux deriven de la unitat bàsica *candela*. Com la candela, donen informació sobre la visió de l'ésser humà. La candela es va establir com a unitat bàsica el 1954 per tal de reconèixer la importància de la llum a la vida quotidiana. En l'annex 3 es dona més informació sobre les unitats i les convencions usades per a definir les magnituds fotoquímiques i fotobiològiques.

La Comissió Electrotècnica Internacional (IEC) ha introduït el var (símbol: var) com a denominació especial per a la unitat de potència reactiva. Expressada en unitats SI coherents, el var és idèntic al voltampere.

2. Per a més informació, consulteu la norma ISO 80000-3.

Les radiacions ionitzants dipositen energia dins la matèria irradiada. El quocient entre l'energia dipositada i la massa s'anomena *dosi absorbida*, D . D'acord amb la decisió presa pel CIPM el 2002, la magnitud *dosi equivalent* $H = Q D$ és el producte de la dosi absorbida D i un factor numèric de qualitat Q que té en compte l'eficàcia biològica de la radiació i que depèn de l'energia i del tipus de radiació.

Hi ha unitats de magnituds que descriuen efectes biològics i que impliquen factors de ponderació que no són unitats SI. Aquí, se'n proporcionen dos exemples.

El so causa fluctuacions de pressió en l'aire que se sumen a la pressió atmosfèrica normal i que l'oïda humana percep. La sensibilitat de l'oïda depèn de la freqüència sonora i no és cap funció simple de l'amplitud de les variacions de la pressió i la freqüència. Per consegüent, les magnituds ponderades en funció de la freqüència s'utilitzen en acústica per a proporcionar una aproximació de la manera com es percep el so. Aquestes magnituds es fan servir, per exemple, en els estudis sobre la protecció contra el dany auditiu. Els efectes de les ones acústiques ultrasonores són una font de preocupacions similar en el diagnòstic mèdic i en l'àmbit terapèutic.

Existeix una classe d'unitats que serveixen per a quantificar l'activitat biològica de determinades substàncies emprades per al diagnòstic mèdic i la teràpia que encara no es poden definir en funció de les unitats del SI. Aquesta absència de definició es deu al fet que el mecanisme de l'efecte biològic específic d'aquestes substàncies encara no es coneix prou per a poder ser quantificat en funció de paràmetres físics i químics. A causa de la seva importància per a la salut i la seguretat humanes, l'Organització Mundial de la Salut (OMS) ha assumit la responsabilitat de definir unitats internacionals OMS per a l'activitat biològica d'aquestes substàncies.

2.3.6 Les unitats SI en el marc de la teoria de la relativitat general

La realització pràctica d'una unitat i el procés de comparació requereixen un conjunt d'equacions dins el marc d'una descripció teòrica. En certs casos, aquestes equacions inclouen efectes relativistes.

Per als patrons de freqüència és possible efectuar comparacions a distància mitjançant senyals electromagnètics. Per a interpretar els resultats, és necessària la teoria de la relativitat general perquè prediu, entre d'altres, un desplaçament de freqüència entre els patrons del voltant d' 1×10^{-16} en valor relatiu per metre d'altitud sobre la superfície de la Terra. Els efectes d'aquest ordre de magnitud s'han de corregir quan es comparen els millors patrons de freqüència.

Quan les realitzacions pràctiques es comparen localment, per exemple en una zona específica de l'espai-temps, els efectes lligats a la curvatura de l'espai-temps descrits per la teoria de la relativitat general es poden obviar. Si les realitzacions tenen les mateixes coordenades espaciotemporals (per exemple, la mateixa trajectòria i acceleració o el mateix camp gravitatori), els efectes relativistes es poden ignorar completament.

3 Múltiples i submúltiples decimals de les unitats SI

Els múltiples i submúltiples decimals de 10^{24} a 10^{-24} es poden fer servir amb les unitats SI. Els noms i els símbols dels prefixos d'aquests múltiples i submúltiples es mostren a la taula 7.

Els símbols dels prefixos s'escriuen en lletra rodona, com els símbols de les unitats, sigui quina sigui la font que s'hagi utilitzat a la resta del text, i s'uneixen als símbols de les unitats sense deixar espai entre el símbol del prefix i el de la unitat. Amb l'excepció dels símbols da (deca), h (hecto) i k (kilo), tots els símbols dels prefixos dels múltiples s'escriuen en majúscules i tots els símbols dels prefixos dels submúltiples, en minúscules. Tots els noms dels prefixos s'escriuen en minúscules, excepte al començament d'una frase.

Els prefixos SI representen estrictament les potències de 10. No s'han de fer servir per a indicar potències de 2 (per exemple, un kilobit representa 1000 bits i no 1024 bits). Els noms i símbols recomanats per als prefixos de les potències de 2 són els següents:

Taula 7. Prefixos SI

Factor	Nom	Símbol	Factor	Nom	Símbol
10^1	deca	da	10^{-1}	deci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	mil·li	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y

kibi	Ki	2^{10}
mebi	Mi	2^{20}
gibi	Gi	2^{30}
tebi	Ti	2^{40}
pebi	Pi	2^{50}
exbi	Ei	2^{60}
zebi	Zi	2^{70}
yobi	Yi	2^{80}

El grup format per un símbol de prefix i un símbol d'unitat constitueix un nou símbol d'unitat inseparable (que forma un múltiple o submúltiple de la unitat en qüestió) que pot ser elevat a una potència positiva o negativa i que es pot combinar amb altres símbols d'unitats per a formar símbols compostos d'unitats.

Exemples: pm (picòmetre), mmol (mil·limol), G Ω (gigaohm), THz (terahertz)

$$2,3 \text{ cm}^3 = 2,3 (\text{cm})^3 = 2,3 (10^{-2} \text{ m})^3 = 2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ cm}^{-1} = 1 (\text{cm})^{-1} = 1 (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} = 100 \text{ m}^{-1}.$$

De la mateixa manera, els noms dels prefixos no se separen dels noms de les unitats a les quals estan units. Així, per exemple, *mil·límetre*, *micropascal* i *meganeuon* s'escriuen en una sola paraula.

Els símbols dels prefixos compostos, és a dir, els símbols dels prefixos formats per juxtaposició de dos o més símbols de prefixos, no estan permesos. Aquesta regla s'aplica també als noms dels prefixos compostos.

Els símbols dels prefixos no es poden utilitzar sols o units al nombre 1, el símbol de la unitat *u*. Igualment, els noms dels prefixos no es poden unir al nom de la unitat *u*, és a dir, a la paraula *u*.

El kilogram és l'única unitat SI coherent el nom i el símbol de la qual, per raons històriques, té un prefix. Els noms i els símbols dels múltiples i submúltiples decimals de la unitat de massa es formen unint els noms de prefixos al mot *gram* i de símbols d'aquests prefixos al símbol de la unitat «g». Així, 10^{-6} kg s'escriu *milligram*, mg, i no *microkilogram*, μkg .

4 Unitats que no pertanyen al SI l'ús de les quals s'accepta en el SI

El SI inclou les unitats de referència aprovades a escala internacional en funció de les quals es defineixen totes les altres unitats. Les unitats SI coherents tenen l'avantatge considerable de no haver d'efectuar conversions d'unitats quan es donen valors particulars a les magnituds en les equacions de les magnituds.

Això no obstant, cal reconèixer que algunes unitats que no pertanyen al SI encara són molt utilitzades i encara ho continuaran sent durant molts anys. Per això, el CIPM ha acceptat que algunes unitats que no pertanyen al SI es facin servir amb el SI; aquestes unitats es mostren a la taula 8. Malgrat tot, quan s'utilitzen aquestes unitats, cal comprendre que es perden els avantatges del SI. Els prefixos SI es poden fer servir amb moltes d'aquestes unitats, però no és possible fer-ho, per exemple, amb les unitats de temps que no pertanyen al SI.

Taula 8. Unitats que no pertanyen al SI l'ús de les quals s'accepta en el SI

Magnitud	Nom de la unitat	Símbol de la unitat	Valor en unitats SI
temps	minut	min	1 min = 60 s
	hora	h	1 h = 60 min = 3600 s
	dia	d	1 d = 24 h = 86 400 s
longitud	unitat astronòmica ^a	au	1 au = 149 597 870 700 m
angle pla i de fase	grau	°	1° = (π/180) rad
	minut	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
	segon ^b	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
superfície	hectàrea ^c	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
volum	litre ^d	l, L	1 l = 1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
massa	tona ^e	t	1 t = 10 ³ kg
	dalton ^f	Da	1 Da = 1,660 539 066 60(50) × 10 ⁻²⁷ kg
energia	electró-volt ^g	eV	1 eV = 1,602 176 634 × 10 ⁻¹⁹ J
relacions logarítmiques	neper ^h	Np	vegeu les notes al peu del text
	bel ^h	B	
	decibel ^h	dB	

El gal (símbol: Gal) és una unitat que no pertany al SI usada en geodèsia i geofísica per a expressar l'acceleració causada per la gravetat.

1 Gal = 1 cm s⁻² = 10⁻² m s⁻²

- a) Decisió de la XXVIII Assemblea General de la Unió Astronòmica Internacional (IAU) (Resolució B2, 2012).
- b) En astronomia, els angles petits es mesuren en segons d'arc (és a dir, en segons d'un angle pla), amb símbol as o ", i en mil·lisegons d'arc, microsegons d'arc i picosegons d'arc, amb símbols mas, μas i pas, respectivament, en què *segon d'arc* és un altre nom per al segon de l'angle pla.
- c) El CIPM va adoptar la unitat *hectàrea* i el seu símbol ha el 1879 (PV, 1879, 41). L'hectàrea es fa servir per a expressar superfícies agràries.
- d) El CIPM va adoptar el litre i el seu símbol l (en minúscula) el 1879 (PV, 1879, 41). La 16a CGPM va adoptar el símbol L (en majúscula) (1979, Resolució 6; CR, 101, i *Metrologia*, 1980, **16**, 56-57), com a alternativa per a evitar el risc de confusió entre la lletra l i el nombre u, 1.
- e) El CIPM va adoptar la tona i el seu símbol t el 1879 (PV, 1879, 41). Als països de parla anglesa, aquesta unitat se sol designar *tona mètrica*.

- f) El dalton (Da) i la unitat de massa atòmica unificada (u) són denominacions alternatives (i símbols) per a la mateixa unitat, igual a 1/12 de la massa de l'àtom de ^{12}C no lligat, en repòs i en l'estat fonamental. Aquest valor del dalton és el valor recomanat a l'ajustament de 2018 de CODATA.
- g) L'electró-volt (eV) és l'energia cinètica adquirida per un electró després de travessar una diferència de potencial d'1 V en el buit. L'electró-volt es combina sovint amb els prefixos SI.
- h) Quan es fan servir aquestes unitats, és important precisar quina és la naturalesa de la magnitud en qüestió i el valor de referència utilitzat.
-

La taula 8 també mostra les unitats de les magnituds logarítmiques: el neper, el bel i el decibel. S'utilitzen per a proporcionar informació sobre la naturalesa del logaritme d'un quocient entre magnituds. El neper, Np, s'usa per a expressar el valor dels logaritmes neperians (o naturals) de quocients de magnituds, $\ln = \log_e$. El bel i el decibel, B i dB, $1 \text{ dB} = (1/10) \text{ B}$, s'utilitzen per a expressar el valor de logaritmes de base 10 de quocients entre magnituds, $\lg = \log_{10}$. La igualtat $L_X = m \text{ dB} = (m/10) \text{ B}$ (en què m és un nombre) s'ha d'interpretar amb el significat que $m = 10 \lg(X/X_0)$. L'ús de les unitats *neper*, *bel* i *decibel* en el SI va ser acceptat pel CIPM, però no es considera que en formin part.

Existeixen moltes altres unitats que no pertanyen al SI que o bé tenen un interès històric o bé encara es fan servir en un àmbit especialitzat (com el barril de petroli) o en un país (com la polzada, el peu o la iarda). El CIPM no veu cap raó per a continuar utilitzant-les en els treballs científics i tècnics moderns. Tanmateix, és important conèixer la relació entre aquestes unitats i les unitats SI corresponents, i això previsiblement continuarà sent cert durant molts anys.

5 Normes d'escriptura dels noms i símbols de les unitats i expressió dels valors de les magnituds

5.1 Ús dels símbols i noms de les unitats

Els principis generals que regeixen l'escriptura dels símbols de les unitats i els nombres es van proposar inicialment a la 9a Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM, 1948, Resolució 7). Posteriorment, els va adoptar l'Organització Internacional de Normalització (ISO), la Comissió Electrotècnica Internacional (IEC) i altres organitzacions internacionals. Actualment hi ha un acord general en la manera d'expressar els símbols i els noms de les unitats, incloent-hi els símbols i els noms dels prefixos, així com els símbols i els valors de les magnituds. El respecte a aquestes regles i les convencions d'estil, les més importants de les quals es tracten en aquest capítol, facilita la lectura i la claredat dels resultats numèrics expressats en unitats SI.

5.2 Símbols de les unitats

Els símbols de les unitats s'imprimeixen en lletra rodona (rectes), independentment de la família tipogràfica utilitzada en el text en què es trobin. En general, s'escriuen en minúscules excepte si el nom de la unitat deriva d'un nom propi. En aquest cas, la primera lletra del símbol s'escriu en majúscula.

El símbol del litre és una excepció a aquesta regla. La 16a CGPM (1979, Resolució 6) va aprovar la utilització de la lletra L en majúscula o l en minúscula com a símbol del litre, per evitar la confusió entre el nombre 1 (u) i la lletra l (ela).

Un prefix de múltiple o submúltiple, quan s'utilitza, forma part de la unitat i precedeix el símbol de la unitat, sense cap espai entre el símbol del prefix i el símbol de la unitat. Un prefix mai no es fa servir sol i mai no s'utilitzen prefixos compostos.

Els símbols de les unitats són entitats matemàtiques i no abreviatures. Per tant, no van seguits d'un punt, excepte si es troben al final d'una frase. No es fa servir el plural ni es poden barrejar símbols d'unitats amb noms d'unitats en la mateixa expressió, ja que els noms no són entitats matemàtiques.

Per a formar els productes i quocients dels símbols de les unitats, s'apliquen les normes habituals de multiplicació o de divisió algèbriques. La multiplicació s'ha d'indicar mitjançant un espai o un punt volat (·) per a evitar que certs prefixos s'interpretin erròniament com un símbol d'unitat. La divisió s'indica mitjançant una línia horitzontal, una barra obliqua (/) o exponents negatius. Quan es combinen diversos símbols d'unitats, cal tenir cura d'evitar qualsevol ambigüïtat, per exemple, fent servir claudàtors, parèntesis o exponents negatius. En una expressió donada, si no té parèntesis, no s'ha d'utilitzar més d'una barra obliqua, per a evitar les ambigüïtats.

No es permet fer servir abreviatures per als símbols i noms de les unitats, com seg (per s o segon), mm quad. (per mm² o mil·límetre quadrat), cc (per cm³ o centímetre cúbic) o mps (per m/s o metre per segon). La utilització correcta dels símbols de les unitats del SI, i de les unitats en general, com s'ha indicat en els capítols anteriors d'aquest opuscle, és obligatòria. Així s'eviten les ambigüïtats i els malentesos respecte als valors de les magnituds.

5.3 Noms de les unitats

Els noms de les unitats s'imprimeixen en lletra rodona (rectes) i es consideren noms comuns. Comencen amb minúscula (encara que el símbol de la unitat comenci amb majúscula), excepte si es troben situats al principi d'una frase o en un títol en majúscules. D'acord amb aquesta regla, l'escriptura correcta del nom de la unitat el símbol de la qual és °C és grau Celsius (la unitat *grau* comença per la lletra *g* en minúscula i l'atribut *Celsius* comença per la lletra *c* en majúscula perquè és un nom propi).

Tot i que els valors de les magnituds generalment s'expressen mitjançant nombres i símbols d'unitats, si per alguna raó el nom de la unitat és més adient que el seu símbol, convé escriure el nom complet de la unitat.

Quan el nom de la unitat es combina amb el prefix d'un múltiple o un submúltiple, no es deixa cap espai ni es posa cap guió entre el nom del prefix i el de la unitat. El conjunt format pel nom del prefix i el de la unitat constitueix un sol mot (vegeu també el capítol 3).

Quan el nom d'una unitat derivada es forma per juxtaposició de noms d'unitats individuals, és convenient deixar un espai o utilitzar un guió per a separar cadascun d'aquests noms.

5.4 Normes i convencions estilístiques per a expressar els valors de les magnituds

5.4.1 Valor i valor numèric d'una magnitud, i ús del càlcul formal

Els símbols de les magnituds generalment estan formats per una sola lletra en cursiva, però es pot especificar informació addicional mitjançant un subíndex, un superíndex o parèntesis. Per exemple, C és el símbol recomanat per a la capacitat calorífica; c_m , per a la capacitat calorífica molar; $c_{m,p}$, per a la capacitat calorífica molar a pressió constant, i $c_{m,v}$, per a la capacitat calorífica molar a volum constant.

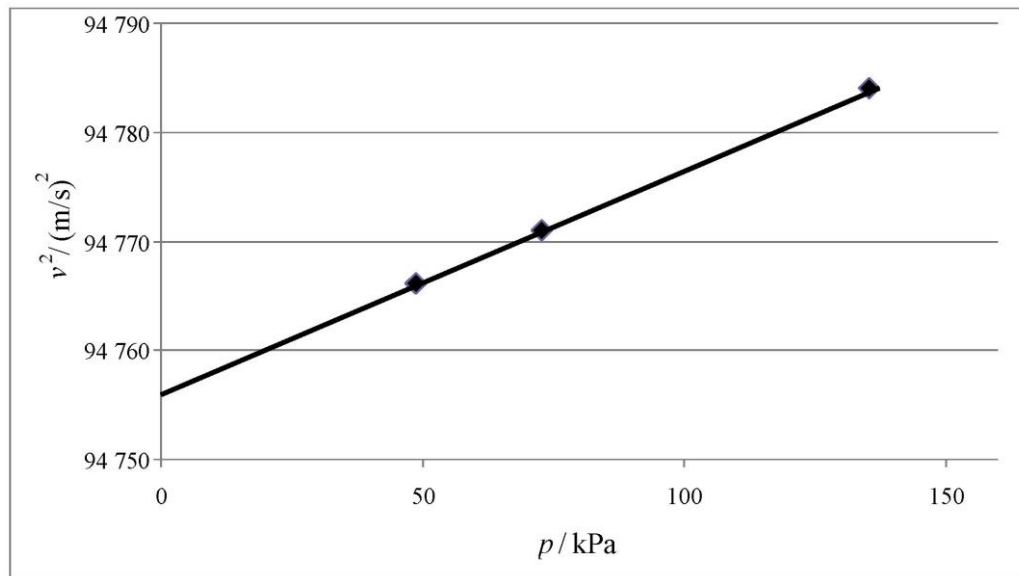
Els noms i els símbols recomanats per a les magnituds figuren en nombroses obres de referència, com, per exemple, les sèries de normes sobre magnituds i unitats ISO/IEC 80000, el «llibre vermell» de la Comissió de Símbols, Unitats, Nomenclatura, Masses Atòmiques i Constants Fonamentals (SUNAMCO) de la Unió Internacional de Física Pura i Aplicada (IUPAP, International Union of Pure and Applied Physics) titulat *Symbols, units and nomenclature in Physics* i el «llibre verd» de la Unió Internacional de Química Pura i Aplicada (IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry) titulat *Magnitudes, units i símbols en química física*. Això no obstant, els símbols de les magnituds només són recomanacions (mentre que és obligatori utilitzar els símbols correctes per a les unitats). En determinades circumstàncies, els autors poden preferir fer servir un símbol no recomanat per a una magnitud donada, per exemple per a evitar una confusió resultant de l'ús del mateix símbol per a dues magnituds diferents. Aleshores cal precisar clarament quin és el significat del símbol. El nom d'una magnitud, o el símbol emprat per a expressar-la, no obliga en cap cas a escollir una unitat en particular.

Els símbols de les unitats es tracten com a entitats matemàtiques. Quan s'expressa el valor d'una magnitud com a producte d'un valor numèric per una unitat, el valor numèric i la unitat es poden tractar d'acord amb les regles ordinàries de l'àlgebra. Aquest mètode aplica els principis del càlcul formal o àlgebra de magnituds. Per exemple, l'equació $p = 48 \text{ kPa}$ també es pot escriure $p/\text{kPa} = 48$. Sovint s'escriu així el quocient d'una magnitud i una unitat a la capçalera d'una

taula, per tal que les entrades de la taula siguin simplement nombres. Per exemple, una taula que expressa la velocitat al quadrat en funció de la pressió podria tenir la forma següent:

p/kPa	$v^2/(\text{m/s})^2$
48,73	94 766
72,87	94 771
135,42	94 784

Els eixos d'un gràfic també es poden etiquetar d'aquesta manera, a fi que els intervals siguin purament numèrics, tal com es mostra en la figura següent:



5.4.2 Símbols de les magnituds i les unitats

El símbol de la unitat no s'ha d'utilitzar per a proporcionar informació específica sobre la magnitud en qüestió i no ha de ser mai l'única font d'informació sobre la magnitud. Les unitats no han de proporcionar mai informació addicional sobre la naturalesa de la magnitud; aquest tipus d'informació ha d'acompanyar el símbol de la magnitud i no el de la unitat.

Per exemple, la diferència màxima de potencial elèctric s'expressa:
 $U_{\text{max}} = 1000 \text{ V}$
i no $U = 1000 \text{ V}_{\text{max}}$.
La fracció massica del coure en una mostra de silici s'expressa:
 $w(\text{Cu}) = 1,3 \times 10^{-6}$
i no $1,3 \times 10^{-6} \text{ w/w}$.

5.4.3 Escriptura del valor d'una magnitud

El valor numèric precedeix sempre la unitat i es deixa un espai entre el nombre i la unitat. Així, el valor d'una magnitud és el producte d'un nombre per una unitat, considerant l'espai entre el nombre i la unitat com a signe de multiplicació (igual que l'espai entre unitats). Les úniques excepcions a aquesta regla són els símbols d'unitat del grau, el minut i el segon d'angle pla ($^{\circ}$, $'$ i $''$, respectivament), amb els quals no es deixa cap espai entre el valor numèric i el símbol de la unitat.

$m = 12,3 \text{ g}$, on m és utilitzat com a símbol de la magnitud *massa*, però $\varphi = 30^{\circ} 22' 8''$, on φ és emprat com a símbol de la magnitud *angle pla*.

Aquesta regla implica que el símbol $^{\circ}\text{C}$ per al grau Celsius ha d'anar precedit d'un espai per a expressar el valor de la temperatura Celsius, t .

$t = 30,2^{\circ}\text{C}$, però no $t = 30,2^{\circ}\text{C}$ ni $t = 30,2^{\circ}\text{C}$

En anglès, fins i tot quan el valor d'una magnitud s'utilitza com a adjectiu, convé deixar un espai entre el valor numèric i el símbol de la unitat. Quan s'escriu el nom de la unitat amb totes les lletres cal aplicar les regles gramaticals habituals.

En qualsevol expressió, només es pot utilitzar una unitat. Una excepció a aquesta regla és l'expressió dels valors de les magnituds *temps* i *angle pla* expressats mitjançant unitats fora del SI. Tanmateix, per a angles plans, generalment és preferible dividir el grau de forma decimal. Així, és millor escriure 22,20° que no pas 22° 12', excepte en àmbits com la navegació, la cartografia o l'astronomia i per al mesurament d'angles molt petits.

$l = 10,234 \text{ m}$,
però no
 $l = 10 \text{ m } 23,4 \text{ cm}$

5.4.4 Escriptura dels nombres i separador decimal

El símbol utilitzat per a separar la part entera d'un nombre de la seva part decimal s'anomena *separador decimal*. D'acord amb la 22a CGPM (2003, Resolució 10), «el símbol del separador decimal pot ser el punt o la coma a la mateixa línia d'escriptura». El separador decimal escollit ha de ser el d'ús habitual en el context.

Si el nombre està comprès entre +1 i -1, el separador decimal va sempre precedit d'un zero.

-0,234,
però no
-,234

D'acord amb la 9a CGPM (1948, Resolució 7) i la 22a CGPM (2003, Resolució 10), els nombres amb moltes xifres es poden agrupar en conjunts de tres xifres separades per un espai per tal de facilitar-ne la lectura. Aquests grups no se separen mai per punts ni per comes. Tanmateix, quan només hi ha quatre xifres abans o després del separador decimal, és freqüent no aïllar una xifra amb un espai. El costum d'agrupar les xifres així és una qüestió de preferència personal, i no sempre se segueix en certs àmbits especialitzats com el disseny industrial, els documents financers i els escrits que han de ser llegits per ordinador.

43 279,168 29,
però no
43.279,168.29

3279,1683
o bé
3 279,168 3

El format utilitzat per a escriure els nombres d'una taula no ha de variar en una mateixa columna.

5.4.5 Expressió de la incertesa de mesura associada al valor d'una magnitud

La incertesa associada al valor estimat d'una magnitud ha de ser avaluada i expressada d'acord amb la Guia JCGM 100:2008 (GUM 1995 amb petites correccions), *Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. La incertesa estàndard associada a una magnitud x es designa per $u(x)$. Una manera còmoda de representar la incertesa es mostra en l'exemple següent:

$$m_n = 1,674\,927\,471\,(21) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

en què m_n és el símbol de la magnitud (aquí la massa del neutró) i el nombre entre parèntesis, el valor numèric de la incertesa estàndard referida a les dues últimes xifres del valor estimat de m_n ; en aquest cas: $u(m_n) = 0,000\,000\,021 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Si en lloc d'una incertesa estàndard $u(x)$ es fa servir una incertesa expandida³ $U(x)$, s'ha de precisar la probabilitat de cobriment p i el factor de cobriment k .

3. Hi ha debat sobre si el terme hauria de ser *incertesa expandida* o *incertesa eixamplada*. A la tercera edició del *Vocabulari internacional de metrologia* (VIM), feta per l'Associació Catalana de Ciències de Laboratori Clínic i disponible al web del TERMCAT (TERMCAT, 2015), es recull el terme *incertesa expandida* i la Secció Catalana de Metrologia empra el terme *incertesa eixamplada*. Mentre no es tracti el tema en la quarta edició del VIM, en aquest text s'emprarà el terme recollit al web del TERMCAT. (N. de la t.)

5.4.6 Multiplicació o divisió dels símbols de les magnituds, dels valors de les magnituds i dels nombres

Per a multiplicar o dividir els símbols de les magnituds, es pot utilitzar qualsevol de les formes següents: ab , $a b$, $a \cdot b$, $a \times b$, a/b , $\frac{a}{b}$, $a b^{-1}$.

Quan es multiplica el valor de les magnituds, convé usar un signe de multiplicació, \times , o els parèntesis (o claudàtors), però mai un punt volat. Quan es multipliquen nombres, convé utilitzar únicament el signe de multiplicació \times .

Quan es divideixen els valors de les magnituds per una barra obliqua, s'empren els parèntesis per a evitar qualsevol ambigüitat.

Exemples:

$$F = ma$$

per a una força igual a la massa multiplicada per l'acceleració

$$(53 \text{ m/s}) \times 10,2 \text{ s}$$

o $(53 \text{ m/s})(10,2 \text{ s})$

$$25 \times 60,5$$

però no
 $25 \cdot 60,5$

$$(20 \text{ m})/(5 \text{ s}) = 4 \text{ m/s}$$

$(a/b)/c$, però no $a/b/c$

5.4.7 Escriptura dels valors de les magnituds expressades per nombres

Com s'ha explicat a la secció 2.3.3, els valors de les magnituds d'unitat u s'expressen simplement mitjançant nombres. El símbol d'unitat 1 o el nom d'unitat u no s'esmenta explícitament. Com que els símbols de prefixos SI no es poden unir al símbol 1 ni al nom d'unitat u, les potències de 10 s'utilitzen per a expressar valors particularment grans o petits.

Les magnituds que són quocients entre magnituds d'un mateix tipus (magnituds de longitud, fraccions molars, etc.) es poden expressar amb unitats (m/m, mol/mol) per tal de facilitar la comprensió de la magnitud expressada i per tal de permetre l'ús de prefixos SI, si es prefereix ($\mu\text{m}/\text{m}$, nmol/mol). Això no és possible amb les magnituds de recompte que són simplement nombres.

El símbol % (per cent), reconegut internacionalment, es pot usar amb el SI. Quan s'utilitza, convé deixar un espai entre el nombre i el símbol %. És preferible emprar el símbol % en comptes de l'expressió *per cent*. En un text, el símbol % en general significa 'parts per cent'. No s'han de fer servir expressions com ara *percentatge de massa*, *percentatge de volum*, *percentatge de quantitat de substància*. La informació addicional sobre la magnitud en qüestió s'ha de proporcionar mitjançant el nom i el símbol de la magnitud.

També s'utilitza el terme *part per milió* (abreviatura «ppm»), que significa 10^{-6} en valor relatiu, 1×10^{-6} . L'expressió és anàloga a *per cent* amb el sentit de 'parts per cent'. Els termes *part per bilió* i *part per trilió* i les seves abreviatures respectives «ppb» i «ppt» també es fan servir, però, com que el seu significat varia segons la llengua, és preferible evitar-los.

$n = 1,51$,
però no $n = 1,51 \times 1$,
on n és el símbol de la magnitud *índex de refracció*.

Tot i que als països de parla anglesa el terme *bilió* correspon a 10^9 i el terme *trilió* a 10^{12} , el terme *bilió* a vegades pot correspondre a 10^{12} i *trilió*, a 10^{18} . L'abreviatura ppt a vegades es pot interpretar com una part per miler (o mil·lèsim/a), cosa que provoca encara més confusió.

5.4.8 Angles plans, angles sòlids i angles de fase

La unitat coherent del SI per a l'angle pla i l'angle de fase és el radian, amb símbol rad. La de l'angle sòlid és l'estereoradian, amb símbol sr.

Quan s'expressa en radians, l'angle pla entre dues línies que tenen l'origen en un punt comú és igual a la longitud de l'arc de circumferència s que recorre entre aquestes línies un radi vector de longitud r des del punt comú, dividit entre la longitud del radi vector, $\theta = s/r$ rad. L'angle de fase (habitualment anomenat *fase*) és l'argument de qualsevol nombre complex. És l'angle entre l'eix real positiu i el radi de la representació polar del nombre complex al pla complex.

Quan l'11a CGPM va adoptar el SI el 1960, es va crear la categoria *unitats suplementàries* per tal d'incloure-hi el radian i l'estereoradian.

Un radian correspon a l'angle pel qual $s = r$; així, $1 \text{ rad} = 1$. La mesura de l'angle recte és exactament igual al nombre $\pi/2$.

El grau és una convenció històrica. La conversió entre radians i graus prové de la relació $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$. Cal remarcar que el grau, amb símbol $^\circ$, no és una unitat del SI.

L'angle sòlid, expressat en estereoradians, correspon al quocient entre l'àrea A de la superfície d'una esfera de radi r i el radi al quadrat, $\Omega = A/r^2 \text{ sr}$. Un estereoradian correspon a l'angle sòlid per al qual $A = r^2$; així, $1 \text{ sr} = 1$.

Les unitats rad i sr corresponen, respectivament, als quocients entre dues longituds i dues longituds al quadrat. Tot i això, les unitats rad i sr només s'han de fer servir per a expressar angles i angles sòlids, i no per a expressar quocients entre longituds o longituds al quadrat en general.

Al cap d'unes dècades, la CGPM va decidir:
1) «interpretar les unitats suplementàries al SI, és a dir, el radian i l'estereoradian, com a unitats derivades adimensionals, els noms i símbols de les quals es poden, però no necessàriament, usar en les expressions d'altres unitats derivades del SI, segons convingui»
i 2) suprimir la classe independent dins el SI de les unitats suplementàries (Resolució 8 de la 20a CGPM (1995)).

Annex 1. Decisions de la CGPM i del CIPM¹

Aquest annex agrupa les decisions de la Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM) i del Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM) relacionades directament amb les definicions de les unitats del sistema internacional (SI), els prefixos que s'han de fer servir i les convencions relatives a l'escriptura dels símbols de les unitats i els nombres. No es tracta d'una llista exhaustiva de decisions de la CGPM i del CIPM. Per a consultar totes aquestes decisions, cal remetre's als volums successius dels *Comptes rendus* de la Conferència General de Pesos i Mesures (CR) i del *Procès-verbaux* del Comitè Internacional de Pesos i Mesures (PV) i, per a les decisions recents, a *Metrologia*.

Com que el SI no és estàtic, sinó que evoluciona amb el progrés de la metrologia, certes decisions s'han derogat o modificat; d'altres s'han clarificat amb addicions. Les decisions que s'han modificat s'identifiquen amb un asterisc (*) i s'enllacen a una nota que fa referència a la decisió que dona caràcter oficial a aquesta modificació.

El text original de les decisions es mostra amb una font diferent (lletra de pal sec) per distingir-lo del text principal. El BIPM va afegir els asteriscs i les notes per fer el text més comprensible. No formen part de les decisions pròpiament dites.

Les decisions de la CGPM i del CIPM es troben en aquest annex per ordre cronològic, de 1889 a 2018, a fi de preservar la continuïtat. Tanmateix, per tal de poder identificar fàcilment les decisions que tenen a veure amb un camp particular, a continuació s'inclou un índex que indica les reunions en les quals es van prendre aquestes decisions i proporciona els números de pàgina en què es reproduïxen les publicacions originals.

1. En aquesta traducció al català no s'han unificat sistemàticament els aspectes tipogràfics, de convencions ni la disposició del text per la voluntat explícita dels editors de reproduir fidelment els textos d'aquesta part de l'original francès. (N. de l'ed.)

Índex de l'annex 1

Decisions referents a l'establiment del SI		pàgina
9a CGPM, 1948:	decisió d'establir el SI	50
10a CGPM, 1954:	decisió d'adoptar les sis primeres unitats bàsiques	52
CIPM 1956:	decisió d'adoptar el nom sistema internacional d'unitats	53
11a CGPM, 1960:	confirmació del nom i de l'abreviació SI, noms dels prefixos des de tera a pico, establiment de les unitats suplementàries rad i sr, establiment de la llista d'algunes unitats derivades	54
CIPM, 1969:	declaracions sobre les unitats bàsiques, suplementàries, derivades i coherents i la utilització dels prefixos	60
CIPM, 2001:	«unitats SI» i «unitats del SI»	72
23a CGPM, 2007:	possible redefinició d'algunes unitats bàsiques del sistema internacional d'unitats (SI)	80
24a CGPM, 2011:	possible revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	82
25a CGPM, 2014:	revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	88
26a CGPM, 2018:	revisió del sistema internacional d'unitats (SI) (implementació el 20 de maig de 2019)	91

Decisions referents a les unitats bàsiques del SI

Longitud

1a CGPM, 1889:	sanció del prototip del metre	47
7a CGPM, 1927:	definició del metre pel prototip internacional	48
10a CGPM, 1954:	adopció del metre com a unitat bàsica	52
11a CGPM, 1960:	redefinició del metre mitjançant la radiació del criptó 86	53
15a CGPM, 1975:	valor recomanat de la velocitat de la llum	62
17a CGPM, 1983:	redefinició del metre en funció de la velocitat de la llum, <i>mise en pratique</i> de la definició del metre	66
CIPM, 2002:	revisió de la <i>mise en pratique</i> de la definició del metre	72
CIPM, 2003:	revisió de la llista de radiacions recomanades	75
CIPM, 2005:	revisió de la llista de radiacions recomanades	77
CIPM, 2007:	revisió de la llista de radiacions recomanades	79
23a CGPM, 2007:	revisió de la <i>mise en pratique</i> de la definició del metre i desenvolupament de nous patrons òptics de freqüència	79
CIPM, 2009:	actualització de la llista de freqüències patró	82
24a CGPM, 2011:	possible revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	82

24a CGPM, 2011:	revisió de la <i>mise en pratique</i> de la definició del metre i desenvolupament de nous patrons òptics de freqüència	86
CIPM, 2013:	actualització de la llista de freqüències patró	87
26a CGPM, 2018:	revisió del sistema internacional d'unitats (SI) (implementació el 20 de maig de 2019)	91

Massa

1a CGPM, 1889:	sanció del prototip del kilogram	47
3a CGPM, 1901:	declaració relativa a la diferència entre massa i pes, i el valor convencional de g_n	48
10a CGPM, 1954:	adopció del kilogram com a unitat bàsica	52
CIPM, 1967:	declaració sobre els prefixos del gram	57
21a CGPM, 1999:	possible redefinició del kilogram	71
23a CGPM, 2007:	possible redefinició d'algunes unitats bàsiques del sistema internacional d'unitats (SI)	80
24a CGPM, 2011:	possible redefinició futura del sistema internacional d'unitats, el SI	82
25a CGPM, 2014:	redefinició futura del sistema internacional d'unitats, el SI	88
26a CGPM, 2018:	revisió del sistema internacional d'unitats (SI) (implementació el 20 de maig de 2019)	91

Temps

10a CGPM, 1954:	adopció del segon com a unitat bàsica	52
CIPM, 1956:	definició del segon com la fracció de l'any tròpic 1900	52
11a CGPM, 1960:	ratificació de la definició del segon donada pel CIPM el 1956	54
CIPM, 1964:	declaració que el patró que cal emprar és la transició hiperfina del cesi 133	56
12a CGPM, 1964:	atorgament de poder al CIPM per a designar els patrons de freqüència atòmica i molecular que cal emprar	56
13a CGPM, 1967/1968:	definició del segon mitjançant la transició del cesi	58
CCDS, 1970:	definició del temps atòmic internacional, TAI	61
14a CGPM, 1971:	sol·licitud al CIPM per a definir i establir el temps atòmic internacional, TAI	61
15a CGPM, 1975:	sanció del temps universal coordinat, UTC	62
CIPM, 2006:	representacions secundàries del segon	78
23a CGPM, 2007:	revisió de la <i>mise en pratique</i> de la definició del metre i elaboració de nous patrons òptics de freqüència	79
CIPM, 2009:	actualització de la llista de freqüències patró	82
24a CGPM, 2011:	possible revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	82
24a CGPM, 2011:	revisió de la <i>mise en pratique</i> de la definició del metre i elaboració de nous patrons òptics de freqüència	86

CIPM, 2013:	actualització de la llista de freqüències patró	87
CIPM, 2015:	actualització de la llista de freqüències patró	89
26a CGPM, 2018:	revisió del sistema internacional d'unitats (SI) (implementació el 20 de maig de 2019)	91

Unitats elèctriques

CIPM, 1946:	definició de les unitats elèctriques coherents en el sistema d'unitats MKS (metre-kilogram-segon) (implementació l'1 de gener de 1948)	49
10a CGPM, 1954:	adopció de l'ampere com a unitat bàsica	52
14a CGPM, 1971:	adopció del nom siemens, símbol S, per a la conductància elèctrica	61
18a CGPM, 1987:	modificació prevista de les representacions del volt i de l'ohm	67
CIPM, 1988:	definició del valor convencional de la constant de Josephson (implementació l'1 de gener de 1990)	68
CIPM, 1988:	definició del valor convencional de la constant de Von Klitzing (implementació l'1 de gener de 1990)	69
23a CGPM, 2007:	possible redefinició d'algunes unitats bàsiques del sistema internacional d'unitats (SI)	80
24a CGPM, 2011:	possible revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	82
25a CGPM, 2014:	revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	88
26a CGPM, 2018:	revisió del sistema internacional d'unitats (SI) (implementació el 20 de maig de 2019)	91

Temperatura termodinàmica

9a CGPM, 1948:	adopció del punt triple de l'aigua com a punt de referència per a la temperatura termodinàmica, adopció del grau Celsius i definició del zero com a temperatura de referència inferior en 0,01 graus a la del punt triple de l'aigua	49
CIPM, 1948:	adopció del nom grau Celsius per a l'escala de temperatura Celsius	50
10a CGPM, 1954:	definició de la temperatura termodinàmica del punt triple de l'aigua a 273,16 graus Kelvin exactament, definició de l'atmosfera estàndard	52
10a CGPM, 1954:	adopció del grau Kelvin com a unitat bàsica	52
13a CGPM, 1967/1968:	definició oficial del kelvin, símbol K	58
CIPM, 1989:	escala internacional de temperatura de 1990, EIT-90	69
CIPM, 2005:	nota afegida a la definició del kelvin a propòsit de la composició isotòpica de l'aigua	76
23a CGPM, 2007:	aclariment sobre la definició del kelvin, unitat de temperatura termodinàmica	80
23a CGPM, 2007:	possible redefinició d'algunes unitats bàsiques del sistema internacional d'unitats (SI)	80

24a CGPM, 2011:	possible revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	82
25a CGPM, 2014:	revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	88
26a CGPM, 2018:	revisió del sistema internacional d'unitats (SI) (implementació el 20 de maig de 2019)	91

Quantitat de substància

14a CGPM, 1971:	definició del mol, símbol mol, com la 7a unitat bàsica i normes d'utilització	62
21a CGPM, 1999:	adopció del nom especial katal, kat	71
23a CGPM, 2007:	possible redefinició d'algunes unitats bàsiques del sistema internacional d'unitats (SI)	80
24a CGPM, 2011:	possible revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	82
25a CGPM, 2014:	revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	88
26a CGPM, 2018:	revisió del sistema internacional d'unitats (SI) (implementació el 20 de maig de 2019)	91

Intensitat lluminosa

CIPM, 1946:	definició de les unitats fotomètriques, bugia nova, nou lumen i lumen (implementació l'1 de gener de 1948)	48
10a CGPM, 1954:	adopció de la candela com a unitat bàsica	52
13a CGPM, 1967/1968:	definició de la candela, símbol cd, en funció del cos negre	59
16a CGPM, 1979:	redefinició de la candela a partir d'una radiació monocromàtica	63
24a CGPM, 2011:	possible revisió futura del sistema internacional d'unitats, el SI	82
26a CGPM, 2018:	revisió del sistema internacional d'unitats (SI) (implementació el 20 de maig de 2019)	91

Decisions relatives a les unitats SI derivades i les unitats suplementàries

Unitats SI derivades

12a CGPM, 1964:	decisió d'acceptar la utilització del curie com a unitat fora del SI	57
13a CGPM, 1967/1968:	exemples d'unitats derivades	59
15a CGPM, 1975:	adopció dels noms especials becquerel, Bq, i gray, Gy	63
16a CGPM, 1979:	adopció del nom especial sievert, Sv	64
CIPM, 1984:	aclariment de les relacions entre la dosi absorbida (unitat SI gray) i la dosi equivalent (unitat SI sievert)	67
CIPM, 2002:	modificació de les relacions entre la dosi absorbida i la dosi equivalent	74

Unitats suplementàries

CIPM, 1980:	decisió d'interpretar les unitats suplementàries com a unitats derivades adimensionals	65
20a CGPM, 1995:	decisió de suprimir la classe de les unitats suplementàries, i confirmació de la interpretació del CIPM segons la qual són unitats derivades adimensionals	70

Decisions relatives a la terminologia i acceptació de les unitats per a utilitzar-les en el SI**Prefixos SI**

12a CGPM, 1964:	decisió d'afegir femto i atto a la llista de prefixos	57
15a CGPM, 1975:	decisió d'afegir peta i exa a la llista de prefixos	63
19a CGPM, 1991:	decisió d'afegir zetta, zepto, yotta i yocto a la llista de prefixos	70

Símbols i nombres d'unitats

9a CGPM, 1948:	decisió sobre les normes d'escriptura dels símbols i nombres de les unitats	51
----------------	---	-----------

Noms d'unitats

13a CGPM, 1967/1968:	derogació de l'ús del micró i la bugia nova com a unitats acceptades per a utilitzar-les en el SI	60
----------------------	---	-----------

Separador decimal

22a CGPM, 2003:	decisió d'autoritzar l'ús del punt o la coma sobre la línia com a separador decimal	75
-----------------	---	-----------

Unitats acceptades per a utilitzar-les en el SI: un exemple, el litre

3a CGPM, 1901:	definició del litre com el volum d'1 kg d'aigua	47
11a CGPM, 1960:	requeriment al CIPM d'estudiar la diferència entre el decímetre cúbic i el litre	55
CIPM, 1961:	recomanació d'expressar els volums en unitats SI i no en litres	56
12a CGPM, 1964:	derogació de la definició anterior del litre i recomanació d'utilitzar el litre com a nom especial per al decímetre cúbic	57
16a CGPM, 1979:	decisió, amb caràcter excepcional, d'autoritzar els símbols L i l per al litre	64

1a CGPM, 1889**■ Sanció dels prototips internacionals del metre i del kilogram (CR, 34-38)***

La Conferència General,

considerant

- el *Compte rendu* del president del Comitè Internacional i l'informe del Comitè Internacional de Pesos i Mesures, on es demostra que, amb la col·laboració de la Secció Francesa de la Comissió Internacional del Metre i del Comitè Internacional de Pesos i Mesures, les determinacions metrologicals fonamentals dels prototips internacionals i nacionals del metre i del kilogram s'han executat amb totes les condicions de garantia i de precisió que comporta l'estat actual de la ciència;
- que els prototips internacionals i nacionals del metre i del kilogram estan formats d'un aliatge de platí amb un 10 per cent d'iridi, amb una precisió de 0,0001;
- la igualtat en longitud del Metre i la igualtat en massa del Kilogram internacionals amb la longitud del Metre i la massa del Kilogram dipositats als Arxius de França;
- que les equacions dels Metres nacionals, en relació amb el Metre internacional, es troben en el límit de 0,01 mil·límetres i que aquestes diferències es basen en una escala termomètrica d'hidrogen que es pot reproduir sempre, a causa de l'estabilitat de l'hidrogen, si s'asseguren unes condicions idèntiques;
- que les equacions dels Kilograms nacionals, en relació amb el Kilogram internacional, es troben en el límit d'1 mil·ligram;
- que el Metre i el Kilogram internacionals i que els Metres i els Kilograms nacionals compleixen les condicions exigides per la Convenció del Metre,

sanciona

A. Pel que fa als prototips internacionals:

1. El Prototip del metre escollit pel Comitè Internacional. Aquest prototip representarà d'ara endavant, a la temperatura del gel fonent, la unitat mètrica de longitud.
2. El Prototip del kilogram adoptat pel Comitè Internacional. Aquest prototip serà considerat a partir d'ara com la unitat de massa.
3. L'escala termomètrica centígrada d'hidrogen, respecte de la qual s'han establert les equacions dels Metres prototips.

B. Pel que fa als prototips nacionals:

...

* L'11a CGPM va derogar la definició del metre el 1960 (Resolució 6, vegeu la pàgina 53).

3a CGPM, 1901**■ Declaració relativa a la definició del litre (CR, 38-39)***

...

La Conferència declara:

1. La unitat de volum, per a les determinacions d'alta precisió, és el volum que ocupa la massa d'1 kilogram d'aigua pura, al seu màxim de densitat i sota la pressió atmosfèrica normal; aquest volum s'anomena «litre».
2. ...

* Definició derogada el 1964 per la 12a CGPM (Resolució 6, vegeu la pàgina 57).

■ Declaració relativa a la unitat de massa i a la definició del pes; valor convencional de g_n (CR, 70)

Tenint en compte la decisió del Comitè Internacional de Pesos i Mesures del 15 d'octubre de 1887, per la qual es defineix el kilogram com la unitat de massa;

Tenint en compte la decisió continguda en la fórmula de sanció dels prototips del sistema mètric, acceptada per unanimitat per la Conferència General de Pesos i Mesures en la seva reunió del 26 de setembre de 1889;

Considerant la necessitat de posar fi a l'ambigüitat que encara hi ha en l'ús corrent respecte al significat del terme *pes*, emprat de vegades en el sentit del terme *massa*, i de vegades en el sentit del terme *esforç mecànic*,

La Conferència declara:

1. El kilogram és la unitat de massa; és igual a la massa del prototip internacional del kilogram;*
2. El terme *pes* designa una magnitud de la mateixa naturalesa que una força; el pes d'un cos és el producte de la massa d'aquest cos per l'acceleració de la gravetat; en concret, el pes normal d'un cos és el producte de la massa d'aquest cos per l'acceleració normal de la gravetat;
3. El nombre adoptat pel Servei Internacional de Pesos i Mesures per al valor de l'acceleració normal de la gravetat és $980,665 \text{ cm/s}^2$, valor ja sancionat per algunes legislacions.**

* Definició derogada el 2018 per la 26a CGPM (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

**Aquest valor de g_n és el valor convencional de referència per al càlcul de la unitat kilogram-força, actualment obsolet.

7a CGPM, 1927

■ Definició del metre pel Prototip internacional (CR, 49)*

La unitat de longitud és el metre, definit per la distància, a 0° , entre els eixos dels dos traçats centrats gravats en la barra de platí irídic dipositada a l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures i declarada Prototip del metre per la 1a Conferència General de Pesos i Mesures; aquest regle és sotmès a la pressió atmosfèrica normal i suportat per dos cilindres d'almenys un centímetre de diàmetre, situats simètricament en un mateix pla horitzontal i a la distància de 571 mm l'un de l'altre.

* Definició derogada el 1960 per la 26a CGPM (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

CIPM, 1946

■ Definició de les unitats fotomètriques (PV, 20, 119-122)*

Resolució

...

4. Les unitats fotomètriques es poden definir de la manera següent:

Bugia nova (unitat d'intensitat lluminosa). — La magnitud de la bugia nova és tal que la lluentor del radiador integral a la temperatura de solidificació del platí sigui de 60 bugies noves per centímetre quadrat.

Nou lumen (unitat de flux lluminós). — El nou lumen és el flux lluminós emès en l'angle sòlid (unitat estereoradian) per una font puntual uniforme que té una intensitat lluminosa d'1 bugia nova.

5. ...

* Les dues definicions incloses en aquesta Resolució van ser ratificades per la 9a CGPM el 1948, que va aprovar, a més, el nom de candela donat a la «bugia nova» (CR, 54). Per al lumen, el qualificatiu «nou» va ser abandonat.

La 13a CGPM va modificar la definició de la candela el 1967 (Resolució 5, vegeu la pàgina 59).

■ Definicions de les unitats elèctriques (PV, 20, 132-133)

Resolució 2

...

4. A) Definicions de les unitats mecàniques utilitzades en les definicions de les unitats elèctriques:

Unitat de força. — La unitat de força [en el sistema MKS (metre, kilogram, segon)] és la força que comunica a una massa d'1 kilogram l'acceleració d'1 metre per segon, cada segon.

Joule (unitat d'energia o de treball). — El joule és el treball efectuat quan el punt d'aplicació d'1 unitat MKS de força [newton] es desplaça una distància d'1 metre en la direcció de la força.

Watt (unitat de potència). — El watt és la potència que produeix una energia igual a 1 joule per segon.

B) Definicions de les unitats elèctriques. El Comitè [Internacional] admet les propostes següents que defineixen la magnitud teòrica de les unitats elèctriques:

Ampere (unitat d'intensitat de corrent elèctric). — L'ampere és la intensitat d'un corrent constant que, mantingut en dos conductors paral·lels, rectilinis, de longitud infinita, de secció circular negligible i col·locats a una distància d'1 metre l'un de l'altre, en el buit, produiria entre aquests conductors una força igual a 2×10^{-7} unitats MKS de força [newton] per metre de longitud.*

Volt (unitat de diferència de potencial i força electromotriu). — El volt és la diferència de potencial elèctric que hi ha entre dos punts d'un fil conductor que transporta un corrent constant d'1 ampere, quan la potència dissipada entre aquests punts és igual a 1 watt.

Ohm (unitat de resistència elèctrica). — L'ohm és la resistència elèctrica que hi ha entre dos punts d'un conductor quan una diferència de potencial constant d'1 volt, aplicada entre aquests dos punts, produeix en el conductor un corrent d'1 ampere, sense que hi hagi en el conductor cap força electromotriu.

Coulomb (unitat de quantitat d'electricitat). — El coulomb és la quantitat d'electricitat transportada en 1 segon per un corrent d'1 ampere.

Farad (unitat de capacitat elèctrica). — El farad és la capacitat d'un condensador elèctric entre les plaques del qual apareix una diferència de potencial elèctric d'1 volt, quan està carregat amb una quantitat d'electricitat d'1 coulomb.

Henry (unitat d'inductància elèctrica). — El henry és la inductància elèctrica d'un circuit tancat en el qual es produeix una força electromotriu d'1 volt quan el corrent elèctric que recorre el circuit varia uniformement a raó d'1 ampere per segon.

Weber (unitat de flux magnètic). — El weber és el flux magnètic que, travessant un circuit d'una sola espira, produiria una força electromotriu d'1 volt, si es portés a zero en 1 segon a velocitat uniforme.

La 9a CGPM va aprovar les definicions incloses en aquesta resolució el 1948 (CR, 49), que, a més, va adoptar el nom newton (Resolució 7) per a la unitat MKS de força.

El 1954, la 10a CGPM (Resolució 6; vegeu la pàgina 52) va establir un sistema pràctic d'unitats de mesura per a les relacions internacionals. L'ampere fou una de les unitats bàsiques d'aquest sistema.

* La 26a CGPM va derogar la definició de l'ampere el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

9a CGPM, 1948

■ Punt triple de l'aigua; escala termodinàmica a un sol punt fix; unitat de quantitat de calor (joule) (CR, 55 i 63)

Resolució 3

1. En l'estat actual de la tecnologia, el punt triple de l'aigua és capaç de proporcionar una referència termomètrica de més precisió que el punt de fusió del gel.

En conseqüència, el Comitè Consultiu [de la Termometria i la Calorimetria] estima que el zero de l'escala termodinàmica centesimal s'ha de definir com situat a una temperatura inferior en 0,0100 graus a la del punt triple de l'aigua pura.

La 26a CGPM va redefinir el kelvin el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

2. El Comitè Consultiu [de la Termometria i la Calorimetria] admet el principi d'una escala termodinàmica absoluta que només comporta un sol punt fonamental, constituït actualment pel punt triple de l'aigua pura, la temperatura absoluta del qual serà fixada posteriorment.

La introducció d'aquesta nova escala no afecta en res l'ús de l'escala internacional, que continua essent l'escala pràctica recomanada.

3. La unitat de quantitat de calor és el joule.

Nota: Es demana que els resultats dels experiments calorimètrics s'expressin, tant com sigui possible, en joules. Si els experiments s'han fet per comparació amb un escalfament d'aigua (i que, per un motiu qualsevol, no es pot evitar l'ús de la calor), cal donar tota la informació necessària per a la conversió en joules. Es deixa en mans del Comitè Internacional, després de l'opinió del Comitè Consultiu de la Termometria i la Calorimetria, confeccionar una taula que presenti, en joules per grau, els valors més exactes que es puguin obtenir dels experiments realitzats sobre la calor específica de l'aigua.

D'acord amb aquesta sol·licitud, el 1950 el Comitè Internacional va aprovar i publicar una taula (PV, 22, 92).

■ Adopció del «grau Celsius» [CIPM, 1948 (PV, 21, 88) i 9a CGPM, 1948 (CR, 64)]

Entre els tres termes («grau centígrad», «grau centesimal» i «grau Celsius») proposats per a designar el grau de temperatura, el Comitè Internacional va seleccionar el «grau Celsius» (PV, 21, 88).

Aquest terme va ser legalment adoptat per la 9a Conferència General (CR, 64).

■ Proposta d'establiment d'un sistema pràctic d'unitats de mesura (CR, 64)

Resolució 6

La Conferència General,

considerant

- que el Comitè Internacional de Pesos i Mesures ha rebut una sol·licitud de la Unió Internacional de Física que sol·licita adoptar per a les relacions internacionals un sistema pràctic internacional d'unitats, i recomana el sistema MKS i una unitat elèctrica del sistema pràctic absolut, sense recomanar que el sistema CGS sigui abandonat pels físics;
- que el Comitè Internacional ha rebut del Govern francès un requeriment similar, acompanyat d'un projecte destinat a servir de base de discussió per a l'establiment d'una reglamentació completa de les unitats de mesura,

encarrega al Comitè Internacional:

- dur a terme una enquesta oficial sobre l'opinió de l'àmbit científic, tècnic i pedagògic de tots els països (oferint com a base el document francès) i de promoure-la activament;
- centralitzar les respostes;
- i emetre les recomanacions en relació amb l'establiment d'un sistema pràctic d'unitats de mesura, susceptible de ser adoptat per tots els països signants de la Convenció del Metre.

■ Escritura dels símbols d'unitats i dels nombres (CR, 70)*

Resolució 7

Principis

Els símbols de les unitats s'escriuen en lletra rodona, en general, en minúscules; tanmateix, si els símbols deriven de noms propis, s'utilitzen majúscules. Aquests símbols no van seguits d'un punt.

Pel que fa als nombres, la coma (ús francès) o el punt (ús anglès) només s'utilitzen per a separar la part entera dels nombres de la part decimal. A fi de facilitar la lectura, els nombres es poden separar en grups de tres xifres. Aquests grups no se separen mai per comes ni punts.

* La Conferència General va derogar algunes decisions relatives a les unitats i la terminologia, en particular aquelles relatives al micró, al grau absolut i als noms *grau i deg*, 13a CGPM, 1967/1968 (resolucions 7 i 3, vegeu les pàgines 60 i 58, respectivament), i també el litre, 16a CGPM, 1979 (Resolució 6, vegeu la pàgina 64).

Unitats	Símbols	Unitats	Símbols
• metre	m	ampere	A
• metre quadrat	m ²	volt	V
• metre cúbic	m ³	watt	W
• micra	μ	ohm	Ω
• litre	l	coulomb	C
• gram	g	farad	F
• tona	t	henry	H
segon	s	hertz	Hz
erg	erg	poise	P
dina	dyn	newton	N
grau Celsius	°C	• candela (bugia nova)	cd
• grau absolut	°K	lux	lx
caloria	cal	lumen	lm
bar	bar	stilb	sb
hora	h		

Observacions

1. Els símbols les unitats dels quals van precedits d'un punt són aquells que ja havien estat adoptats per decisió del Comitè Internacional.
2. La unitat de volum esteri, emprada en la mesura de fustes, tindrà com a símbol «st» i no «s» com li havia assignat prèviament el Comitè Internacional.
3. Si no es tracta d'una temperatura, sinó d'un interval o d'una diferència de temperatura, cal escriure la paraula «grau» amb totes les lletres o abreujada «deg».

10a CGPM, 1954

■ Definició de l'escala termodinàmica de temperatura (CR, 79)*

Resolució 3

La Desena Conferència General de Pesos i Mesures ha decidit definir l'escala termodinàmica de temperatura mitjançant el punt triple de l'aigua com a punt fix fonamental, i li ha atribuït la temperatura de 273,16 graus Kelvin, exactament.

■ Definició de l'atmosfera estàndard (CR, 79)

Resolució 4

La Desena Conferència General de Pesos i Mesures, constatant que la definició de l'atmosfera estàndard proporcionada per la Novena Conferència General de Pesos i Mesures en la definició de l'escala internacional de temperatura ha portat alguns físics a pensar que aquesta definició només era vàlida per a les necessitats de la termometria de precisió,

declara que adopta, per a totes les aplicacions, la definició:

1 atmosfera estàndard = 1 013 250 dines per centímetre quadrat,
és a dir: 101 325 newtons per metre quadrat.

■ Sistema pràctic d'unitats de mesura (CR, 80)*

Resolució 6

La Desena Conferència General de Pesos i Mesures, d'acord amb la Resolució 6 de la Novena Conferència General en relació amb l'establiment d'un sistema pràctic d'unitats de mesura per a les relacions internacionals,

decideix adoptar com a unitats bàsiques d'aquest sistema per establir, les unitats següents:

longitud	metre
massa	kilogram
temps	segon
intensitat de corrent elèctric	ampere
temperatura termodinàmica	grau Kelvin
intensitat lluminosa	candela

* La 13a CGPM va definir explícitament el kelvin el 1967/1968 (Resolució 4, vegeu la pàgina 59).

* La 26a CGPM va redefinir el kelvin el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

* La 13a CGPM va canviar el nom de la unitat de temperatura termodinàmica per *kelvin* el 1967 (Resolució 3, vegeu la pàgina 58).

CIPM, 1956

■ Definició de la unitat de temps (segon) (PV, 25, 77)*

Resolució 1

En virtut dels poders que li ha atorgat la Desena Conferència General de Pesos i Mesures en la seva Resolució 5, el Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant

1. que la Novena Assemblea General de la Unió Astronòmica Internacional (Dublín, 1955) ha emès un dictamen favorable en el sentit de vincular el segon a l'any tròpic,
2. que, segons les decisions de la Vuitena Assemblea General de la Unió Astronòmica Internacional (Roma, 1952), el segon de temps d'efemèrides (TE) és la fracció

$$\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9} \text{ de l'any tròpic per a 1900 gener 0 a les 12 h de TE,}$$

* La 13a CGPM en va derogar la definició el 1967 (Resolució 1, vegeu la pàgina 58).

decideix

«El segon és la fracció $1/31\ 556\ 925,9747$ de l'any tròpic per a 1900 gener 0 a les 12 hores de temps d'efemèrides».

■ **El sistema internacional d'unitats** (PV, 25, 83)

Resolució 3

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant

- la missió que li ha encarregat la Novena Conferència General de Pesos i Mesures en la seva Resolució 6 en relació amb l'establiment d'un sistema pràctic d'unitats de mesura susceptible de ser adoptat per tots els països signataris de la Convenció del Metre,
- el conjunt de documents enviats pels vint-i-un països que han respost l'enquesta requerida per la Novena Conferència General de Pesos i Mesures,
- la Resolució 6 de la Desena Conferència General de Pesos i Mesures que fixa les unitats bàsiques del sistema per establir,

recomana

1. que sigui designat com a «sistema internacional d'unitats» el sistema fonamentat en les unitats bàsiques adoptades per la Desena Conferència General, que són:
[Segueix la llista de les sis unitats bàsiques amb el seu símbol, reproduïda a la Resolució 12 de l'11a CGPM (1960)].
2. que es facin servir les unitats d'aquest sistema especificades a la taula següent, sense perjudici d'altres unitats que s'hi puguin afegir en el futur:
[Segueix la taula d'unitats que es troba al paràgraf 4 de la Resolució 12 de l'11a CGPM (1960)].

11a CGPM, 1960

■ **Definició del metre** (CR, 85)*

Resolució 6

L'Onzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que el Prototip internacional no defineix el metre amb una precisió suficient per a les necessitats actuals de la metrologia,
- que és d'altra banda desitjable adoptar un patró natural i indestructible,

decideix

1. El metre és la longitud equivalent a $1\ 650\ 763,73$ longituds d'ona en el buit de la radiació corresponent a la transició entre els nivells $2p_{10}$ i $5d_5$ de l'àtom de criptó 86.
2. Queda derogada la definició del metre en vigor des del 1889 basada en el Prototip internacional en platí irídic.
3. El Prototip internacional del metre sancionat per la Primera Conferència General de Pesos i Mesures el 1889 es conservarà a l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures en les mateixes condicions que es van fixar el 1889.

* La 17a CGPM en va derogar la definició el 1983 (Resolució 1, vegeu la pàgina 66).

■ Definició de la unitat de temps (segon) (CR, 86)*

Resolució 9

L'Onzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- el poder atorgat per la Desena Conferència General de Pesos i Mesures al Comitè Internacional de Pesos i Mesures a fi de prendre una decisió en relació amb la definició de la unitat fonamental de temps,
- la decisió presa pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures en la seva sessió de 1956,

ratifica la definició següent:

«El segon és la fracció $1/31\,556\,925,9747$ de l'any tròpic per a 1900 gener 0 a les 12 hores de temps d'efemèrides».

■ Sistema internacional d'unitats (CR, 87)*

Resolució 12

L'Onzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- la Resolució 6 de la Desena Conferència General de Pesos i Mesures per la qual ha adoptat les sis unitats que serviran de base per a establir un sistema pràctic de mesura per a les relacions internacionals:

longitud	metre	m
massa	kilogram	kg
temps	segon	s
intensitat de corrent elèctric	ampere	A
temperatura termodinàmica	grau Kelvin	°K
intensitat lluminosa	candela	cd

- la Resolució 3 adoptada pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures el 1956,
- les recomanacions adoptades pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures el 1958 en relació amb l'abreviació del nom d'aquest sistema i els prefixos per a la formació dels múltiples i submúltiples de les unitats,

decideix

1. el sistema fonamentat en les sis unitats bàsiques anteriors s'anomena «sistema internacional d'unitats»;
2. l'abreviació internacional del nom d'aquest sistema és: SI;
3. els noms dels múltiples i submúltiples de les unitats es formen mitjançant els prefixos següents:

Factor pel qual es multiplica la unitat	Prefix	Símbol	Factor pel qual es multiplica la unitat	Prefix	Símbol
$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$	tera	T	$0,1 = 10^{-1}$	deci	d
$1\,000\,000\,000 = 10^9$	giga	G	$0,01 = 10^{-2}$	centi	c
$1\,000\,000 = 10^6$	mega	M	$0,001 = 10^{-3}$	mil·li	m
$1\,000 = 10^3$	kilo	k	$0,000\,001 = 10^{-6}$	micro	μ
$100 = 10^2$	hecto	h	$0,000\,000\,001 = 10^{-9}$	nano	n
$10 = 10^1$	deca	da	$0,000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$	pico	p

4. s'utilitzen en aquest sistema les unitats següents, sense perjudici de les que es puguin afegir més endavant.

* La 13a CGPM en va derogar la definició el 1967 (Resolució 1, vegeu la pàgina 58).

* La CGPM va derogar posteriorment algunes d'aquestes decisions i va completar la llista dels prefixos SI (vegeu les notes a continuació).

La 13a CGPM va modificar el nom i el símbol de la unitat de temperatura termodinàmica el 1967 (Resolució 3, vegeu la pàgina 58).

Una setena unitat bàsica, el mol, fou adoptada per la 14a CGPM el 1971 (Resolució 3, vegeu la pàgina 62).

La 12a CGPM va adoptar altres prefixos el 1964 (Resolució 8, vegeu la pàgina 57), el 1975 ho va fer la 15a CGPM (Resolució 10, vegeu la pàgina 63) i el 1991 la 19a CGPM (Resolució 4, vegeu la pàgina 70).

Unitats suplementàries

angle	radian	rad
angle sòlid	estereoradian	sr

Unitats derivades

superfície	metre quadrat	m ²	
volum	metre cúbic	m ³	
freqüència	hertz	Hz	1/s
densitat	kilogram per metre cúbic	kg/m ³	
velocitat	metre per segon	m/s	
velocitat angular	radian per segon	rad/s	
acceleració	metre per segon quadrat	m/s ²	
acceleració angular	radian per segon quadrat	rad/s ²	
força	newton	N	kg · m/s ²
pressió (tensió mecànica)	newton per metre quadrat	N/m ²	
viscositat cinemàtica	metre quadrat per segon	m ² /s	
viscositat dinàmica	newton segon per metre quadrat	N · s/m ²	
treball, energia, quantitat de calor	joule	J	N · m
potència	watt	W	J/s
quantitat d'electricitat	coulomb	C	A · s
tensió elèctrica, diferència de potencial, força electromotriu	volt	V	W/A
intensitat de camp elèctric	volt per metre	V/m	
resistència elèctrica	ohm	Ω	V/A
capacitat elèctrica	farad	F	A · s/V
flux d'inducció magnètica	weber	Wb	V · s
inductància	henry	H	V · s/A
inducció magnètica	tesla	T	Wb/m ²
intensitat de camp magnètic	ampere per metre	A/m	
força magnetomotriu	ampere	A	
flux lluminós	lumen	lm	cd · sr
luminància	candela per metre quadrat	cd/m ²	
il·luminació	lux	lx	lm/m ²

La 20a CGPM va derogar el 1995 la classe d'unitats suplementàries en el SI (Resolució 8, vegeu la pàgina 70). Aquestes unitats es consideren actualment com a unitats derivades.

La 13a CGPM va afegir altres unitats a aquesta llista d'unitats derivades que, en principi, no és limitant, el 1967 (Resolució 6, vegeu la pàgina 59).

■ **Decímetre cúbic i litre (CR, 88)**

Resolució 13

L'Onzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que el decímetre cúbic i el litre no són iguals i difereixen en aproximadament 28 milionèsimes,
- que les determinacions de les magnituds físiques que impliquen mesures de volum tenen cada cop una precisió més elevada, i s'agregen així les conseqüències d'una possible confusió entre el decímetre cúbic i el litre,

convida el Comitè Internacional de Pesos i Mesures a sotmetre aquest problema a estudi i a presentar les seves conclusions en la Dotzena Conferència General.

CIPM, 1961

■ Decímetre cúbic i litre (PV, 29, 34)

Recomanació

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures recomana que els resultats de les mesures precises de volum siguin expressats en unitats del sistema internacional i no en litres.

CIPM, 1964

■ Freqüències patró (PV, 32, 26 i CR, 93)

Declaració

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

habilitat per la Resolució 5 de la Dotzena Conferència General de Pesos i Mesures per a designar els patrons atòmics o moleculars de freqüència per al seu ús temporal per a les mesures físiques de temps,

declara que el patró que s'ha d'utilitzar és la transició entre nivells hiperfins $F = 4, M = 0$ i $F = 3, M = 0$ de l'estat fonamental $^2S_{1/2}$ de l'àtom de cesi 133 no pertorbat per camps exteriors i que el valor 9 192 631 770 hertz s'assigna a la freqüència d'aquesta transició.

12a CGPM, 1964

■ Patró atòmic de freqüència (CR, 93)

Resolució 5

La Dotzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que l'Onzena Conferència General de Pesos i Mesures va constatar en la seva Resolució 10 la urgència per als objectius de la metrologia de precisió de definir un patró atòmic o molecular d'interval de temps,
- que, malgrat que els resultats obtinguts amb la utilització dels patrons atòmics de freqüència de cesi, no ha arribat encara el moment idoni perquè la Conferència General adopti una nova definició del segon, unitat bàsica del sistema internacional d'unitats, a causa dels nous i importants progressos que es poden produir al llarg dels estudis en curs,

considerant també que no es pot esperar més per a fonamentar les mesures físiques de temps en patrons atòmics o moleculars de freqüència,

habilita el Comitè Internacional de Pesos i Mesures per a designar els patrons atòmics o moleculars de freqüència que cal utilitzar temporalment,

convida les organitzacions i els laboratoris d'experts en aquest camp a continuar els estudis útils per a una nova definició del segon.

■ Litre (CR, 93)

Resolució 6

La Dotzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant la Resolució 13 adoptada per l'Onzena Conferència General el 1960 i la Recomanació adoptada pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures a la sessió de 1961,

1. **deroga** la definició del litre donada el 1901 per la Tercera Conferència General de Pesos i Mesures,
2. **declara** que la paraula «litre» pot ser utilitzada com un nom especial donat al decímetre cúbic,
3. **recomana** que el nom de litre no sigui utilitzat per a expressar els resultats de les mesures de volum d'alta precisió.

■ Curie (CR, 94)*

Resolució 7

La Dotzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant que fa molt de temps que el curie és utilitzat en molts països com a unitat per a l'activitat dels radionúclids,

reconeixent que en el sistema internacional d'unitats (SI), la unitat d'aquesta activitat és el segon elevat a la potència menys u (s^{-1}),

admet que el curie es continuï considerant, fora del SI, com a unitat d'activitat, amb un valor de $3,7 \times 10^{10} s^{-1}$. El símbol d'aquesta unitat és Ci.

* La 15a CGPM va adoptar el nom «becquerel» (Bq) el 1975 (Resolució 8, vegeu la pàgina 63) per a la unitat SI d'activitat: $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

■ Prefixos SI femto i atto (CR, 94)*

Resolució 8

La Dotzena Conferència General de Pesos i Mesures,

decideix afegir a la llista dels prefixos per a la formació dels noms dels múltiples i dels submúltiples de les unitats, tal com es va adoptar en l'Onzena Conferència General, Resolució 12, paràgraf 3, els dos nous prefixos següents:

Factor pel qual es multiplica la unitat	Prefix	Símbol
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

* La 15a CGPM va afegir nous prefixos el 1975 (Resolució 10, vegeu la pàgina 63).

CIPM, 1967

■ Múltiples i submúltiples decimals de la unitat de massa (PV, 35, 29 i *Metrologia*, 1968, 4, 45)

Recomanació 2

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant que la regla de formació dels noms dels múltiples i submúltiples decimals de les unitats del paràgraf 3 de la Resolució 12 de l'Onzena Conferència General de Pesos i Mesures (1960) pot portar a interpretacions divergents en la seva aplicació a la unitat de massa,

declara que les disposicions de la Resolució 12 de l'Onzena Conferència General s'apliquin en el cas del kilogram de la manera següent: els noms dels múltiples i submúltiples decimals de la unitat de massa es formen per addició dels prefixos al mot «gram».

13a CGPM, 1967/1968

■ Unitat SI de temps (segon) (CR, 103 i *Metrologia*, 1968, 4, 43)

Resolució 1

La Tretzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que la definició del segon adoptada pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures a la seva sessió de 1956 (Resolució 1) ratificada per la Resolució 9 de l'Onzena Conferència General (1960), i després mantinguda per la Resolució 5 de la Dotzena Conferència General (1964), no és suficient per a les necessitats actuals de la metrologia,
- que a la sessió de 1964 el Comitè Internacional de Pesos i Mesures, habilitat per la Resolució 5 de la Dotzena Conferència (1964), ha designat, per respondre a aquestes necessitats, un patró atòmic de freqüència de cesi per ser emprat temporalment,
- que aquesta freqüència patró actualment està suficientment provada i és prou precisa perquè serveixi per a una definició del segon que respongui a les necessitats actuals,
- que ha arribat el moment de substituir la definició actualment en vigor de la unitat de temps del sistema internacional d'unitats per una definició atòmica basada en aquest patró,

decideix

1. La unitat de temps del sistema internacional d'unitats és el segon definit en els termes següents: «El segon és la durada de 9 192 631 770 períodes de la radiació corresponent a la transició entre dos nivells hiperfins de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133».
2. Es deroguen la Resolució 1 adoptada pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures en la seva sessió de 1956 i la Resolució 9 de l'Onzena Conferència General de Pesos i Mesures.

■ Unitat SI de temperatura termodinàmica (kelvin) (CR, 104 i *Metrologia*, 1968, 4, 43)*

Resolució 3

La Tretzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- els noms «grau Kelvin» i «grau», els símbols «°K» i «deg» i les seves regles d'utilització especificades en la Resolució 7 de la Novena Conferència General (1948), en la Resolució 12 de l'Onzena Conferència General (1960) i la decisió presa pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures el 1962 (PV, 30, 27),
- que la unitat de temperatura termodinàmica i la unitat d'interval de temperatura són una mateixa unitat que caldria que es designés per a un nom i un símbol únics,

decideix

1. la unitat de temperatura termodinàmica es designa amb el nom «kelvin» i el seu símbol és «K»;**
2. aquest mateix nom i mateix símbol s'utilitzen per a expressar un interval de temperatura;
3. un interval de temperatura també es pot expressar en graus Celsius;
4. es deroguen les decisions mencionades al primer considerant relatives al nom de la unitat de temperatura termodinàmica, el seu símbol i la designació de la unitat per a expressar un interval o una diferència de temperatura, però queden temporalment admesos els usos que són conseqüència d'aquestes decisions.

En la sessió del 1997, el Comitè Internacional va confirmar que aquesta definició es refereix a un àtom de cesi en repòs a una temperatura de 0 K.

La 26a CGPM va modificar la formulació de la definició del segon el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

* A la sessió del 1980, el Comitè Internacional va aprovar l'informe de la setena sessió del CCU en què demanava que no s'admetés més l'ús dels símbols «°K» i «deg».

** Vegeu la Recomanació 2 (CI-2005) del CIPM relativa a la composició isotòpica de l'aigua en la definició del kelvin (pàgina 76).

■ **Definició de la unitat SI de temperatura termodinàmica (kelvin)** (CR, 104 i *Metrologia*, 1968, 4, 43)*

Resolució 4

La Tretzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant que és útil formular d'una manera més explícita la definició de la unitat de temperatura termodinàmica continguda en la Resolució 3 de la Desena Conferència General de Pesos i Mesures (1954),

decideix expressar aquesta definició de la manera següent:

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

■ **Unitat SI d'intensitat lluminosa (candela)** (CR, 104 i *Metrologia*, 1968, 4, 43-44)*

Resolució 5

La Tretzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- la definició de la unitat d'intensitat lluminosa ratificada per la Novena Conferència General (1948) i continguda en la «Resolució en relació amb el canvi de les unitats fotomètriques» adoptada pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures el 1946 (PV, 20, 119) en virtut dels poders atorgats per la Vuitena Conferència General (1933),
- que aquesta definició fixa satisfactòriament la magnitud de la unitat d'intensitat lluminosa, però es presta a crítiques quant a la redacció,

decideix expressar la definició de la candela de la manera següent:

«La candela és la intensitat lluminosa, en direcció perpendicular, d'una superfície d' $1/600\,000$ metres quadrats d'un cos negre a la temperatura de congelació del platí a una pressió de $101\,325$ newtons per metre quadrat».

■ **Unitats SI derivades** (CR, 105 i *Metrologia*, 1968, 4, 44)*

Resolució 6

La Tretzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant la utilitat d'afegir altres unitats derivades a la llista del paràgraf 4 de la Resolució 12 de l'Onzena Conferència General (1960),

decideix afegir-hi:

nombre d'ones	1 per metre	m^{-1}
entropia	joule per kelvin	J/K
capacitat calorífica màssica	joule per kilogram kelvin	J/(kg · K)
conductivitat tèrmica	watt per metre kelvin	W/(m · K)
intensitat radiant	watt per estereoradian	W/sr
activitat (d'una font radioactiva)	1 per segon	s^{-1}

* Vegeu la Recomanació 5 (CI-1989) del CIPM en relació amb l'escala internacional de temperatura de 1990 (pàgina 69).

* La 26a CGPM va redefinir el kelvin el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

* La 16a CGPM en va derogar la definició el 1979 (Resolució 3, vegeu la pàgina 63).

* La unitat d'activitat va rebre un nom i un símbol especials a la 15a CGPM el 1975 (Resolució 8, vegeu la pàgina 63).

■ **Derogació de decisions anteriors (la micra i la bugia nova)** (CR, 105 i *Metrologia*, 1968, 4, 44)

Resolució 7

La Tretzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant que les decisions preses amb posterioritat per la Conferència General en relació amb el sistema internacional d'unitats entren en contradicció amb algunes parts de la Resolució 7 de la Novena Conferència General (1948),

decideix, en conseqüència, retirar de la Resolució 7 de la Novena Conferència:

1. el nom d'unitat «micra» i el símbol « μ » que es va atorgar a aquesta unitat i que ha esdevingut un prefix;
2. el nom d'unitat «bugia nova».

CIPM, 1969

■ **El sistema internacional d'unitats, modalitats d'aplicació de la Resolució 12 de l'11a CGPM (1960)** (PV, 37, 30 i *Metrologia*, 1970, 6, 66)*

Recomanació 1

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant que la Resolució 12 de l'Onzena Conferència General de Pesos i Mesures (1960), pel que fa al sistema internacional d'unitats, ha provocat discussions entorn de certes denominacions,

declara

1. les unitats bàsiques, les unitats suplementàries i les unitats derivades del sistema internacional d'unitats, que formen un conjunt coherent, es designen amb el nom d'«unitats SI»;**
2. els prefixos adoptats per la Conferència General per a la formació dels múltiples i submúltiples decimals de les unitats SI s'anomenen «prefixos SI»;

i recomana

3. utilitzar les unitats SI i els seus múltiples i submúltiples decimals els noms de les quals es formen mitjançant els prefixos SI.

Nota: La denominació «unitats suplementàries», que figura a la Resolució 12 de l'Onzena Conferència General de Pesos i Mesures (i en aquesta Recomanació), es dona a les unitats SI sobre les quals la Conferència General no decideix si es tracta d'unitats bàsiques o derivades.

* La 20a CGPM (Resolució 8, vegeu la pàgina 70) va derogar la classe de les unitats suplementàries en el SI el 1995.

** El CIPM va aprovar el 2001 una proposta del CCU per aclarir la definició d'«unitats SI» i «unitats del SI», vegeu la pàgina 72.

CCDS, 1970 (A CIPM, 1970)

■ Definició del TAI (PV, 38, 110-111 i *Metrologia*, 1971, 7, 43)

Recomanació S2

El temps atòmic internacional és la coordenada de referència temporal establerta per l'Oficina Internacional de l'Hora sobre la base de les indicacions de rellotges atòmics que funcionen en diverses localitzacions d'acord amb la definició del segon, unitat del sistema internacional d'unitats.

El 1980, la definició del TAI va ser completada de la manera següent (declaració del CCDS, *BIPM Com. cons. déf. seconde*, 1980, 9, S15 i *Metrologia*, 1981, 17, 70):

El TAI és una escala de temps-coordenada definida en un sistema de referència geocèntric que té com a unitat d'escala el segon del SI realitzat sobre el geoide en rotació.

La Unió Astronòmica Internacional va precisar aquesta definició en la Resolució A4 del 1991: «El TAI és una escala de temps realitzada la forma ideal de la qual, si no es té en compte un retard constant de 32,184 s, és el temps terrestre (TT), el qual està lligat a la coordenada temps del sistema de referència geocèntric, el temps-coordenada geocèntric (TCG), per una relació constant» (vegeu els Proc. de la 21a Assemblea General de la IAU, *IAU Trans.*, 1991, vol. **XXIB**, Kluwer).

14a CGPM, 1971

■ Pascal i siemens (CR, 78)

La 14a a Conferència General ha adoptat els noms especials de «pascal» (símbol, Pa) per a la unitat SI newton per metre quadrat i «siemens» (símbol, S) per a la unitat SI de conductància elèctrica (ohm a la potència menys u).

■ Temps atòmic internacional; funció del CIPM (CR, 77-78 i *Metrologia*, 1972, 8, 35)

Resolució 1

La Catorzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que el segon, unitat de temps del sistema internacional d'unitats, es defineix des del 1967 d'acord amb una freqüència atòmica natural, i no a partir de les escales de temps aportades pels moviments astronòmics,
- que la necessitat d'una escala de temps atòmic internacional (TAI) és una conseqüència de la definició atòmica del segon,
- que diverses organitzacions internacionals han assegurat i continuen assegurant amb èxit l'establiment d'escales de temps basades en moviments astronòmics, particularment gràcies als serveis permanents de l'Oficina Internacional de l'Hora (BIH),
- que l'Oficina Internacional de l'Hora ha començat a establir una escala de temps atòmic de qualitats reconegudes i que n'ha demostrat la utilitat,
- que els patrons atòmics de freqüència que serveixen per a la realització del segon han estat considerats, i han de continuar sent-ho, pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM) assistit per un comitè consultiu i que l'interval unitari de l'escala de temps atòmic internacional ha de ser el segon realitzat d'acord amb la seva definició atòmica,
- que totes les organitzacions científiques internacionals competents i els laboratoris nacionals actius en aquest àmbit han expressat el desig que el CIPM i la CGPM proporcionin una definició del temps atòmic internacional i contribueixin a l'establiment de l'escala de temps atòmic internacional,
- que la utilitat del temps atòmic internacional requereix una coordinació estreta amb les escales de temps basades en els moviments astronòmics,

demana al Comitè Internacional de Pesos i Mesures

1. proporcionar una definició del temps atòmic internacional;
2. prendre les mesures necessàries, d'acord amb les organitzacions internacionals interessades, perquè s'utilitzin al màxim les competències científiques i els mitjans d'acció existents per a la realització de l'escala del temps atòmic internacional, i perquè se satisfacin les necessitats dels usuaris del temps atòmic internacional.

El CCDS (actualment anomenat CCTF) va proporcionar la definició del TAI el 1970, vegeu la pàgina 61.

■ **Unitat SI de quantitat de substància (mol)** (CR, 78 i *Metrologia*, 1972, 8, 36)*

Resolució 3

La Catorzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant l'opinió de la Unió Internacional de Física Pura i Aplicada, de la Unió Internacional de Química Pura i Aplicada i de l'Organització Internacional de Normalització en relació amb la necessitat de definir una unitat per a la quantitat de substància,

decideix

1. El mol és la quantitat de substància d'un sistema que conté tantes entitats elementals com àtoms hi ha en 0,012 kilograms de carboni 12; el seu símbol és «mol».**
2. Quan s'empra el mol, cal especificar les entitats elementals i poden ser àtoms, molècules, ions, electrons, altres partícules o agrupaments específics d'aquestes partícules.
3. El mol és una unitat bàsica del sistema internacional d'unitats.

* En la sessió de 1980, el CIPM va aprovar l'informe de la 7a sessió del CCU (1980) precisant que, en aquesta definició, s'entén que es fa referència a àtoms de carboni 12 no lligats, en repòs i en el seu estat fonamental.

** La 26a CGPM va redefinir el mol el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

15a CGPM, 1975

■ **Valor recomanat per a la velocitat de la llum** (CR, 103 i *Metrologia*, 1975, 11, 179-180)

Resolució 2

La Quinzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant l'excel·lent conformitat entre els resultats de les mesures de longitud d'ona en les radiacions de làsers estabilitzats en una línia d'absorció molecular en la regió visible o infraroja, amb una incertesa estimada de $\pm 4 \times 10^{-9}$, que correspon a la indeterminació de la realització del metre,

considerant també les mesures concordants de la freqüència de diverses d'aquestes radiacions,

recomana la utilització del valor que en resulta per a la velocitat de propagació de les ones electromagnètiques en el buit $c = 299\,792\,458$ metres per segon.

Cal entendre la incertesa relativa com a tres vegades la incertesa estàndard estimada sobre els resultats considerats.

■ **Temps universal coordinat (UTC)** (CR, 104 i *Metrologia*, 1975, 11, 180)

Resolució 5

La Quinzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant que el sistema anomenat «temps universal coordinat» (UTC) és àmpliament usat, que s'utilitza en la majoria de les emissions de ràdio de senyals horaris, que la seva difusió aporta als usuaris, a la vegada, freqüències patró, el temps atòmic internacional i una aproximació del temps universal (o, si es prefereix, del temps solar mitjà),

constata que aquest temps universal coordinat es troba a la base del temps civil, d'aplicació legal a la majoria dels països,

estima que aquest ús és perfectament recomanable.

■ **Unitats SI per a les radiacions ionitzants (becquerel i gray)** (CR, 105 i *Metrologia*, 1975, 11, 180)*

Resolucions 8 i 9

La Quinzena Conferència General de Pesos i Mesures,

amb motiu de la urgència, expressada per la Comissió Internacional de les Unitats i Mesures de Radiació (ICRU), d'ampliar l'ús del sistema internacional d'unitats a la recerca i a les aplicacions en radiologia,

a causa de la necessitat de facilitar en tot el que sigui possible l'ús de les unitats als no especialistes,

tenint en compte també la gravetat dels riscos d'errors en la terapèutica,

adopta el següent nom especial i la unitat SI per a l'activitat:

el **becquerel**, símbol Bq, igual al segon a la potència menys u (Resolució 8),

adopta el següent nom especial i la unitat SI per a les radiacions ionitzants:

el **gray**, símbol Gy, igual al joule per kilogram (Resolució 9).

Nota: El gray és la unitat SI de dosi absorbida. En el camp de les radiacions ionitzants, el gray es pot utilitzar amb altres magnituds físiques que s'expressen també en joules per kilogram; el Comitè Consultiu de les Unitats és l'encarregat d'estudiar aquesta qüestió en col·laboració amb les organitzacions internacionals competents.

■ **Prefixos SI peta i exa** (CR, 106 i *Metrologia*, 1975, 11, 180-181)*

Resolució 10

La Quinzena Conferència General de Pesos i Mesures,

decideix afegir a la llista dels prefixos SI per a la formació dels noms dels múltiples i submúltiples de les unitats, aprovada en l'Onzena Conferència General, Resolució 12, paràgraf 3, els dos prefixos següents:

Factor pel qual es multiplica la unitat	Prefix	Símbol
10^{15}	peta	P
10^{18}	exa	E

* En la sessió de 1976, el Comitè Internacional va aprovar l'informe de la 5a sessió del CCU (1976), precisant que, d'acord amb el parer de la ICRU, el gray es pot emprar també per a expressar l'energia massica comunicada, la kerma i l'índex de dosi absorbida.

* La 19a CGPM va afegir prefixos nous el 1991 (Resolució 4, vegeu la pàgina 70).

16a CGPM, 1979

■ **Unitat SI d'intensitat lluminosa (candela)** (CR, 100 i *Metrologia*, 1980, 16, 56)

Resolució 3

La Setzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que, malgrat els esforços meritoris d'alguns laboratoris, encara existeixen diferències excessives entre els resultats de la realització de la candela mitjançant el patró primari actual basat en el cos negre,
- que les tècniques radiomètriques es desenvolupen ràpidament i permeten precisions que són ja anàlogues a les de la fotometria i que aquestes tècniques ja s'usen als laboratoris nacionals per a realitzar la candela sense necessitat d'un cos negre,

La 26a CGPM va modificar la redacció de la definició de la candela el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

- que la relació entre les magnituds lluminoses de la fotometria i les magnituds energètiques, a saber, el valor de 683 lúmens per watt per a l'eficàcia lluminosa espectral de la radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} hertz, ha estat adoptada pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures el 1977,
- que aquest valor ha estat reconegut com a suficientment exacte per al sistema de magnituds lluminoses fotòpiques, que comporta tan sols un canvi de l'ordre del 3 % per al sistema de magnituds lluminoses escotòpiques i que, per tant, assegura una continuïtat satisfactòria,
- que ha arribat el moment de donar a la candela una definició susceptible de millorar la facilitat de l'establiment dels patrons fotomètrics i la seva precisió, i que s'apliqui a les magnituds fotòpiques i escotòpiques de la fotometria i a les magnituds per definir en l'àmbit mesòpic,

decideix

1. La candela és la intensitat lluminosa, en una direcció donada, d'una font que emet una radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} hertz i la intensitat radiant de la qual en la direcció esmentada és 1/683 watt per estereoradian.
2. Es deroga la definició de la candela (anomenada a la seva època bugia nova) decidida pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures el 1946 en virtut dels poders atorgats per la 8a Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM) el 1933, ratificada per la 9a CGPM el 1948 després modificada per la 13a CGPM el 1967.

■ **Nom especial per a la unitat SI de dosi equivalent (sievert)** (CR, 100 i *Metrologia*, 1980, 16, 56)*

Resolució 5

La Setzena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- l'esforç fet per a introduir les unitats SI en el camp de les radiacions ionitzants,
- els riscos que poden patir els éssers humans sotmesos a radiacions subestimades, riscos que podrien ser conseqüència de la confusió entre dosi absorbida i dosi equivalent,
- que la proliferació de noms especials representa un perill per al sistema internacional d'unitats i s'ha d'evitar tant com sigui possible, però que aquesta regla es pot transgredir quan calgui salvaguardar la salut humana,

adopta el nom especial de **sievert**, símbol Sv, per a la unitat SI de dosi equivalent en l'àmbit de la radioprotecció. El sievert és igual al joule per kilogram.

■ **Símbols del litre** (CR, 101 i *Metrologia*, 1980, 16, 56-57)

Resolució 6

La Setzena Conferència General de Pesos i Mesures,

reconeixent els principis generals adoptats per a l'escriptura dels símbols de les unitats en la Resolució 7 de la 9a Conferència General de Pesos i Mesures (1948),

considerant que el símbol l per a la unitat litre va ser adoptat pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures el 1879 i confirmat en aquesta mateixa Resolució de 1948,

La retina detecta la visió fotòpica mitjançant els cons, sensibles als nivells alts de luminància ($L >$ del voltant de 10 cd m^{-2}), que corresponen a la visió diürna.

La retina detecta la visió escotòpica mitjançant els bastonets, sensibles a nivells baixos de luminància ($L <$ a l'entorn de $10^{-3} \text{ cd m}^{-2}$), que corresponen a la visió nocturna.

En el cas de luminàncies intermèdies entre la visió fotòpica i la visió escotòpica, els cons i els bastonets funcionen simultàniament; s'està aleshores en el domini de la visió mesòpica.

* El Comitè Internacional va decidir el 1984 acompanyar aquesta Resolució d'una explicació (Recomanació 1, vegeu la pàgina 67).

considerant també que, a fi d'evitar un risc de confusió entre la lletra l i la xifra 1, diversos països han adoptat el símbol L, en lloc de l per a la unitat litre,

considerant que el nom litre, encara que no estigui inclòs en el sistema internacional d'unitats, ha de ser admès per l'ús general amb aquest sistema,

decideix, excepcionalment, adoptar els dos símbols l i L com a símbols que es poden usar per a la unitat litre,

considerant, a més, que en el futur caldria mantenir només un dels dos símbols,

convida el Comitè Internacional de Pesos i Mesures a seguir l'evolució de l'ús dels dos símbols i a donar a la 18a Conferència General de Pesos i Mesures la seva opinió sobre la possibilitat de suprimir-ne un dels dos.

El Comitè Internacional considera prematur actualment, 1990, determinar un únic símbol per al litre.

CIPM, 1980

■ **Unitats SI suplementàries (radian i estereoradian) (PV, 48, 24 i *Metrologia*, 1981, 17, 72)***

* Per decisió de la 20a CGPM, la classe d'unitats suplementàries en el SI va ser derogada el 1995 (Resolució 8, vegeu la pàgina 70).

Recomanació 1

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM),

tenint en compte la Resolució 3 adoptada per l'ISO/TC 12 el 1978 i la Recomanació U 1 (1980) adoptada pel Comitè Consultiu de les Unitats (CCU) en la 7a sessió,

considerant

- que les unitats radian i estereoradian s'utilitzen habitualment en expressions de les unitats per necessitat de clarificació, especialment en fotometria, on l'estereoradian té un paper important per a distingir les unitats corresponents a diferents magnituds,
- que en les equacions utilitzades s'acostuma a expressar l'angle pla com el quocient entre dues longituds i l'angle sòlid, com el quocient entre una àrea i el quadrat de la longitud i que, en conseqüència, aquestes magnituds són tractades com a adimensionals,
- que l'estudi dels formalismes emprats en el camp científic mostra que no n'existeix cap que sigui a la vegada coherent i convenient, i en el qual les magnituds angle pla i angle sòlid siguin considerades com a magnituds bàsiques,

considerant també

- que la interpretació donada pel CIPM el 1969 per a la classe d'unitats suplementàries introduïda per la Resolució 12 de l'11a Conferència General de Pesos i Mesures el 1960 deixa la llibertat de tractar el radian i l'estereoradian com a unitats bàsiques en el sistema internacional,
- que aquesta possibilitat compromet la coherència interna del sistema internacional basat només en set unitats bàsiques,

decideix interpretar la classe d'unitats suplementàries en el sistema internacional com una classe d'unitats derivades adimensionals per a les quals la Conferència General de Pesos i Mesures deixa la llibertat d'usar-les o no en les expressions de les unitats derivades del sistema internacional.

17a CGPM, 1983

■ **Definició del metre** (CR, 97 i *Metrologia*, 1984, 20, 25)**Resolució 1**

La Dissetena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que la definició actual del metre no en permet una realització prou precisa per a totes les necessitats,
- que els progressos realitzats en l'estabilització dels làsers permeten obtenir radiacions més reproduïbles i més fàcils d'utilitzar que la radiació patró emesa per una font de criptó 86,
- que els progressos realitzats en la mesura de les freqüències i les longituds d'ona d'aquestes radiacions han portat a determinacions concordants de la velocitat de la llum l'exactitud de les quals està limitada principalment per la realització del metre en la seva definició actual,
- que els valors de les longituds d'ona determinades a partir de mesures de la freqüència i d'un valor donat de la velocitat de la llum tenen una precisió superior a la que es pot obtenir per comparació amb la longitud d'ona de la radiació del patró del criptó 86,
- que hi ha avantatges, especialment per a l'astronomia i la geodèsia, a mantenir sense canvis el valor de la velocitat de la llum recomanada el 1975 per la 15a Conferència General de Pesos i Mesures, en la Resolució 2 ($c = 299\,792\,458$ m/s),
- que s'han estat considerant noves definicions del metre, de diverses maneres, que tenen totes per efecte donar a la velocitat de la llum un valor exacte, igual al valor recomanat, i que això no introdueix cap discontinuïtat apreciable de la unitat de longitud, tenint en compte una incertesa relativa de $\pm 4 \times 10^{-9}$ de les millors realitzacions del metre en la seva definició actual,
- que aquestes diverses maneres, que fan referència al trajecte que recorre la llum en un interval de temps especificat, o bé a la longitud d'ona d'una radiació de freqüència mesurada o especificada, han estat objecte de consultes i de discussions profundes, que s'ha reconegut la seva equivalència i que s'ha arribat a un consens en favor de la primera forma,
- que el Comitè Consultiu per a la Definició del Metre actualment està en disposició de donar instruccions per a la *mise en pratique* d'una definició tal, instruccions que podran incloure l'ús de la radiació taronja del criptó 86 emprada fins ara com a patró i que es podran completar o revisar més endavant,

decideix

1. El metre és la longitud del trajecte que recorre la llum en el buit en un temps de durada igual a $1/299\,792\,458$ de segon.
2. Es deroga la definició del metre en vigor des del 1960, fonamentada en la transició entre els nivells $2p_{10}$ i $5d_5$ de l'àtom de criptó 86.

■ **Sobre la *mise en pratique* de la definició del metre** (CR, 98 i *Metrologia*, 1984, 20, 25-26)**Resolució 2**

La Dissetena Conferència General de Pesos i Mesures

convida el Comitè Internacional de Pesos i Mesures

- a redactar les instruccions per a la *mise en pratique* de la nova definició del metre,
- a escollir les radiacions que puguin ser recomanades com a patrons de longitud d'ona per a la mesura per interferometria de les longituds i a establir les instruccions per al seu ús,
- a continuar els estudis iniciats per a millorar aquests patrons.

La 26a CGPM va modificar la definició del metre el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

El valor donat de la incertesa correspon a tres vegades la desviació estàndard.

Vegeu la Recomanació 1 (CI-2002) del CIPM relativa a la revisió de la *mise en pratique* de la definició del metre, pàgina 72.

CIPM, 1984■ **Sobre el sievert** (PV, 52, 31 i *Metrologia*, 1985, 21, 90)***Recomanació 1**

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant la confusió que encara existeix en relació amb la Resolució 5, votada per la 16a Conferència General de Pesos i Mesures (1979),

decideix introduir l'explicació següent a l'opuscle «El sistema internacional d'unitats (SI)»:

La magnitud dosi equivalent, H , és el producte entre la dosi absorbida D de radiacions ionitzants i dos factors adimensionals, Q (factor de qualitat) i N (producte de tots els altres factors de multiplicació), prescrits per la Comissió Internacional de Protecció Radiològica:

$$H = Q \cdot N \cdot D.$$

Així, per a una radiació determinada, el valor numèric de H en joules per kilogram pot ser diferent del valor numèric de D en joules per kilogram, perquè aquest és en funció del valor de Q i de N . Per a evitar riscos de confusió entre la dosi absorbida D i la dosi equivalent H , cal emprar els noms especials per a les unitats corresponents, és a dir, cal utilitzar el nom gray en lloc de joule per kilogram per a la unitat de dosi absorbida D i el nom sievert en lloc de joule per kilogram per a la unitat de dosi equivalent H .

* El CIPM va decidir el 2002 modificar l'explicació sobre la magnitud «dosi equivalent» a l'opuscle sobre el SI (Recomanació 2 (CI-2002), vegeu la pàgina 74).

18a CGPM, 1987■ **Modificació prevista de les representacions del volt i de l'ohm** (CR, 100 i *Metrologia*, 1988, 25, 115)**Resolució 6**

La Divuitena Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que la uniformitat mundial i la continuïtat a llarg termini de les representacions nacionals de les unitats elèctriques són d'una importància cabdal per a la ciència, el comerç i la indústria, tant des del punt de vista tècnic com econòmic,
- que nombrosos laboratoris nacionals utilitzen l'efecte Josephson i comencen a utilitzar l'efecte Hall quàntic per a conservar les representacions del volt i de l'ohm, respectivament, ja que proporcionen les millors garanties d'estabilitat a llarg termini,
- que, a causa de la importància de la coherència entre les unitats de mesura de diverses magnituds físiques, els valors atribuïts a aquestes representacions han d'estar d'acord amb el SI tant com sigui possible,
- que el conjunt de resultats dels experiments en curs o acabats recentment permetrà establir un valor acceptable, suficientment compatible amb el SI, per al coeficient que relaciona cadascun d'aquests efectes a la unitat elèctrica corresponent,

convida els laboratoris els treballs dels quals poden contribuir a establir el valor del quocient entre la tensió i la freqüència en l'efecte Josephson, i entre la tensió i el corrent en l'efecte Hall quàntic, a prosseguir activament aquests treballs i a comunicar sense demora els seus resultats al Comitè Internacional de Pesos i Mesures, i

encarrega al Comitè Internacional de Pesos i Mesures recomanar, quan ho consideri oportú, un valor per a cadascun d'aquests quocients i una data a partir de la qual aquests valors es podran aplicar simultàniament a tots els països. Aquests valors haurien de ser anunciats com a mínim un any abans i podrien ser adoptats l'1 de gener de 1990.

CIPM, 1988

■ **Representació del volt mitjançant l'efecte Josephson** (PV, 56, 19, 44 i *Metrologia*, 1989, 26, 69)*

* El 2018, a la 26a reunió, la CGPM va derogar l'adopció d'un valor convencional de K_J (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

Recomanació 1

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures

actuant d'acord amb les instruccions donades en la Resolució 6 de la 18a Conferència General de Pesos i Mesures en relació amb la modificació prevista de les representacions del volt i de l'ohm,

considerant

- que un estudi exhaustiu dels resultats de les determinacions més recents ha portat a un valor de 483 597,9 GHz/V per a la constant de Josephson, K_J , és a dir, per al quocient entre la freqüència i la tensió corresponent al nivell $n = 1$ en l'efecte Josephson,
- que l'efecte Josephson, juntament amb aquest valor de K_J , es pot fer servir per a establir un patró de referència de la força electromotriu amb una incertesa (desviació estàndard) en relació amb el volt de 4×10^{-7} en valor relatiu i una reproductibilitat clarament millor,

recomana

- que s'adopti, per conveni, per a la constant de Josephson, K_J , el valor $K_{J-90} = 483\,597,9$ GHz/V exactament,
- que aquest valor nou sigui utilitzat a partir de l'1 de gener de 1990 i no abans, per a substituir els valors usats actualment,
- que aquest valor nou sigui utilitzat a partir d'aquesta mateixa data per tots els laboratoris que basen les seves mesures de la força electromotriu sobre l'efecte Josephson,
- que a partir d'aquesta mateixa data tots els altres laboratoris ajustin el valor dels seus patrons de referència per posar-los d'acord amb aquest nou valor,

estima que previsiblement no caldrà cap altre canvi d'aquest valor recomanat de la constant de Josephson en el futur,

fa notar als laboratoris el fet que el nou valor és superior en 3,9 GHz/V, aproximadament 8×10^{-6} en valor relatiu, al valor donat el 1972 pel Comitè Consultiu de l'Electricitat en la seva Declaració E-72.

■ **Representació de l'ohm mitjançant l'efecte Hall quàntic** (PV, 56, 20, 45 i *Metrologia*, 1989, 26, 70)*

Recomanació 2

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

actuant d'acord amb les instruccions donades en la Resolució 6 de la 18a Conferència General de Pesos i Mesures en relació amb la modificació prevista de les representacions del volt i de l'ohm,

considerant

- que la majoria dels patrons actuals de referència de la resistència elèctrica presenten al llarg del temps variacions significatives,
- que un patró de referència de la resistència elèctrica basat en l'efecte Hall quàntic seria estable i reproducible,
- que un estudi exhaustiu dels resultats de les determinacions més recents porta a un valor de $25\,812,807\ \Omega$ per a la constant de Von Klitzing, R_K , és a dir, per al quocient entre la tensió de Hall i el corrent corresponent al nivell $i = 1$ en l'efecte Hall quàntic,
- que l'efecte Hall quàntic, amb aquest valor de R_K , es pot fer servir per a establir un patró de referència de la resistència amb una incertesa (desviació estàndard), en relació amb l'ohm, de 2×10^{-7} en valor relatiu i amb una reproductibilitat clarament millor,

recomana

- que s'adopti, per conveni, per a la constant de Von Klitzing, R_K , el valor $R_{K-90} = 25\,812,807\ \Omega$ exactament,
- que es faci servir aquest valor a partir de l'1 de gener de 1990, i no abans, per a tots els laboratoris que basen les seves mesures de la resistència elèctrica en l'efecte Hall quàntic,
- que a partir d'aquesta mateixa data tots els altres laboratoris ajustin el valor dels seus patrons de referència per posar-lo d'acord amb R_{K-90} ,
- que, per establir un patró de referència de la resistència elèctrica basat en l'efecte Hall quàntic, els laboratoris segueixin els consells per a l'aplicació de la resistència de Hall quantificada elaborats pel Comitè Consultiu de l'Electricitat i publicats per l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures en la seva edició més recent,

i estima que previsiblement no caldrà cap altre canvi d'aquest valor recomanat de la constant de Von Klitzing en el futur.

L'any 2000 el CIPM, a la 89a reunió, va aprovar la declaració de la 22a sessió del CCEM relativa al valor de la constant de Von Klitzing.

* La 26a CGPM va derogar el 2018 l'adopció d'un valor convencional de R_K (Resolució 1, vegeu la pàgina 92).

CIPM, 1989

■ **L'escala internacional de temperatura de 1990** (PV, 57, 26, 115 i *Metrologia*, 1990, 27, 13)

Recomanació 5

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM), d'acord amb la invitació formulada per la 18a Conferència General de Pesos i Mesures del 1987 (Resolució 7), ha adoptat l'escala internacional de temperatura de 1990 (EIT-90) en substitució de l'escala internacional pràctica de temperatura de 1968 (EIP-68).

El CIPM **destaca** que, en comparació amb l'EIP-68, l'EIT-90

- comprèn temperatures més baixes, fins a 0,65 K, i així substitueix també l'escala provisional de temperatura de 1976 (EPT-76),
- està en millor acord amb les temperatures termodinàmiques corresponents,
- té una millor continuïtat, precisió i reproductibilitat en tota la seva extensió,
- conté subcamps i proporciona, en uns certs rangs, definicions equivalents que en faciliten enormement l'ús.

La 26a CGPM va redefinir el kelvin el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 93).

El CIPM **fa notar**, a més, que el text de l'EIT-90 anirà acompanyat de dos documents, *Supplementary information for the ITS-90* i *Techniques for approximating the ITS-90*, que seran publicats per l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures i actualitzats periòdicament.

El CIPM **recomana**

- que l'EIT-90 s'apliqui l'1 de gener de 1990,
- i que, en la mateixa data, es deroguin l'EIPT-68 i l'EPT-76.

19a CGPM, 1991

■ Prefixos SI zetta, zepto, yotta i yocto (CR, 97 i *Metrologia*, 1992, 29, 3)

Resolució 4

La 19a Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM),

decideix afegir a la llista de prefixos SI per a la formació dels noms dels múltiples i submúltiples de les unitats, adoptada per l'11a CGPM, Resolució 12, paràgraf 3, la 12a CGPM, Resolució 8 i la 15a CGPM, Resolució 10, els prefixos següents:

Factor pel qual es multiplica la unitat	Prefix	Símbol
10^{21}	zetta	Z
10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y
10^{-24}	yocto	y

Els noms zepto i zetta deriven de la xifra set (sèptima potència de 10^3) i la lletra «z» substitueix la lletra «s» per a evitar duplicitats en l'ús de la lletra «s» com a símbol. Els noms yocto i yotta deriven d'octo, que recorda la xifra vuit (vuitena potència de 10^3); la lletra «y» s'afegeix per a evitar l'ús de la lletra «o» com a símbol atesa la possible confusió amb la xifra zero.

20a CGPM, 1995

■ Supressió de la classe de les unitats suplementàries del SI (CR, 121 i *Metrologia*, 1996, 33, 83)

Resolució 8

La 20a Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que l'11a Conferència General, el 1960, en la Resolució 12 que establia el sistema internacional d'unitats, SI, va distingir tres classes d'unitats: les unitats bàsiques, les derivades i les suplementàries, incloent-hi en aquesta darrera el radian i l'estereoradian,
- que s'han produït discussions sobre la situació de les unitats suplementàries en relació amb les unitats bàsiques i les derivades,
- que el Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM), el 1980, constatant que la situació ambigua de les unitats suplementàries compromet la coherència interna del SI, va interpretar en la seva Recomanació 1 (CI-1980) les unitats suplementàries, en el SI, com a unitats derivades adimensionals,

aprovant la interpretació donada pel CIPM el 1980,

decideix

- interpretar les unitats suplementàries del SI, és a dir, el radian i l'estereoradian, com a unitats derivades adimensionals, els noms i símbols de les quals es poden utilitzar, segons les necessitats, encara que no forçosament, en les expressions d'altres unitats derivades del SI,
- i, per tant, suprimir la classe de les unitats suplementàries en tant que classe separada en el SI.

21a CGPM, 1999**■ La definició del kilogram (CR, 141-142 i *Metrologia*, 2000, 37, 94)****Resolució 7**

La 21a Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- la necessitat d'assegurar l'estabilitat a llarg termini del sistema internacional d'unitats (SI),
- la incertesa intrínseca relativa a l'estabilitat a llarg termini del prototip que serveix per a definir la unitat de massa, una de les unitats bàsiques del SI,
- que aquesta incertesa repercuteix en l'estabilitat a llarg termini de les tres altres unitats bàsiques del SI, és a dir, l'ampere, el mol i la candela, la definició de les quals depèn de la del kilogram,
- els progressos obtinguts en diferents experiments destinats a relacionar la unitat de massa amb les constants fonamentals o atòmiques,
- que és desitjable disposar de diversos mètodes per a aquesta relació,

recomana que els laboratoris nacionals continuïn amb els seus esforços per a refinar els experiments que relacionen la unitat de massa amb les constants fonamentals o atòmiques i que poden servir de base, en el futur, per a una nova definició del kilogram.

■ Nom especial atorgat a la unitat SI mol per segon, el katal, per a expressar l'activitat catalítica (CR, 145 i *Metrologia*, 2000, 37, 95)**Resolució 12**

La 21a Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- la importància per a la salut humana i la seva seguretat que té el fet de facilitar un ús de les unitats del sistema internacional d'unitats (SI) en els àmbits de la medicina i la bioquímica,
- que una unitat fora del SI anomenada «unitat» i representada pel símbol U, igual a $1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$, i que no és coherent amb el SI, és àmpliament utilitzada en medicina i en bioquímica des del 1964 per a expressar l'activitat catalítica,
- que l'absència d'un nom especial per a designar la unitat derivada coherent del SI que és el mol per segon ha portat al fet que es lliurin resultats de mesures clíniques en diferents unitats locals,
- que l'ús de les unitats SI en medicina i en química clínica és fortament recomanat per les organitzacions internacionals d'aquests àmbits,
- que la Federació Internacional de Química Clínica i Medicina de Laboratori ha demanat al Comitè Consultiu de les Unitats recomanar el nom especial katal, símbol kat, per a la unitat SI mol per segon,
- que, encara que la proliferació de noms especials representa un perill per al SI, hi ha excepcions per a determinades àrees lligades a la salut humana i a la seguretat (15a Conferència General, 1975, resolucions 8 i 9; 16a Conferència General, 1979, Resolució 5),

remarcant que el nom katal, símbol kat, s'utilitza per a la unitat SI mol per segon des de fa més de trenta anys, per a expressar l'activitat catalítica,

decideix adoptar el nom especial katal, símbol kat, per a la unitat SI mol per segon per a expressar l'activitat catalítica, especialment en els camps de la medicina i la bioquímica,

i recomana que, quan s'utilitzi el katal, s'especifiqui el mesurand i es faci referència al mètode de mesura; el procediment de mesura ha de fer esment del producte indicador de la reacció mesurada.

CIPM, 2001

■ «unitats SI» i «unitats del SI» (PV, 69, 38-39, 120)

El Comitè Internacional va aprovar el 2001 la proposta següent del CCU pel que fa a «unitats SI» i «unitats del SI»:

«Suggerim que els termes “unitats SI” i “unitats del SI” facin referència a les unitats bàsiques i a les unitats derivades coherents, i també, a totes les unitats obtingudes per la seva combinació amb els prefixos recomanats dels múltiples i els submúltiples.

Suggerim que el terme “unitat coherent del SI” es faci servir quan vulguem restringir-ne el sentit a les unitats bàsiques i a les unitats derivades coherents».

CIPM, 2002

■ Revisió de la *mise en pratique* de la definició del metre (PV, 70, 90-101, 194-204 i *Metrologia*, 40, 103-133)

Recomanació 1

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

recordant

- que, el 1983, la 17a Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM) va adoptar una nova definició del metre,
- que, en la mateixa data, la Conferència General va convidar el Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM)
 - a redactar les instruccions per a la realització pràctica de la nova definició del metre (la *mise en pratique*),
 - a escollir les radiacions que poguessin ser recomanades com a patrons de longitud d'ona per a la mesura per interferometria de les longituds i a redactar-ne les instruccions d'ús,
 - a prosseguir els estudis iniciats per a millorar aquests patrons i a completar o revisar consegüentment les instruccions,
- que, com a resposta a aquesta invitació, el CIPM va adoptar la Recomanació 1 (CI-1983) (*mise en pratique* de la definició del metre) que estableix
 - que el metre ha de ser realitzat per un dels mètodes següents:
 - a) mitjançant la longitud l del trajecte que recorre en el buit una ona electromagnètica plana durant l'interval t ; aquesta longitud s'obté a partir de la mesura de l'interval t , utilitzant la relació $l = c_0 \cdot t$ i el valor de la velocitat de la llum en el buit $c_0 = 299\,792\,458$ m/s,
 - b) mitjançant la longitud d'ona en el buit λ d'una ona electromagnètica plana de freqüència f ; aquesta longitud d'ona s'obté a partir de la mesura de la freqüència f utilitzant la relació $\lambda = c_0/f$ i el valor de la velocitat de la llum en el buit $c_0 = 299\,792\,458$ m/s,
 - c) mitjançant una de les radiacions de la llista següent, radiacions per a les quals es pot utilitzar el valor donat de la longitud d'ona en el buit o de la freqüència, amb la incertesa indicada, sempre que es respectin les condicions especificades i el procediment adequat;

- que, en tots els casos, s'apliquin les correccions necessàries per a tenir en compte les condicions reals com ara la difracció, la gravitació o la imperfecció del buit;
- que, en el context de la relativitat general, el metre es consideri una unitat de longitud pròpia. Així, la seva definició només s'aplica en un àmbit espacial prou petit en què els efectes de la no uniformitat del camp gravitatori poden ser ignorats (cal destacar que, a la superfície de la Terra, aquest efecte és del voltant d' 1×10^{-16} per metre d'altitud en valor relatiu). En aquest cas, els únics efectes que s'han de tenir en compte són els de la relativitat especial. Els mètodes locals esmentats en els apartats *b* i *c* per a realitzar el metre proporcionen el metre propi, però no necessàriament el mètode indicat a l'apartat *a*. Així doncs, el mètode indicat a l'apartat *a* s'hauria d'aplicar a les longituds / suficientment curtes perquè els efectes previstos per la relativitat general siguin negligibles en relació amb les incerteses de mesura. Quan no és el cas, cal referir-se a l'informe del grup de treball del Comitè Consultiu del Temps i les Freqüències (CCTF) sobre l'aplicació de la relativitat general a la metrologia per a la interpretació de les mesures («Application of general relativity to metrology», *Metrologia*, 1997, **34**, 261-290),
- que el CIPM va recomanar una llista de radiacions amb aquesta finalitat;

recordant també que el 1992 i el 1997 el CIPM va revisar la *mise en pratique* de la definició del metre;

considerant

- que la ciència i la tècnica continuen exigint una exactitud més gran en la realització del metre;
- que, des del 1997, els treballs efectuats als laboratoris nacionals, al BIPM i a altres laboratoris han permès identificar noves radiacions i mètodes per a la seva realització que porten a incerteses més petites;
- que cada cop més es tendeix a usar freqüències òptiques per a les activitats relacionades amb el temps i que es va ampliant l'àmbit d'aplicació de les radiacions recomanades en la *mise en pratique*, no només per a la metrologia dimensional i la realització del metre, sinó també per a l'espectroscòpia d'alta resolució, la física atòmica i molecular, les constants fonamentals i les telecomunicacions;
- que actualment es disposa d'una quantitat de valors de freqüències nous, amb incerteses reduïdes, per a patrons de radiació d'àtoms i ions refredats d'alta estabilitat, ja esmentats a la llista de les radiacions recomanades; que el valor de la freqüència de la radiació de diversos tipus d'àtoms i ions refredats ha estat també mesurat recentment, i que s'han determinat nous valors millorats, que presenten unes incerteses reduïdes d'una manera significativa, d'un cert nombre de patrons òptics de freqüència basats en cèl·lules de gas, incloent-hi el camp de les longituds d'ona de les telecomunicacions òptiques;
- que els nous mètodes amb làsers de pintes de freqüències de femtosegons tenen un interès manifest per a relacionar la freqüència dels patrons òptics de freqüència altament estables amb la de les freqüències patró emprades per a la realització del segon del sistema internacional d'unitats (SI), que aquests mètodes de mesura són un mitjà còmode per a assegurar la traçabilitat al SI i poden aportar també tant fonts de freqüències com mètodes de mesura;

reconeix que els mètodes de pintes de freqüències arriben en un moment oportú i són adients, i recomana continuar fent recerca per estudiar-ne les possibilitats;

rep favorablement els assaigs de validació en curs dels mètodes de pintes de freqüències efectuats en comparació amb els altres mètodes de cadenes de freqüències;

encoratja els laboratoris nacionals de metrologia i els altres laboratoris a prosseguir els estudis dels mètodes de pintes de freqüències amb l'exactitud més gran possible i a cercar la simplicitat per a impulsar-ne la *mise en pratique*;

recomana

- que la llista de radiacions recomanades aportada pel CIPM el 1997 (Recomanació 1 (CI-1997)) sigui substituïda per la llista de radiacions següent,* la qual inclou:
 - els valors actualitzats de la freqüència dels àtoms de calci i d'hidrogen refredats i de l'ió confinat d'estronci,
 - el valor de la freqüència de nous tipus d'ions refredats, incloent-hi l'ió confinat de Hg⁺ (mercuri), l'ió confinat de In⁺ (indi) i l'ió confinat de Yb⁺ (iterbi),
 - els valors actualitzats de la freqüència de làsers estabilitzats amb rubidi, de làsers de granat d'itri-alumini dopat amb neodimi (Nd:YAG) i de làsers d'heli i neó (He-Ne) estabilitzats amb iode, de làsers d'heli i neó estabilitzats amb metà i làsers de diòxid de carboni estabilitzats amb tetraòxid d'osmi a 10 µm,
 - els valors de la freqüència de patrons per a les comunicacions òptiques, incloent-hi els làsers estabilitzats amb rubidi i acetilè.

...

■ Dosi equivalent (PV, 70, 102, 205)

Recomanació 2

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant que

- la definició actual de la unitat SI de dosi equivalent (sievert) inclou un factor «*N*» (producte de tots els factors de multiplicació) prescrit per la Comissió Internacional de Protecció Radiològica (ICRP),
- la ICRP i la Comissió Internacional de les Unitats i Mesures de Radiació (ICRU) han decidit suprimir aquest factor *N* que ja no es considera necessari,
- la definició actual de dosi equivalent *H* en el sistema internacional d'unitats, que inclou el factor *N*, porta a confusió,

decideix modificar l'explicació donada a l'opuscle «El sistema internacional d'unitats (SI)» de la manera següent:

La magnitud dosi equivalent *H* és el producte de la dosi absorbida *D* de radiacions ionitzants i del factor adimensional *Q* (factor de qualitat) prescrit per la ICRU, factor definit en funció de la transferència d'energia lineal:

$$H = Q \cdot D.$$

Així, per una radiació determinada, el valor numèric de *H* en joules per kilogram pot ser diferent del valor numèric de *D* en joules per kilogram, perquè depèn del valor de *Q*.

El CIPM **decideix**, doncs, mantenir la darrera frase de l'explicació de la manera següent:

Per tal d'evitar qualsevol risc de confusió entre la dosi absorbida *D* i la dosi equivalent *H*, cal usar els noms especials per a les unitats corresponents; és a dir, cal utilitzar el nom gray en lloc de joule per kilogram per a la unitat de dosi absorbida *D* i el nom sievert en lloc de joule per kilogram per a la unitat de dosi equivalent *H*.

* La llista de les radiacions recomanades, Recomendació 1 (CI-2002), figura a PV, 70, 93-101, 197-204 i a *Metrologia*, 2003, 40, 104-115.

Vegeu també *J. Radiol. Prot.*, 2005, 25, 97-100.

CIPM, 2003**■ Revisió de la llista de les radiacions recomanades per a la *mise en pratique* de la definició del metre (PV, 71, 70, 146 i *Metrologia*, 2004, 41, 99-100)****Recomanació 1**

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant que

- es disposa des de fa poc temps de millors valors de les freqüències de les radiacions de determinats patrons d'ions refredats altament estables, ja publicats a la llista de radiacions recomanades;
- s'han determinat valors millorats de les freqüències dels patrons òptics de freqüència en l'infraroig, basats en cèl·lules de gas, en l'àmbit de les telecomunicacions òptiques, valors que ja han estat publicats a la llista de les radiacions recomanades;
- s'han efectuat recentment, i per primera vegada, mesures de la freqüència amb l'ajuda de pintes de freqüències làser de femtosegons de certs patrons fonamentats en cèl·lules de iode, que figuren a la llista complementària de les radiacions recomanades, mesures que comporten una reducció considerable de la incertesa;

proposa que la llista de les radiacions recomanades sigui revisada per tal d'incloure:

- els valors actualitzats de les freqüències de la transició quadripolar de l'ió confinat de $^{88}\text{Sr}^+$ i de la transició octopolar de l'ió confinat de $^{171}\text{Yb}^+$;
- el valor actualitzat de la freqüència del patró estabilitzat amb acetilè a 1,54 μm ;
- els valors actualitzats de la freqüència de patrons estabilitzats amb iode a 543 nm i a 515 nm.

22a CGPM, 2003**■ Símbol del separador decimal (CR, 169 i *Metrologia*, 2004, 41, 104)****Resolució 10**

La 22a Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant que

- un dels objectius principals del sistema internacional d'unitats (SI) és permetre l'expressió del valor de les magnituds d'una manera fàcilment comprensible a tot el món,
- el valor d'una magnitud s'expressa habitualment per un nombre que multiplica una unitat,
- sovint el nombre utilitzat per a expressar el valor d'una magnitud està format per diverses xifres, amb una part entera i una part decimal,
- la 9a Conferència General, en la Resolució 7 (1948), havia decidit que «En els nombres, la coma (ús francès) o el punt (ús anglès) només s'utilitzen per a separar la part entera dels nombres de la part decimal»,
- d'acord amb la decisió del Comitè Internacional de Pesos i Mesures, en la seva 86a sessió (1997), l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures utilitza actualment el punt (sobre la línia) com a separador decimal en totes les versions en anglès de les seves publicacions, incloent-hi el text anglès de l'opuscle sobre el SI (la referència internacional sobre el SI), mentre continua utilitzant la coma (sobre la línia) com a separador decimal en totes les publicacions en francès,
- tanmateix, algunes organitzacions internacionals utilitzen la coma sobre la línia com a separador decimal en els seus documents en anglès,
- a més, algunes organitzacions internacionals, incloent-hi algunes organitzacions internacionals de normalització, especifiquen que el separador decimal ha de ser la coma sobre la línia en totes les llengües,

- la recomanació d'utilitzar la coma sobre la línia com a separador decimal entra en conflicte, en nombroses llengües, amb l'ús corrent que consisteix a usar el punt sobre la línia,
- el fet d'utilitzar el punt sobre la línia o la coma com a separador decimal no sempre està lligat a la llengua, ja que en certs països amb la mateixa llengua tenen usos diferents segons el país, mentre que altres països que són plurilingües utilitzen el punt o la coma segons la llengua,

declara que el símbol del separador decimal pot ser el punt sobre la línia o la coma sobre la línia,

reafirma que «Per a facilitar la lectura, els nombres es poden separar en grups de tres xifres; aquests grups no se separen mai per punts ni comes», com recomana la Resolució 7 de la 9a Conferència General de 1948.

CIPM, 2005

■ **Aclariment de la definició del kelvin, unitat de temperatura termodinàmica** (PV, 73, 119, 235 i *Metrologia*, 2006, 43, 177-178)*

* La 26a CGPM va redefinir el kelvin el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 93).

Recomanació 2

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant

- que el kelvin, la unitat de la temperatura termodinàmica, es defineix com la fracció $1/273,16$ de la temperatura termodinàmica del punt triple de l'aigua,
- que la temperatura termodinàmica del punt triple de l'aigua depèn de la proporció relativa dels isòtops d'hidrogen i d'oxigen presents en la mostra d'aigua utilitzada,
- que aquest efecte és actualment una de les fonts més importants de variabilitat observada en les diferents realitzacions del punt triple de l'aigua,

decideix

- que la definició del kelvin es refereix a una aigua de composició isotòpica específica,
- que aquesta composició isotòpica és la següent:

0,000 155 76 mols de ^2H per mol de ^1H ,

0,000 379 9 mols de ^{17}O per mol de ^{16}O i

0,002 005 2 mols de ^{18}O per mol de ^{16}O ,

composició que és la del material de referència de l'Agència Internacional de l'Energia Atòmica (AIEA) «aigua oceànica mitjana normalitzada de Viena (VSMOW)», recomanada per la Unió Internacional de Química Pura i Aplicada a «Atomic weights of the elements: Review 2000»,

- que aquesta composició es defineixi en una nota adjunta a la definició del kelvin a l'opuscle sobre el SI de la manera següent:

«Aquesta definició es refereix a l'aigua d'una composició isotòpica definida per les relacions de quantitat de substància següents: 0,000 155 76 mols de ^2H per mol de ^1H , 0,000 379 9 mols de ^{17}O per mol de ^{16}O i 0,002 005 2 mols de ^{18}O per mol de ^{16}O ».

■ **Revisió de la llista de les radiacions recomanades per a la *mise en pratique* de la definició del metre** (PV, 73, 120, 236 i *Metrologia*, 2006, 43, 178)

Recomanació 3

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant que

- es disposa de millors valors de les freqüències de les radiacions de determinats patrons d'ions o àtoms refredats altament estables, ja publicats a la llista de radiacions recomanades;
- s'han obtingut millors valors de les freqüències dels patrons òptics de freqüència en l'infraroig, basats en cèl·lules de gas, en l'àmbit de les telecomunicacions òptiques, valors que ja han estat publicats a la llista de les radiacions recomanades;
- s'han obtingut millors valors de les freqüències de certs patrons basats en cèl·lules de iode, valors que ja han estat publicats a la llista complementària de les fonts recomanades;
- s'han efectuat per primera vegada mesures de la freqüència de nous àtoms refredats, d'àtoms en la regió de l'infraroig proper i de molècules en el camp de les telecomunicacions òptiques, amb l'ajuda de pintes de freqüències en làsers de femtosegons;

decideix que la llista de les radiacions recomanades sigui revisada per tal d'incloure:

- els valors actualitzats de les freqüències de les transicions quadripolars de l'ió confinat de $^{88}\text{Sr}^+$, de l'ió confinat de $^{199}\text{Hg}^+$ i de l'ió confinat de $^{171}\text{Yb}^+$;
- el valor actualitzat de la freqüència de la transició de l'àtom de calci;
- el valor actualitzat de la freqüència del patró estabilitzat amb acetilè a 1,54 μm ;
- el valor actualitzat de la freqüència del patró estabilitzat amb iode a 515 nm;
- la freqüència de la transició de l'àtom de ^{87}Sr a 698 nm;
- les freqüències de les transicions de l'àtom de ^{87}Rb a 760 nm;
- les freqüències de les transicions de la banda ($\nu_1 + \nu_3$) de $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$, i les bandes ($\nu_1 + \nu_3$) i ($\nu_1 + \nu_3 + \nu_4 + \nu_5$) de $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$, a 1,54 μm .

CIPM, 2006

■ **Amb relació a les representacions secundàries del segon** (PV, 74, 123, 249 i *Metrologia*, 2007, 44, 97)

Recomanació 1

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM),

considerant

- que s'establirà una llista comuna de «valors recomanats de freqüències patró per a la *mise en pratique* de la definició del metre i a les representacions secundàries del segon»,
- que el grup de treball conjunt del Comitè Consultiu per a la Longitud (CCL) i el CCTF sobre la *mise en pratique* de la definició del metre i les representacions secundàries del segon, a la seva reunió a l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures (BIPM) el setembre de 2005, va discutir possibles candidats de freqüències de radiacions per incloure-les a la llista de representacions secundàries del segon,
- que el grup de treball conjunt del CCL i el CCTF va examinar i actualitzar els valors de les freqüències de transició de l'ió de mercuri (Hg), de l'ió d'estranci (Sr), de l'ió d'iterbi (Yb) i de l'àtom neutre d'estranci en la sessió de setembre de 2006,
- que el CCTF, en la Recomanació CCTF 1 (2004), ja recomanava la freqüència de la transició quàntica hiperfina sense pertorbar de l'estat fonamental de l'àtom de ^{87}Rb com a representació secundària del segon,

recomana que es facin servir les freqüències de les transicions següents com a representacions secundàries del segon i que s'integrin a la nova llista de «valors recomanats de freqüències patró per a la *mise en pratique* de la definició del metre i les representacions secundàries del segon»:

- la transició quàntica hiperfina sense pertorbar de l'estat fonamental de l'àtom de ^{87}Rb , amb una freqüència de $f^{87}\text{Rb} = 6\,834\,682\,610,904\,324$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 3×10^{-15} ,
- la transició òptica sense pertorbar $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$ de l'ió de $^{88}\text{Sr}^+$, amb una freqüència de $f^{88}\text{Sr}^+ = 444\,779\,044\,095\,484$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 7×10^{-15} ,
- la transició òptica sense pertorbar $5d^{10}\ 6s\ ^2S_{1/2} (F = 0) - 5d^9\ 6s^2\ ^2D_{5/2} (F = 2)$ de l'ió de $^{199}\text{Hg}^+$, amb una freqüència de $f^{199}\text{Hg}^+ = 1\,064\,721\,609\,899\,145$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 3×10^{-15} ,
- la transició òptica sense pertorbar $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2)$ de l'ió de $^{171}\text{Yb}^+$, amb una freqüència de $f^{171}\text{Yb}^+ = 688\,358\,979\,309\,308$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 9×10^{-15} ,
- la transició òptica sense pertorbar $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$ de l'àtom neutre de ^{87}Sr , amb una freqüència de $f^{87}\text{Sr} = 429\,228\,004\,229\,877$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,5 \times 10^{-14}$.

CIPM, 2007

■ **Revisió de la llista de les radiacions recomanades per a la *mise en pratique* de la definició del metre (PV, 75, 85, 185)**

Recomanació 1

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures,

considerant que

- s'han determinat valors millorats de freqüències de molècules en el camp de les telecomunicacions òptiques, que ja havien estat publicats a la llista de freqüències patró mitjançant mesures de freqüència basades en pintes de femtosegons;
- s'han determinat, per primer cop, les freqüències de molècules en el camp de les telecomunicacions òptiques mitjançant mesures de freqüència basades en pintes de femtosegons;
- s'han determinat, per primer cop, les freqüències properes a 532 nm d'alguns patrons òptics de freqüència amb absorció mitjançant cèl·lula de iode, mitjançant mesures de freqüència basades en pintes de femtosegons;

proposa que la llista de freqüències patró es revisi per a incloure:

- els valors actualitzats de les freqüències per a la banda ($\nu_1 + \nu_3$) de $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$, al voltant d'1,54 μm ;
- els valors de les freqüències per a la banda ($2\nu_1$) de $^{12}\text{C}_2\text{HD}$, al voltant d'1,54 μm ;
- els valors de freqüència per als components hiperfins de les transicions P(142) 37-0, R(121) 35-0 i R(85) 33-0 a 532 nm del iode.

23a CGPM, 2007

■ **Sobre la revisió de la *mise en pratique* de la definició del metre i el desenvolupament de nous patrons òptics de freqüència (CR, 171)**

Resolució 9

La 23a Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- el ràpid progrés i les importants millores en els resultats dels patrons òptics de freqüència,
- que avui en dia es fan servir de manera habitual les tècniques de pintes de femtosegons per a relacionar les radiacions òptiques i les de microones en una única ubicació,
- que els laboratoris nacionals de metrologia treballen en tècniques de comparació de patrons òptics de freqüència en distàncies curtes,
- que s'han d'elaborar a escala internacional tècniques de comparació a distància per a poder comparar els patrons òptics de freqüència,

acull favorablement

- les activitats del grup de treball conjunt entre el Comitè Consultiu per a la Longitud i el Comitè Consultiu del Temps i les Freqüències per a examinar les freqüències de les realitzacions òptiques del segon,
- les addicions a la *mise en pratique* de la definició del metre i la llista de radiacions recomanades realitzada pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures els anys 2002, 2003, 2005, 2006 i 2007,
- la iniciativa de l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures (BIPM) per a plantejar la qüestió sobre la manera de comparar patrons òptics de freqüència,

recomana que

- els laboratoris nacionals de metrologia comprometin els recursos necessaris per al desenvolupament de patrons òptics de freqüència i la seva comparació,
- el BIPM treballi en la coordinació d'un projecte internacional amb la participació dels laboratoris nacionals de metrologia, orientat a l'estudi de les tècniques que es podrien fer servir per a comparar els patrons òptics de freqüència.

■ **Aclariment sobre la definició del kelvin, unitat de temperatura termodinàmica** (CR, 172)

La 26a CGPM va redefinir el kelvin el 2018 (Resolució 1, vegeu la pàgina 93).

Resolució 10

La 23a Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que el kelvin, la unitat de temperatura termodinàmica, es defineix com la fracció $1/273,16$ de la temperatura termodinàmica del punt triple de l'aigua,
- que la temperatura del punt triple de l'aigua depèn de la quantitat relativa d'isòtops d'hidrogen i d'oxigen presents en la mostra d'aigua usada,
- que aquest efecte és avui dia una de les principals fonts de variabilitat observada entre les diferents realitzacions del punt triple de l'aigua,

pren nota i acull favorablement la decisió del Comitè Internacional de Pesos i Mesures d'octubre de 2005 sobre la proposta del Comitè Consultiu per a la Termometria, segons la qual:

- la definició del kelvin es refereix a aigua d'una composició isotòpica específica,
- aquesta composició isotòpica de l'aigua és:

0,000 155 76 mols de ^2H per mol de ^1H ,

0,000 379 9 mols de ^{17}O per mol de ^{16}O i

0,002 005 2 mols de ^{18}O per mol de ^{16}O ,

que és la composició del material de referència de l'Agència Internacional de l'Energia Atòmica «aigua oceànica mitjana normalitzada de Viena (VSMOW)», recomanada per la Unió Internacional de Química Pura i Aplicada a «Atomic weights of the elements: Review 2000»,

- aquesta composició s'ha de definir en una nota adjunta a la definició del kelvin a l'opuscle sobre el sistema internacional d'unitats de la manera següent:

«Aquesta definició fa referència a una aigua d'una composició isotòpica definida exactament per les relacions de quantitat de substància següents: 0,000 155 76 mols de ^2H per mol de ^1H , 0,000 379 9 mols de ^{17}O per mol de ^{16}O i 0,002 005 2 mols de ^{18}O per mol de ^{16}O ».

■ **Sobre la possible redefinició d'algunes unitats bàsiques del sistema internacional d'unitats (SI)** (CR, 174)

La 26a CGPM (2018) va aprovar la revisió del SI (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

Resolució 12

La 23a Conferència General de Pesos i Mesures,

considerant

- que durant molts anys els laboratoris nacionals de metrologia i l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures (BIPM) han dut a terme uns esforços considerables per a promoure i millorar el sistema internacional d'unitats (SI), mitjançant l'ampliació dels límits de la metrologia, per tal que les unitats bàsiques del SI es puguin definir mitjançant les constants de la natura —les constants físiques fonamentals—,
- que, de les set unitats bàsiques del SI, només el kilogram es defineix encara mitjançant un objecte material (artefacte), el prototip internacional del kilogram (1a CGPM, 1889 i 3a CGPM, 1901) i que les definicions de l'ampere, del mol i de la candela en depenen,

- la Resolució 7 adoptada per la 21a Conferència General de Pesos i Mesures (1999), que recomanava que «els laboratoris nacionals continuïn amb els seus esforços per a refinar els experiments que relacionen la unitat de massa amb les constants fonamentals o atòmiques i que poden servir de base, en el futur, per a una nova definició del kilogram»,
- els nombrosos avenços realitzats en els últims anys en experiments que relacionen la massa del prototip internacional amb la constant de Planck, h , o amb la constant d'Avogadro, N_A ,
- les iniciatives per a determinar el valor d'algunes constants fonamentals, incloent-hi la constant de Boltzmann k_B ,
- que, com a resultat d'aquests avenços, hi ha implicacions significatives i beneficis potencials per a les redefinicions del kilogram, de l'ampere, del kelvin i del mol,
- la Recomanació 1 (CI-2005) del Comitè Internacional adoptada a la sessió d'octubre de 2005 i diverses recomanacions dels comitès consultius sobre la redefinició d'una o més unitats bàsiques del SI,

tenint en compte

- que els canvis en les definicions d'unitats del SI han de ser coherents,
- que les definicions de les unitats bàsiques del SI han de ser fàcils d'entendre,
- la feina duta a terme pel Comitè Internacional i pels seus comitès consultius,
- la necessitat de controlar els resultats dels experiments,
- la importància de sol·licitar comentaris i contribucions a les comunitats científiques i als usuaris en general,
- la decisió del Comitè Internacional el 2005 d'aprovar, en principi, la preparació de noves definicions per al kilogram, l'ampere, el kelvin i la possibilitat de redefinir el mol,

recomana que els laboratoris nacionals de metrologia i el BIPM

- prossegueixin amb els experiments pertinents perquè el Comitè Internacional pugui considerar si és possible o no redefinir el kilogram, l'ampere, el kelvin i el mol fent servir valors fixats de les constants fonamentals amb motiu de la 24a Conferència General el 2011,
- reflexionin, en col·laboració amb el Comitè Internacional, els comitès consultius i els grups de treball adients, sobre formes pràctiques de realitzar les noves definicions basades en valors fixats de les constants fonamentals, preparin una *mise en pratique* de cadascuna i examinin quin és el mitjà més adient per a explicar les noves definicions als usuaris,
- iniciïn campanyes de sensibilització per a alertar les comunitats d'usuaris sobre la possibilitat de les redefinicions i que les implicacions tècniques i legislatives d'aquestes definicions, així com les seves realitzacions pràctiques, es discuteixin i es considerin amb cura,

i **sol·licita** al Comitè Internacional que presenti un informe sobre aquest assumpte a la 24a Conferència General de 2011 i que dugui a terme els preparatius necessaris perquè, si els resultats dels experiments són satisfactoris i s'acompleixen les necessitats dels usuaris, es puguin proposar oficialment les noves definicions del kilogram, l'ampere, el kelvin i el mol a la 24a Conferència General.

CIPM, 2009

■ Actualització de la llista de freqüències patró (PV, 77, 105, 235)

Recomanació 2

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM),

considerant

- que s'ha establert una llista comuna de «valors recomanats de freqüències patró per a la *mise en pratique* de la definició del metre i a les representacions secundàries del segon»;
- que el grup de treball conjunt del CCL i el CCTF sobre freqüències patró ha examinat diversos candidats per incloure'ls en aquesta llista;

recomana

que s'incloguin o actualitzin a la llista de freqüències patró recomanades les freqüències de transició següents:

- la transició òptica sense pertorbar $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$ de l'àtom neutre de ^{87}Sr , amb una freqüència de $f = 429\ 228\ 004\ 229\ 873,7\ \text{Hz}$ i una incertesa estàndard relativa d' 1×10^{-15} (el CIMP ja va recomanar aquesta radiació com a realització secundària del segon);
- la transició òptica sense pertorbar $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$ de l'àtom neutre de ^{88}Sr , amb una freqüència de $f = 429\ 228\ 066\ 418\ 012\ \text{Hz}$ i una incertesa estàndard relativa d' 1×10^{-14} ;
- la transició òptica sense pertorbar $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$ de l'ió de $^{40}\text{Ca}^+$, amb una freqüència de $f = 411\ 042\ 129\ 776\ 393\ \text{Hz}$ i una incertesa estàndard relativa de 4×10^{-14} ;
- la transició òptica sense pertorbar $^2S_{1/2}(F=0) - ^2F_{7/2}(F=3, m_F=0)$ de l'ió de $^{171}\text{Yb}^+$, amb una freqüència de $f = 642\ 121\ 496\ 772\ 657\ \text{Hz}$ i una incertesa estàndard relativa de 6×10^{-14} ;
- la transició òptica sense pertorbar $6s^2\ ^1S_0 (F=1/2) - 6s\ 6p\ ^3P_0 (F=1/2)$ de l'àtom neutre de ^{171}Yb , amb una freqüència de $f = 518\ 295\ 836\ 590\ 864\ \text{Hz}$ i una incertesa estàndard relativa d' $1,6 \times 10^{-13}$.

24a CGPM, 2011

■ Sobre la possible revisió del sistema internacional d'unitats (SI) (CR, 212)

Resolució 1

La Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM), en la seva 24a reunió,

considerant

- el consens internacional sobre la importància, el valor i els beneficis potencials d'una redefinició de diverses unitats del sistema internacional d'unitats (SI),
- que els laboratoris nacionals de metrologia i l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures (BIPM) han dut a terme un esforç significatiu durant les últimes dècades per fer progressar el sistema internacional d'unitats (SI), fent créixer els límits de la metrologia perquè les unitats bàsiques del SI es puguin definir en termes de constants de la natura —les constants físiques o les propietats fonamentals dels àtoms—,
- que un exemple destacat de l'èxit d'aquests esforços és la definició actual de la unitat de longitud del SI, el metre (17a CGPM, 1983, Resolució 1), que relaciona la unitat amb un valor exacte de la velocitat de la llum en el buit c , 299 792 458 metres per segon,
- que, de les set unitats bàsiques del SI, només el kilogram es defineix encara mitjançant un objecte material (artefacte), el prototip internacional del kilogram (1a CGPM, 1889, i 3a CGPM, 1901) i que les definicions de l'ampere, del mol i de la candela en depenen,

La 26a CGPM (2018) va aprovar la revisió del SI (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

- que, encara que el prototip internacional ha fet servei a la ciència i la tecnologia des que va ser aprovat per la 1a CGPM el 1889, el seu ús presenta limitacions importants; una de les més significatives és que la seva massa no està explícitament relacionada amb una constant de la natura i que, consegüentment, no se'n pot garantir l'estabilitat a llarg termini,
- que la 21a CGPM, el 1999, va adoptar la Resolució 7, en què recomana que «els laboratoris nacionals continuïn amb els seus esforços per a refinar els experiments que relacionen la unitat de massa amb les constants fonamentals o atòmiques i que poden servir de base, en el futur, per a una nova definició del kilogram»,
- que en els últims anys s'han produït molts avenços per relacionar la massa del prototip amb la constant de Planck, h , mitjançant mètodes com ara experiments amb balances de watt o mesures de la massa d'un àtom de silici,
- que les incerteses associades al conjunt d'unitats elèctriques del SI realitzades directament o indirecta mitjançant els efectes Josephson i Hall quàntic i a partir dels valors SI de les constants de Josephson i Von Klitzing, K_J i R_K , es poden reduir d'una manera significativa si el kilogram es definís relacionant-lo amb el valor numèric exacte de h i si l'ampere es redefinís relacionant-lo amb un valor exacte de la càrrega elemental e ,
- que la definició actual del kelvin es basa en una propietat intrínseca de l'aigua que, tot i que és una constant de la natura, depèn a la pràctica de la puresa i de la composició isotòpica de l'aigua utilitzada,
- que és possible redefinir el kelvin relacionant-lo amb un valor numèric exacte de la constant de Boltzmann k ,
- que és igualment possible redefinir el mol relacionant-lo amb un valor numèric exacte de la constant d'Avogadro N_A i, per tant, que ja no depengui de la definició del kilogram, fins i tot quan el kilogram es defineixi relacionant-lo amb un valor numèric exacte de h , cosa que posa en evidència la distinció entre les magnituds quantitat de substància i massa,
- que les incerteses relacionades amb els valors de moltes altres constants fonamentals importants i els factors de conversió d'energia s'eliminarien o reduirien considerablement si h , e , k i N_A tinguessin valors numèrics exactes quan s'expressessin en unitats del SI,
- que la 23a CGPM, el 2007, va adoptar la Resolució 12 en què es descrivia la feina que havien de dur a terme els instituts nacionals de metrologia, el BIPM i el Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM), juntament amb els comitès consultius, per tal de poder adoptar noves definicions del kilogram, l'ampere, el kelvin i el mol basades en constants fonamentals,
- que, tot i que s'ha progressat notablement, no s'han complert tots els objectius fixats a la Resolució 12 adoptada a la 23a CGPM, per la qual cosa el CIPM encara no està preparat per a fer una proposta final,
- que, tot i això, ja es pot donar una versió clara i detallada d'allò que probablement es proposarà,

pren nota de la intenció del Comitè Internacional de Pesos i Mesures de proposar una revisió del SI de la manera següent:

- el sistema internacional d'unitats, el SI, serà el sistema d'unitats segons el qual:
 - la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133 $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ és exactament igual a 9 192 631 770 hertz,
 - la velocitat de la llum en el buit c és exactament igual a 299 792 458 metres per segon,
 - la constant de Planck h és exactament igual a $6,626\ 06X \times 10^{-34}$ joules segon,*
 - la càrrega elemental e és exactament igual a $1,602\ 17X \times 10^{-19}$ coulombs,
 - la constant de Boltzmann k és exactament igual a $1,380\ 6X \times 10^{-23}$ joules per kelvin,
 - la constant d'Avogadro N_A és exactament igual a $6,022\ 14X \times 10^{23}$ per mol,
 - l'eficàcia lluminosa K_{cd} de la radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz és exactament igual a 683 lúmens per watt,

* La X que apareix a l'expressió de les constants indica que la xifra corresponent no es coneixia en el moment de l'adopció de la resolució.

en què

i) les unitats hertz, joule, coulomb, lumen i watt, que tenen els símbols Hz, J, C, lm i W, respectivament, estan relacionades amb les unitats segon, metre, kilogram, ampere, kelvin, mol i candela, que tenen els símbols s, m, kg, A, K, mol i cd, respectivament, d'acord amb les relacions $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{s A}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ i $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$,

ii) el símbol X d'aquest esborrany de resolució correspon a una o diverses xifres addicionals que s'afegiran als valors numèrics de h , e , k i N_A segons els valors resultants de l'ajustament més recent de CODATA,

que significa que el SI es continuarà basant en les set unitats bàsiques actuals, en particular

- el kilogram continuarà sent la unitat de massa, però la seva magnitud s'establirà fixant el valor numèric de la constant de Planck, exactament igual a $6,626\ 06\text{X} \times 10^{-34}$ quan s'expressa en $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$, unitat del SI igual al joule per segon, J s,
- l'ampere continuarà sent la unitat de corrent elèctric, però la seva magnitud s'establirà fixant el valor numèric de la càrrega elemental, exactament igual a $1,602\ 17\text{X} \times 10^{-19}$ quan s'expressa en s A, unitat del SI igual al coulomb, C,
- el kelvin continuarà sent la unitat de temperatura termodinàmica, però la seva magnitud s'establirà fixant el valor numèric de la constant de Boltzmann, exactament igual a $1,380\ 6\text{X} \times 10^{-23}$ quan s'expressa en $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$, unitat del SI igual al joule per kelvin, J K⁻¹,
- el mol continuarà sent la unitat de substància d'una entitat elemental específica, que pot ser un àtom, una molècula, un ió, un electró o qualsevol altra partícula o grup específic d'aquestes entitats, però la seva magnitud s'establirà fixant el valor numèric de la constant d'Avogadro, exactament igual a $6,022\ 14\text{X} \times 10^{23}$ quan s'expressa en la unitat del SI mol⁻¹.

La Conferència General de Pesos i Mesures,

igualmente observa

- que les noves definicions del kilogram, de l'ampere, del kelvin i del mol estan destinades a ser del tipus «constant explícita», és a dir, definicions en què la unitat es defineix indirectament en donar explícitament un valor exacte per a una constant fonamental ben reconeguda,
- que la definició existent del metre està relacionada amb un valor exacte de la velocitat de la llum en el buit, que també és una constant fonamental reconeguda,
- que la definició existent del segon està relacionada amb un valor exacte d'una propietat ben definida de l'àtom de cesi, que també és una constant de la natura,
- que, tot i que la definició existent de la candela no està relacionada amb cap constant fonamental, es pot considerar vinculada a un valor exacte d'una constant de la natura,
- que la comprensió del sistema internacional d'unitats milloraria si totes les seves unitats bàsiques es definissin fent servir una redacció similar,

per això, el Comitè Internacional de Pesos i Mesures també proposarà

reformular les definicions actuals del segon, del metre i de la candela d'una manera totalment equivalent, com, per exemple:

- el segon, amb símbol s, és la unitat de temps; la seva magnitud s'estableix fixant el valor numèric de la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133 en repòs, a una temperatura de 0 K, exactament igual a 9 192 631 770 quan s'expressa en s⁻¹, unitat del SI igual a l'hertz, Hz,
- el metre, amb símbol m, és la unitat de longitud; la seva magnitud s'estableix fixant el valor numèric de la velocitat de la llum en el buit, exactament igual a 299 792 458 quan s'expressa en la unitat del SI m s⁻¹,

- la candela, amb símbol cd , és la unitat d'intensitat lluminosa en una direcció donada; la seva magnitud s'estableix fixant el valor numèric de l'eficàcia lluminosa d'una radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz, exactament igual a 683 quan s'expressa en $\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{cd sr}$ o en cd sr W^{-1} , unitat del SI igual al lumen per watt, lm W^{-1} .

D'aquesta manera, es veurà que les definicions de les set unitats bàsiques del SI deriven d'una manera natural de les set constants indicades anteriorment.

En conseqüència, en la data escollida per a la implementació de la revisió del SI

- es derogarà la definició del kilogram, vigent des de 1889, basada en la massa del prototip internacional del kilogram (1a CGPM, 1889; 3a CGPM, 1901),
- es derogarà la definició de l'ampere, vigent des de 1948 (9a CGPM, 1948), establerta a partir de la definició proposada pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM, 1946, Resolució 2),
- es derogaran els valors convencionals de la constant de Josephson $K_{\text{J-90}}$ i de la constant de Von Klitzing $R_{\text{K-90}}$ adoptades pel Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM, 1988, recomanacions 1 i 2) a sol·licitud de la CGPM (18a CGPM, 1987, Resolució 6) per a l'establiment de les realitzacions del volt i de l'ohm mitjançant els efectes Josephson i Hall quàntic, respectivament,
- es derogarà la definició del kelvin, vigent des de 1967/1968 (13a CGPM, 1967/1968), basada en la definició anterior menys explícita (10a CGPM, 1954, Resolució 3),
- es derogarà la definició del mol, vigent des de 1971 (14a CGPM, 1971, Resolució 3), segons la qual la massa molar del carboni 12 tenia el valor exacte de $0,012 \text{ kg mol}^{-1}$,
- es derogaran les definicions existents del metre, del segon i de la candela, vigents des que la CGPM les va adoptar a les reunions 17a (1983, Resolució 1), 13a (1967/1968, Resolució 1) i 16a (1979, Resolució 3), respectivament.

La Conferència General de Pesos i Mesures,

té en compte que en la mateixa data

- la massa del prototip internacional del kilogram $m(\kappa)$ serà igual a 1 kg, amb una incertesa relativa igual a la del valor recomanat de h just abans de la redefinició i que posteriorment se'n determinarà el valor d'una manera experimental,
- la constant magnètica (la permeabilitat del buit) μ_0 serà igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$, amb una incertesa relativa igual a la del valor recomanat de la constant d'estructura fina α i que posteriorment se'n determinarà el valor d'una manera experimental,
- la temperatura termodinàmica del punt triple de l'aigua T_{TPW} serà igual a 273,16 K, amb una incertesa relativa igual a la del valor recomanat de k just abans de la redefinició i que posteriorment se'n determinarà el valor d'una manera experimental,
- la massa molar del carboni 12 $M(^{12}\text{C})$ serà igual a $0,012 \text{ kg mol}^{-1}$, amb una incertesa relativa igual a la del valor recomanat de $N_{\text{A}}h$ just abans de la redefinició i que posteriorment se'n determinarà el valor d'una manera experimental.

La Conferència General de Pesos i Mesures,

anima

- els investigadors dels laboratoris nacionals de metrologia, el BIPM i les institucions universitàries a continuar els seus esforços i a transmetre a la comunitat científica en general, i a CODATA en particular, els resultats de les seves feines rellevants per a la determinació de les constants h , e , k i N_{A} , i
- el BIPM a continuar la seva feina per assegurar la traçabilitat dels prototips de massa que manté amb el prototip internacional del kilogram i per desenvolupar un conjunt de patrons de referència que facilitin la disseminació de la unitat de massa un cop el kilogram es redefineixi,

i convida

- el CODATA a continuar proporcionant valors ajustats de les constants fonamentals de la física a partir de totes les dades rellevants disponibles i a transmetre els resultats al CIPM a través del seu Comitè Consultiu per a les Unitats, ja que aquests valors i incerteses del CODATA seran els que s'utilitzaran per a la revisió del SI,
- el CIPM a presentar una proposta per a la revisió del SI tan aviat com es compleixin les recomanacions de la Resolució 12 adoptada per la 23a CGPM, en particular, la preparació de les *mises en pratique* de les noves definicions del kilogram, de l'ampere, del kelvin i del mol,
- el CIPM a continuar treballant per obtenir una redacció millorada de les definicions de les unitats bàsiques del SI en funció de les constants fonamentals, amb l'objectiu d'aconseguir, si és possible, una descripció més comprensible per als usuaris en general, consistent amb el rigor i la claredat científics,
- el CIPM, els comitès consultius, el BIPM, l'OIML i els laboratoris nacionals de metrologia a intensificar els esforços per a iniciar campanyes de sensibilització orientades a informar les comunitats d'usuaris i el públic en general del projecte de redefinició d'algunes de les unitats del SI, i a fomentar l'examen de les implicacions jurídiques, tècniques i pràctiques d'aquestes redefinicions per poder sol·licitar comentaris i contribucions a les comunitats científiques i d'usuaris.

■ **Sobre la revisió de la *mise en pratique* de la definició del metre i el desenvolupament de nous patrons òptics de freqüència (CR, 227)**

Resolució 8

La Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM), en la seva 24a reunió,

considerant

- que hi ha hagut una millora ràpida i significativa en les prestacions dels patrons òptics de freqüència,
- que els laboratoris nacionals de metrologia treballen actualment en tècniques de comparació de patrons òptics de freqüència a una distància curta,
- que s'han de desenvolupar tècniques de comparació remota a escala internacional per a poder comparar els patrons òptics de freqüència,

acull favorablement

- les activitats del grup de treball conjunt del Comitè Consultiu per a la Longitud (CCL) i el Comitè Consultiu del Temps i les Freqüències (CCTF) per a examinar les freqüències de les representacions òptiques del segon,
- els elements afegits pel CIPM el 2009 a la llista comuna de «valors recomanats de freqüències patró per a la *mise en pratique* de la definició del metre i a les representacions secundàries del segon»,
- l'establiment d'un grup de treball del CCTF sobre la coordinació del desenvolupament de tècniques avançades de comparació de temps i freqüències,

recomana que

- els laboratoris nacionals de metrologia comprometin els recursos necessaris per al desenvolupament de patrons òptics de freqüència i la seva comparació,
- el BIPM ajudi a la coordinació d'un projecte internacional en què participin els instituts nacionals de metrologia, orientat a l'estudi de les tècniques que es podrien fer servir per a comparar patrons òptics de freqüència.

CIPM, 2013

■ Actualització de la llista de freqüències patró (PV, 81, 53, 144)

Recomanació 1

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM),

considerant

- que s'ha establert una llista comuna de «valors recomanats de freqüències patró per a la *mise en pratique* de la definició del metre i les representacions secundàries del segon»,
- que el grup de treball conjunt del CCL i el CCTF sobre freqüències patró ha examinat diversos candidats per a la seva inclusió en aquesta llista,

recomana adoptar els canvis següents a la llista comuna dels «valors recomanats de freqüències patró per a la *mise en pratique* de la definició del metre i a les representacions secundàries del segon»:

- incloure a la llista de freqüències patró recomanades la freqüència de transició següent:
 - la transició òptica sense pertorbar $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$ de l'àtom neutre de ^{199}Hg , amb una freqüència d'1 128 575 290 808 162 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,7 \times 10^{-14}$;
- actualitzar a la llista de freqüències patró recomanades les freqüències de transició següents:
 - la transició òptica sense pertorbar $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$ de l'ió de $^{40}\text{Ca}^+$, amb una freqüència de 411 042 129 776 395 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,5 \times 10^{-14}$;
 - la transició òptica sense pertorbar $1S - 2S$ de l'àtom neutre de ^1H , amb una freqüència d'1 233 030 706 593 518 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,2 \times 10^{-14}$;

Nota: Aquesta freqüència correspon a la meitat de la diferència d'energia entre els estats $1S$ i $2S$;

- actualitzar a la llista de freqüències patró recomanades les freqüències de transició següents i que s'aprovin com a representacions secundàries del segon:
 - la transició òptica sense pertorbar $6s\ ^2S_{1/2} - 4f\ ^{13}F_{7/2}$ de l'ió de $^{171}\text{Yb}^+$ (octopol), amb una freqüència de 642 121 496 772 645,6 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,3 \times 10^{-15}$;
 - la transició òptica sense pertorbar $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$ de l'àtom neutre de ^{171}Yb , amb una freqüència de 518 295 836 590 865,0 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de $2,7 \times 10^{-15}$;
- incloure a la llista de freqüències patró recomanades la freqüència de transició següent i que s'aprovi com a representació secundària del segon:
 - la transició òptica sense pertorbar $3s^2\ ^1S_0 - 3s\ 3p\ ^3P_0$ de l'ió de $^{27}\text{Al}^+$, amb una freqüència d'1 121 015 393 207 857,3 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,9 \times 10^{-15}$;
- actualitzar a la llista de freqüències patró recomanades les freqüències de transició següents i que s'aprovin com a representacions secundàries del segon:
 - la transició òptica sense pertorbar $5d\ ^{10}G_8 - 5d\ ^9G_8$ de l'ió de $^{199}\text{Hg}^+$, amb una freqüència d'1 064 721 609 899 145,3 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,9 \times 10^{-15}$;
 - la transició òptica sense pertorbar $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$ de l'ió de $^{171}\text{Yb}^+$ (quadripol), amb una freqüència de 688 358 979 309 307,1 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 3×10^{-15} ;
 - la transició òptica sense pertorbar $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$ de l'ió de $^{88}\text{Sr}^+$, amb una freqüència de 444 779 044 095 485,3 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de $4,0 \times 10^{-15}$;
 - la transició òptica sense pertorbar $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$ de l'àtom neutre de ^{87}Sr , amb una freqüència de 429 228 004 229 873,4 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' 1×10^{-15} ;

- incloure a la llista de freqüències patró recomanades la freqüència de transició següent i que s'aprovi com a representació secundària del segon:
 - la transició quàntica hiperfina sense pertorbar de l'estat fonamental de l'àtom de ^{87}Rb , amb una freqüència de 6 834 682 610,904 312 Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,3 \times 10^{-15}$.

Nota: Se suposa que el valor de la incertesa estàndard correspon a un grau de confiança del 68 %. Tot i això, ja que el nombre de resultats disponible és molt limitat, hi ha la possibilitat que, retrospectivament, això no sigui exacte.

25a CGPM, 2014

■ **Sobre la futura revisió del sistema internacional d'unitats, el SI** (CR, 177 i *Metrologia*, 2015, 52, 155)

La 26a CGPM (2018) va aprovar la revisió del SI (Resolució 1, vegeu la pàgina 91).

Resolució 1

La Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM), en la seva 25a reunió,

recordant

- la Resolució 1 adoptada per la 24a CGPM (2011), que pren nota de la intenció del Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM) de proposar una revisió del SI que relacioni les definicions del kilogram, de l'ampere, del kelvin i del mol amb els valors numèrics exactes de la constant de Planck h , de la càrrega elemental e , de la constant de Boltzmann k i de la constant d'Avogadro N_A , respectivament, i de modificar la manera de definir el SI, així com la redacció de les definicions de les unitats del SI per a les magnituds temps, longitud, massa, corrent elèctric, temperatura termodinàmica, quantitat de substància i intensitat lluminosa, de manera que les constants de referència en què es basa el SI apareguin clarament,
- els nombrosos avantatges, mencionats a la Resolució 1, que comportaria aquesta revisió del SI per a la ciència, la tecnologia, la indústria i el comerç, especialment pel fet de relacionar el kilogram amb una constant de la natura i no amb la massa d'un objecte material (artefacte), assegurant-ne així l'estabilitat a llarg termini,
- la Resolució 7 adoptada per la 21a CGPM (1999) que anima els laboratoris nacionals de metrologia a continuar els experiments per a aconseguir una redefinició del kilogram,
- la Resolució 12 adoptada per la 23a CGPM (2007) que descriu la feina que hauran de fer els laboratoris nacionals de metrologia, l'Oficina Internacional de Pesos i Mesures (BIPM), el CIPM i els seus comitès consultius, per tal de permetre l'adopció de la revisió del SI per part de la CGPM,

considerant que hi ha hagut un progrés significatiu a l'hora de completar les feines necessàries, entre les quals hi ha:

- l'adquisició de dades pertinents i la seva anàlisi per part del Comitè de Dades per a la Ciència i la Tecnologia (CODATA) per a obtenir els valors requerits de les constants fonamentals h , e , k i N_A ,
- l'establiment per part del BIPM d'un conjunt de patrons de referència de massa, que permetran facilitar la utilització de la unitat de massa un cop es revisi el SI,
- la preparació de *mises en pratique* de les noves definicions del kilogram, de l'ampere, del kelvin i del mol,

tenint en compte que el Comitè Consultiu per a les Unitats (CCU), el CIPM, el BIPM, els laboratoris nacionals de metrologia i els comitès consultius han de continuar treballant en

- campanyes de sensibilització per a informar les comunitats d'usuaris i el gran públic sobre el projecte de revisió del SI,
- la preparació de la 9a edició de l'opuscle sobre el SI, en què el SI revisat es presentarà d'una manera comprensible per al conjunt dels lectors, sense comprometre el rigor científic,

considerant que, malgrat els progressos efectuats, les dades disponibles encara no semblen prou robustes perquè la CGPM adopti el SI revisat en la seva 25a reunió,

anima

- els laboratoris nacionals de metrologia, el BIPM i les institucions universitàries a continuar els seus esforços per a determinar experimentalment els valors de les constants de h , e , k i N_A amb el grau d'incertesa requerit,
- els laboratoris nacionals de metrologia a continuar l'anàlisi i la discussió d'aquests resultats a través dels comitès consultius,
- el CIPM, en col·laboració amb els comitès consultius i amb el CCU, a continuar desenvolupant un pla per a implementar la Resolució 1 adoptada per la 24a CGPM (2011),
- el CIPM a continuar els seus esforços, juntament amb els comitès consultius, els laboratoris nacionals de metrologia, el BIPM i altres organitzacions com l'Organització Internacional de Metrologia Legal (OIML), per a completar els treballs necessaris perquè la CGPM adopti, a la 26a reunió, una resolució que permeti reemplaçar el SI actual pel SI revisat, sempre que la quantitat de dades obtingudes, les seves incerteses associades i el grau de coherència es considerin satisfactoris.

CIPM, 2015

Les actualitzacions es poden trobar a la pàgina web del BIPM.

■ Actualització de la llista de freqüències patró (PV, 83, 54, 207)

Recomanació 2

El Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM),

considerant

- que s'ha establert una llista comuna dels «valors recomanats de freqüències patró per a la *mise en pratique* de la definició del metre i a les representacions secundàries del segon»,
- que el grup de treball conjunt del CCL i el CCTF sobre freqüències patró ha examinat diversos candidats per incloure'ls en aquesta llista,

recomana

que s'actualitzi la llista de freqüències patró recomanades amb les freqüències de transició següents:

- la transició òptica sense pertorbar $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_0$ de l'àtom neutre de ^{199}Hg , amb una freqüència de $f_{199\text{Hg}} = 1\ 128\ 575\ 290\ 808\ 154,8$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 6×10^{-16} ;
- la transició òptica sense pertorbar $6s\ ^2S_{1/2} - 4f^{13}\ 6s^2\ ^2F_{7/2}$ de l'ió de $^{171}\text{Yb}^+$, amb una freqüència de $f_{171\text{Yb}^+}$ (octopol) = $642\ 121\ 496\ 772\ 645,0$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 6×10^{-16} (el CIPM ja ha aprovat aquesta radiació com a representació secundària del segon);
- la transició òptica sense pertorbar $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$ de l'ió de $^{171}\text{Yb}^+$, amb una freqüència de $f_{171\text{Yb}^+}$ (quadripol) = $688\ 358\ 979\ 309\ 308,3$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 6×10^{-16} (el CIPM ja ha aprovat aquesta radiació com a representació secundària del segon);
- la transició òptica sense pertorbar $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$ de l'ió de $^{88}\text{Sr}^+$, amb una freqüència de $f_{88\text{Sr}^+} = 444\ 779\ 044\ 095\ 486,6$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,6 \times 10^{-15}$ (el CIPM ja ha aprovat aquesta radiació com a representació secundària del segon);
- la transició òptica sense pertorbar $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$ de l'ió de $^{40}\text{Ca}^+$, amb una freqüència de $f_{40\text{Ca}^+} = 411\ 042\ 129\ 776\ 398,4$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada d' $1,2 \times 10^{-14}$;
- la transició òptica sense pertorbar $1S - 2S$ de l'àtom neutre de ^1H , amb una freqüència de $f_{1\text{H}} = 1\ 233\ 030\ 706\ 593\ 514$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 9×10^{-15} ;

Nota: Aquesta freqüència correspon a la meitat de la diferència d'energia entre els estats 1S i 2S;

- la transició òptica sense pertorbar $5s^2 \ ^1S_0 - 5s5p \ ^3P_0$ de l'àtom neutre de ^{87}Sr , amb una freqüència de $f_{87\text{Sr}} = 429\,228\,004\,229\,873,2$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 5×10^{-16} (el CIPM ja ha aprovat aquesta radiació com a representació secundària del segon);
- la transició òptica sense pertorbar $6s^2 \ ^1S_0 - 6s6p \ ^3P_0$ de l'àtom neutre de ^{171}Yb , amb una freqüència de $f_{171\text{Yb}} = 518\,295\,836\,590\,864,0$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 2×10^{-15} (el CIPM ja ha aprovat aquesta radiació com a representació secundària del segon);
- la transició hiperfina sense pertorbar de l'estat fonamental de l'àtom de ^{87}Rb , amb una freqüència de $f_{87\text{Rb}} = 6\,834\,682\,610,904\,310$ Hz i una incertesa estàndard relativa estimada de 7×10^{-16} (el CIPM ja ha aprovat aquesta radiació com a representació secundària del segon);

recomana també

que s'inclougi a la llista de valors recomanats de freqüències patró les freqüències de transició següents:

- Molècula absorbent de $^{127}\text{I}_2$, component a_1 de l'espectre d'absorció saturada, transició R(36) 32-0.

$$\begin{aligned} \text{Els valors} \quad f_{a1} &= 564\,074\,632,42 \text{ MHz} \\ \lambda_{a1} &= 531\,476\,582,65 \text{ fm} \end{aligned}$$

amb una incertesa estàndard relativa estimada d' 1×10^{-10} s'apliquen a la radiació d'un díode làser de retroalimentació distribuïda de freqüència doblada, estabilitzat amb una cèl·lula de iode situada a l'exterior del làser.

- Àtom absorbent de ^{87}Rb , transició $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$, encreuament de nivells entre les components hiperfines d i f de l'absorció saturada a 780 nm (transició D2).

$$\begin{aligned} \text{Els valors} \quad f_{\text{encreuament } d/f} &= 384\,227\,981,9 \text{ MHz} \\ \lambda_{\text{encreuament } d/f} &= 780\,246\,291,6 \text{ fm} \end{aligned}$$

amb una incertesa estàndard relativa estimada de 5×10^{-10} s'apliquen a la radiació d'un làser de díode sintonitzable i de cavitat externa, estabilitzat sobre la ressonància d'encreuament del nivell d/f en una cèl·lula de rubidi situada a l'exterior del làser.

Nota: Se suposa que el valor de la incertesa estàndard correspon a un grau de confiança del 68 %. Tot i això, ja que el nombre de resultats disponible és molt limitat, hi ha la possibilitat que, retrospectivament, això no sigui exacte.

CIPM, 2017

■ Sobre els progressos realitzats amb vista a la possible redefinició del SI (PV, 85, 28, 101)

Decisió 10

El CIPM rep favorablement les recomanacions relatives a la revisió del SI formulades pels seus comitès consultius.

El CIPM observa que ja es compleixen les condicions fixades per a la revisió del SI i decideix sotmetre el Projecte de resolució A a la 26a Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM) i prendre totes les altres disposicions necessàries per a procedir a la redefinició planificada del kilogram, de l'ampere, del kelvin i del mol.

26a CGPM, 2018

■ **Sobre la revisió del sistema internacional d'unitats (SI)** (CR, en impremta i *Metrologia*, 2019, **56**, 022001)

Resolució 1

La Conferència General de Pesos i Mesures (CGPM), en la seva 26a reunió,

considerant

- que és essencial disposar d'un sistema internacional d'unitats (SI) uniforme i accessible a escala mundial, per al comerç internacional, la indústria d'alta tecnologia, la salut i la seguretat humanes, la protecció del medi ambient, els estudis sobre l'evolució del clima i la ciència bàsica que sosté tots aquests àmbits,
- que les unitats del SI han de ser estables a llarg termini, autocoherents i realitzables d'una manera pràctica tenint en compte la descripció teòrica actual de la natura, al més alt nivell,
- que una revisió del SI que complís aquestes exigències es va proposar a la Resolució 1, adoptada per unanimitat per la 24a CGPM (2011), que exposa amb detall una nova manera de definir el SI a partir d'un conjunt de set constants, escollides entre les constants fonamentals de la física i altres constants de la natura, a partir de les quals es dedueixen les definicions de les set unitats bàsiques,
- que les condicions establertes per la 24a CGPM (2011), i confirmades per la 25a CGPM (2014), per a poder adoptar el SI revisat ja es compleixen actualment,

decideix

que, a partir del 20 de maig de 2019, el sistema internacional d'unitats, el SI, és el sistema d'unitats segons el qual:

- la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133 sense pertorbar, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, és igual a 9 192 631 770 Hz,
- la velocitat de la llum en el buit, c , és igual a 299 792 458 m/s,
- la constant de Planck, h , és igual a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- la càrrega elemental, e , és igual a $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- la constant de Boltzmann, k , és igual a $1,380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- la constant d'Avogadro, N_{A} , és igual a $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- l'eficàcia lluminosa d'una radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz, K_{cd} , és igual a 683 lm/W,

en què les unitats hertz, joule, coulomb, lumen i watt, que tenen per símbols Hz, J, C, lm i W, respectivament, estan relacionades amb les unitats segon, metre, kilogram, ampere, kelvin, mol i candela, que tenen per símbols s, m, kg, A, K, mol i cd, respectivament, segons les relacions, $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ i $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$,

pren nota de les conseqüències de la revisió del SI pel que fa a les unitats bàsiques del SI, establertes a la Resolució 1 adoptada per la 24a CGPM (2011), i les confirma als annexos d'aquesta resolució, que tenen la mateixa validesa que aquesta,

convida el Comitè Internacional de Pesos i Mesures (CIPM) a publicar una nova edició del seu opuscle sobre el SI, «El sistema internacional d'unitats», que conté una descripció completa del SI revisat.

Annex 1. Derogació de les definicions anteriors de les unitats bàsiques

De la nova definició del SI descrita més amunt, se'n desprèn que, a partir del 20 de maig de 2019:

- queda derogada la definició del segon, vigent des de 1967/1968 (13a CGPM, Resolució 1),
- queda derogada la definició del metre, vigent des de 1983 (17a CGPM, Resolució 1),
- queda derogada la definició del kilogram, vigent des de 1889 (1a CGPM, 1889; 3a CGPM, 1901), establerta a partir de la massa del prototip internacional del kilogram,
- queda derogada la definició de l'ampere, vigent des de 1948 (9a CGPM), establerta a partir de la definició proposada pel CIPM (1946, Resolució 2),
- queda derogada la definició del kelvin, vigent des de 1967/1968 (13a CGPM, Resolució 4),
- queda derogada la definició del mol, vigent des de 1971 (14a CGPM, Resolució 3),
- queda derogada la definició de la candela, vigent des de 1979 (16a CGPM, Resolució 3),
- queda derogada la decisió d'adoptar els valors convencionals de les constants de Josephson K_{J-90} i de Von Klitzing R_{K-90} , presa pel CIPM (1988, recomanacions 1 i 2) a sol·licitud de la CGPM (18a CGPM, 1987, Resolució 6), per a l'establiment de representacions del volt i l'ohm mitjançant els efectes Josephson i Hall quàntic, respectivament.

Annex 2. Estatus de les constants usades en les definicions anteriors

De la nova definició del SI descrita més amunt i dels valors recomanats a l'ajustament especial de 2017 del Comitè de Dades per a la Ciència i la Tecnologia (CODATA), en què es basen els valors de les constants definidores del SI, se'n desprèn que, a partir del 20 de maig de 2019:

- la massa del prototip internacional del kilogram, $m(K)$, és igual a 1 kg, amb una incertesa estàndard relativa igual a la del valor recomanat de h en el moment de l'adopció d'aquesta resolució; és a dir, $1,0 \times 10^{-8}$. En el futur, se'n determinarà el valor d'una manera experimental,
- la permeabilitat magnètica del buit, μ_0 , és igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$, amb una incertesa estàndard relativa igual a la del valor recomanat de la constant d'estructura fina α en el moment de l'adopció d'aquesta resolució; és a dir, $2,3 \times 10^{-10}$. En el futur, se'n determinarà el valor d'una manera experimental,
- la temperatura termodinàmica del punt triple de l'aigua, T_{TPW} , és igual a 273,16 K, amb una incertesa estàndard relativa igual a la del valor recomanat de k en el moment de l'adopció d'aquesta resolució; és a dir, $3,7 \times 10^{-7}$. En el futur, se'n determinarà el valor d'una manera experimental,
- la massa molar del carboni 12, $M(^{12}\text{C})$, és igual a $0,012 \text{ kg mol}^{-1}$, amb una incertesa estàndard relativa igual a la del valor recomanat de $N_A h$ en el moment de l'adopció d'aquesta resolució; és a dir, $4,5 \times 10^{-10}$. En el futur, se'n determinarà el valor d'una manera experimental.

Annex 3. Les unitats bàsiques del SI

De la nova definició del SI descrita més amunt, basada en els valors numèrics fixats de les constants escollides, es dedueixen les definicions de cadascuna de les set unitats bàsiques del SI amb l'ajuda d'una o més d'aquestes constants definidores, segons el cas. Les definicions que en resulten, que entraran en vigor el 20 de maig de 2019, són les següents:

- El segon, amb símbol s, és la unitat de temps del SI. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la freqüència del cesi, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133 sense pertorbar, igual a 9 192 631 770 quan s'expressa en Hz, unitat igual a s^{-1} .
- El metre, amb símbol m, és la unitat de longitud del SI. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la velocitat de la llum en el buit, c , igual a 299 792 458 quan s'expressa en m/s, quan el segon s'expressa en funció de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- El kilogram, amb símbol kg, és la unitat de massa del SI. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la constant de Planck, h , igual a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ quan s'expressa en J s, unitat igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, quan el metre i el segon s'expressen en funció de c i de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- L'ampere, amb símbol A, és la unitat de corrent elèctric del SI. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la càrrega elemental, e , igual a $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ quan s'expressa en C, unitat igual a A s, quan el segon s'expressa en funció de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- El kelvin, amb símbol K, és la unitat de temperatura termodinàmica del SI. Es defineix prenent el valor numèric fixat de la constant de Boltzmann, k , igual a $1,380\,649 \times 10^{-23}$ quan s'expressa en J K^{-1} , unitat igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, quan el kilogram, el metre i el segon s'expressen en funció de h , c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- El mol, amb símbol mol, és la unitat de quantitat de substància del SI. Un mol conté exactament $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entitats elementals. Aquesta xifra, anomenada *nombre d'Avogadro*, correspon al 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 representació 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 específic de partícules.

- La candela, amb símbol cd, és la unitat del SI d'intensitat lluminosa en una direcció determinada. Es defineix prenent el valor numèric fixat de l'eficàcia lluminosa d'una radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz, K_{cd} , igual a 683 quan s'expressa en lm W^{-1} , unitat igual a cd sr W^{-1} , o $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$, quan el kilogram, el metre i el segon s'expressen en funció de h , c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Annex 2. Realització pràctica de les principals unitats

L'annex 2 es publica únicament en format electrònic al lloc web del BIPM (www.bipm.org).

Annex 3. Unitats per a la mesura de les magnituds fotoquímiques i fotobiològiques

L'annex 3 es publica únicament en format electrònic al lloc web del BIPM (www.bipm.org).

Annex 4. Notes històriques sobre l'evolució del sistema internacional d'unitats i les seves unitats bàsiques

Part 1. Evolució històrica de la realització de les unitats del SI

Els mètodes experimentals utilitzats per a la realització de les unitats que fan servir equacions de la física s'anomenen *mètodes primaris*. La característica essencial d'un mètode primari és que permet mesurar directament una magnitud en una unitat concreta a partir de la seva definició fent servir només magnituds i constants que no impliquen aquesta unitat.

Tradicionalment, es considerava que una unitat per a una magnitud donada era un exemple particular d'aquella magnitud, que s'havia escollit per a proporcionar valors numèrics de grandària convenient en mesures comunes. Abans de l'arribada de la ciència moderna, les unitats es definien necessàriament mitjançant artefactes materials, en particular el metre per a la longitud i el kilogram per a la massa, o a partir de la propietat d'un objecte particular, com la rotació de la Terra per al segon. Tanmateix, fins i tot a l'origen del sistema mètric decimal, a finals del segle XVIII, es va reconèixer que una definició més desitjable de la unitat de longitud seria, per exemple, aquella basada en una propietat universal de la natura, com la longitud d'un pèndol que bat segons. Aquesta definició seria independent del temps i del lloc de realització de la unitat i, en principi, seria accessible al món sencer. En aquella època, consideracions de tipus pràctic van portar a definicions més simples, basades en artefactes, per al metre i el kilogram, mentre que el segon va continuar lligat a la rotació de la Terra. No va ser fins al 1960 que es va adoptar la primera definició no material del metre, a saber, la longitud d'ona d'una radiació òptica específica.

Des d'aleshores s'han adoptat definicions per a l'ampere, el kelvin, el mol i la candela que no fan referència a artefactes materials. La definició de l'ampere es basa en un corrent elèctric específic requerit per a produir una força electromagnètica donada, i la del kelvin, en un estat termodinàmic particular del punt triple de l'aigua. La definició atòmica del segon es basa en una transició específica de l'àtom de cesi. El kilogram sempre ha estat una excepció, ja que és l'única unitat que s'ha mantingut lligada a un artefacte. La definició que va obrir el camí a la universalitat real va ser la del metre, adoptada el 1983. Tot i que no l'indicava explícitament, aquesta definició implicava un valor numèric fixat de la velocitat de la llum. Ara bé, la definició estava redactada de la manera tradicional i establia, essencialment, que el metre era la distància que recorria la llum en un temps específic. D'aquesta manera, la definició del metre tenia la mateixa forma que les altres definicions de les unitats bàsiques del SI; per exemple, «l'ampere és la intensitat de corrent que...» i «el kelvin és una fracció d'una temperatura específica», etc. Aquestes definicions es poden designar amb l'expressió *definicions basades en una unitat explícita*.

Si bé aquestes definicions compleixen molts dels requisits d'universalitat i accessibilitat, i es poden realitzar de moltes maneres, limiten, malgrat tot, les realitzacions pràctiques a experiments vinculats directament o indirecta a les condicions particulars o als estats especificats en cada definició. Per això, l'exactitud de la *mise en pratique* d'aquestes

definicions no pot ser mai millor que l'exactitud de la realització de les condicions o estats particulars especificats en les definicions.

Aquest és un problema particular de la definició actual del segon, que es basa en una transició de microones d'un àtom de cesi. S'ha establert que les freqüències de les transicions òptiques d'àtoms o ions diferents són avui dia més reproduïbles, en alguns ordres de magnitud, que la freqüència del cesi que apareix en aquesta definició.

En la definició actual del SI basada en un conjunt de constants definidores, en comptes que cada definició indiqui una condició o un estat específic, que imposa un límit fonamental a l'exactitud de la realització, es pot fer servir qualsevol equació de la física convenient, que vinculi la constant o constants particulars a la magnitud que es vol mesurar. Així, les unitats bàsiques es defineixen d'una manera més general, sense cap límit imposat per la ciència o la tecnologia actuals i en què els avenços futurs poden donar lloc a unes equacions encara desconegudes que podrien realitzar les unitats de maneres diferents, amb una exactitud molt més gran. Amb un sistema d'unitats definides així, no hi ha, en principi, cap límit en relació amb l'exactitud amb què es pot realitzar una unitat. Resta com una excepció la definició del segon, en què, de moment, la transició de microones del cesi en continua sent la base.

La diferència entre una *definició basada en una unitat explícita* i una *definició basada en una constant explícita* es pot il·lustrar clarament amb l'ajuda de les dues definicions prèvies del metre que depenien d'un valor numèric fixat de la velocitat de la llum o amb l'ajuda de les dues definicions del kelvin. La definició original del metre de 1983 estableix, en efecte, que «el metre és la distància que recorre la llum en el buit durant 1/299 792 458 segons». La nova definició simplement indica que el metre es defineix en funció de la constant que defineix el segon, la freqüència especificada del cesi, i del valor numèric de la velocitat de la llum expressada en m s^{-1} . Per tant, es pot fer servir qualsevol equació de la física, incloent-hi, evidentment, la indicada en la definició anterior, el temps necessari per a recórrer una distància donada, que s'utilitza per a les distàncies astronòmiques, però també, l'equació simple que relaciona la freqüència i la longitud d'ona amb la velocitat de la llum. La definició anterior del kelvin es basa en un valor numèric fixat per a la temperatura del punt triple de l'aigua que requereix, en darrer terme, una mesura a la temperatura del punt triple de l'aigua. La nova definició, basada en el valor numèric fixat per a la constant de Boltzmann, és molt més general, ja que qualsevol equació termodinàmica en què aparegui k es pot fer servir, en principi, per a determinar una temperatura termodinàmica a qualsevol punt de l'escala de temperatura. Per exemple, en determinar l'excitència radiant total d'un cos negre a temperatura T , igual a $(2\pi^5 k^4 / 15c^2 h^3) T^4$, en W m^{-2} , es pot determinar directament T .

Pel que fa al kilogram, la unitat la definició de la qual ha experimentat el canvi més fonamental, la realització es pot dur a terme a partir de qualsevol equació de la física que vinculi la massa, la constant de Planck, la velocitat de la llum i la freqüència del cesi. Una d'aquestes equacions és la que descriu el funcionament d'una balança electromecànica, anteriorment coneguda com a *balança de watt* o, més recentment, com a *balança de Kibble*.¹ Una balança de Kibble permet mesurar una potència mecànica, que es mesura en funció d'una massa, m ; l'acceleració de la gravetat, g , i una velocitat, v , en funció d'una potència elèctrica obtinguda a partir d'un corrent elèctric i d'una tensió, mesurades a partir dels efectes Hall quàntic i Josephson, respectivament. L'equació resultant és $mgv = Ch$, en què C és una constant de calibratge que inclou les freqüències mesurades i h és la constant de Planck.

1. Es va canviar el nom de la balança de watt en reconeixement del seu inventor, Bryan Kibble.

Un altre mètode que es pot utilitzar per a una realització primària del kilogram és el de determinar el nombre d'àtoms en una esfera de silici i fer servir l'equació:

$$m = \frac{8V}{a_0^3} \frac{2R_\infty h}{c\alpha^2} \frac{m_{\text{Si}}}{m_e}$$

amb la massa m i el volum V de l'esfera (d'1 kg, aproximadament), el paràmetre de xarxa a_0 , la constant de Rydberg R_∞ , la constant d'estructura fina α , la massa d'un àtom de silici (establint una mitjana entre els tres isòtops existents a l'esfera) m_{Si} , i la massa d'un electró m_e . La primera fracció correspon al nombre d'àtoms a l'esfera, la segona a la massa electrònica i la tercera a la relació entre la massa de l'àtom de silici (ponderada isotòpicament) i la massa de l'electró.

Una altra possibilitat per a mesurar la massa a través de la nova definició del kilogram, però aquest cop a escala microscòpica, és mitjançant mesuraments de retrocés atòmic fent servir la relació que inclou h/m .

Tots aquests mètodes il·lustren perfectament el caràcter general de la nova manera de definir les unitats. El lloc web del BIMP conté informació més detallada sobre les realitzacions actuals de les unitats bàsiques i d'altres unitats.

Part 2. Evolució històrica del sistema internacional

La 9a CGPM (1948, Resolució 6; CR, 64) instava el CIPM a:

- estudiar l'establiment d'un conjunt de normes complet per a les unitats de mesura;
- obtenir, amb aquesta finalitat, mitjançant una enquesta oficial, l'opinió dels cercles científics, tècnics i pedagògics de tots els països i
- fer recomanacions pel que fa a l'establiment d'un [...] *sistema pràctic d'unitats de mesura*, susceptible de ser adoptat a tots els països signataris de la Convenció del Metre.

La mateixa CGPM també va establir i enumerar la Resolució 7 (CR, 70) que fixa els principis generals per a l'escriptura dels símbols de les unitats i dona una llista d'algunes unitats coherents amb una denominació especial.

La 10a CGPM (1954, Resolució 6; CR, 80) va adoptar per a aquest sistema pràctic les sis magnituds bàsiques següents: longitud, massa, temps, intensitat de corrent elèctric, temperatura termodinàmica i intensitat lluminosa; així mateix, també va adoptar les seves sis unitats bàsiques corresponents: metre, kilogram, segon, ampere, kelvin i candela. Després d'un llarg debat entre físics i químics, la 14a CGPM (1971, Resolució 3; CR, 78, i *Metrologia* 1972, **8**, 36) va afegir la quantitat de substància com a setena magnitud bàsica, i com a unitat bàsica corresponent, el mol.

L'11a CGPM (1960, Resolució 12; CR, 87) va adoptar el nom de *sistema internacional d'unitats*, amb l'abreviatura internacional SI, per a aquest sistema pràctic d'unitats i va establir normes per als prefixos, les unitats derivades i les unitats suplementàries (que van desaparèixer més endavant), així com altres indicacions, establint d'aquesta manera una normativa completa per a les unitats de mesura. En les reunions següents, la CGPM i el CIPM han ampliat i modificat l'estructura original del SI per tal de tenir en compte els avenços de la ciència i l'evolució de les necessitats dels usuaris.

Les principals etapes històriques que han portat a aquestes decisions importants es poden resumir de la manera següent:

- La creació del sistema mètric decimal en temps de la Revolució Francesa i el dipòsit de dos patrons de platí que representaven el metre i el kilogram, el 22 de juny de 1799, als Arxius de la República a París, que es poden considerar el primer pas cap al sistema internacional d'unitats actual.
- El 1832, Gauss va promoure activament l'aplicació del sistema mètric, associat amb el segon, definit en astronomia, com un sistema coherent d'unitats per a les ciències físiques. Gauss va ser el primer a realitzar mesuraments absoluts del camp magnètic terrestre mitjançant un sistema decimal basat en les *tres unitats mecàniques* mil·límetre, gram i segon per a les magnituds longitud, massa i temps, respectivament. Posteriorment, Gauss i Weber van ampliar aquestes mesures per incloure-hi altres fenòmens elèctrics.
- A la dècada de 1860, Maxwell i Thomson van posar en pràctica aquestes mesures d'una manera més completa en l'àmbit de l'electricitat i el magnetisme, en el si de la British Association for the Advancement of Science (BAAS). Van formular les regles de formació d'un *sistema coherent d'unitats* amb unitats bàsiques i unitats derivades. El 1874, la BAAS va introduir el *sistema CGS*, un sistema d'unitats tridimensional i coherent basat en les tres unitats mecàniques centímetre, gram i segon, que utilitza prefixos des de micro fins a mega per a expressar els múltiples i els submúltiples decimals. El desenvolupament experimental posterior de les ciències físiques es basa, en gran part, en la utilització d'aquest sistema.
- El fet de completar d'una manera coherent el sistema CGS per als camps de l'electricitat i el magnetisme va portar a escollir unitats d'una mida més adaptada a la pràctica. A la dècada de 1880, la BAAS i el Congrés Internacional de l'Electricitat, predecessor de la Comissió Electrotècnica Internacional (IEC), van aprovar un sistema d'*unitats pràctiques* mútuament coherents. Entre aquestes hi havia l'ohm per a la resistència elèctrica, el volt per a la força electromotriu i l'ampere per al corrent elèctric.
- Després de la signatura de la Convenció del Metre, el 20 de maig de 1875, que creà el BIMP i establí la CGPM i el CIPM, es van crear prototips internacionals nous del metre i del kilogram. El 1889, la primera CGPM els va aprovar. Juntament amb el segon dels astrònoms com a unitat de temps, aquestes unitats constituïren un sistema d'unitats mecàniques tridimensional similar al sistema CGS, però en què les unitats bàsiques són el metre, el kilogram i el segon, conegut amb el nom de sistema MKS.
- El 1901, Giorgi va demostrar que era possible combinar les unitats mecàniques d'aquest sistema MKS amb les unitats elèctriques pràctiques per formar un sol sistema coherent de quatre dimensions, afegint a les tres unitats bàsiques una quarta unitat, de naturalesa elèctrica, com l'ampere o l'ohm, i racionalitzant les equacions usades en electromagnetisme. La proposta de Giorgi va obrir el camí a altres ampliacions.
- Després de la revisió de la Convenció del Metre per la 6a CGPM (1921), que va estendre les funcions i les responsabilitats del BIMP a altres camps de la física, i la creació del Comitè Consultiu de l'Electricitat (CCE) per la 7a CGPM (1927), la proposta de Giorgi fou discutida amb detall per la Comissió Electrotècnica Internacional, la Unió Internacional de Física Pura i Aplicada i altres organitzacions internacionals. Això va portar el CCE a proposar, el 1939, l'adopció

d'un sistema de quatre dimensions basat en el metre, el kilogram, el segon i l'ampere (sistema MKSA), una proposta que el Comitè Internacional va aprovar el 1946.

- Després d'una consulta internacional realitzada pel BIPM a partir de 1948, la 10a CGPM (1954) va aprovar la introducció del kelvin i de la candela com a unitats bàsiques per a la temperatura termodinàmica i la intensitat lluminosa, respectivament. L'11a CGPM (1960) va donar el nom de sistema internacional d'unitats (SI) a aquest sistema. A més, va establir les normes per als prefixos, les unitats derivades i les unitats suplementàries (que van desaparèixer més endavant), així com altres indicacions, establint d'aquesta manera una normativa completa per a les unitats de mesura.
- A la 14a CGPM (1971) es va adoptar una nova unitat bàsica, el mol, amb símbol mol, per a la magnitud quantitat de substància. Això es produí a conseqüència d'una proposta formulada per l'Organització Internacional per a la Normalització (ISO), que sorgí en primer lloc de la Comissió per a Símbols, Unitats i Nomenclatura de la Unió Internacional de Física Pura i Aplicada (IUPAP) i amb el suport de la Unió Internacional de Química Pura i Aplicada (IUPAC). El SI passà així a tenir set unitats bàsiques.
- Des d'aleshores, s'han fet avenços extraordinaris per a relacionar les unitats del SI amb magnituds veritablement invariables, com les constants fonamentals de la física i les propietats dels àtoms. Tot reconeixent la importància de vincular les unitats del SI a aquestes magnituds invariables, la 24a CGPM (2011) va adoptar els principis per a una nova definició del SI basada en l'ús d'un conjunt de set constants d'aquest tipus com a referència per a les definicions de les unitats. En el moment de la 24a CGPM, els experiments per a determinar els valors numèrics d'aquestes constants no permetien obtenir resultats completament coherents, però a la 26a CGPM (2018) ja es va aconseguir i a la Resolució 1 es va adoptar la nova definició del SI. Aquesta és la base de la definició del SI presentada en aquest opuscle, que és la manera més simple i fonamental de definir-lo.
- Amb anterioritat, el SI estava definit en funció de set unitats bàsiques i d'unitats derivades definides com el producte de potències de les unitats bàsiques. Les set unitats bàsiques s'havien escollit per raons històriques, en funció de l'evolució del sistema mètric i del desenvolupament del SI al llarg dels últims cent trenta anys. L'elecció d'aquestes unitats no era l'única possible, però es va establir i va acabar sent habitual al llarg dels anys, proporcionant un marc no només per a descriure el SI, sinó també per a definir les unitats derivades. Aquest paper de les unitats bàsiques continua en el SI actual, tot i que avui en dia el SI es defineix mitjançant les set constants escollides. Per tant, en aquest opuscle encara es poden trobar les definicions de les set unitats bàsiques, però es basen en les set constants que defineixen el SI, és a dir, la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental del cesi $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la velocitat de la llum en el buit c , la constant de Planck h , la càrrega elemental e , la constant de Boltzmann k , la constant d'Avogadro N_A i l'eficàcia lluminosa K_{cd} d'una radiació visible definida.

Les definicions de les set unitats bàsiques es poden relacionar sense ambigüitat amb els valors numèrics de les set constants que defineixen el SI. Tot i això, no existeix una relació biunívoca entre les set constants i les set unitats bàsiques, ja que moltes de les unitats bàsiques depenen de més d'una de les set constants.

Part 3. Perspectiva històrica sobre les unitats bàsiques del SI

Unitat de temps, el segon

Abans de 1960, la unitat de temps, el segon, es definia com la fracció $1/86\,400$ del dia solar mitjà. La definició exacta de *dia solar mitjà* es va deixar als astrònoms. Tanmateix, les observacions van mostrar que aquesta definició no era satisfactòria degut a les irregularitats en la rotació de la Terra. Per definir d'una manera més precisa la unitat de temps, l'11a CGPM (1960, Resolució 9; CR, 86) va aprovar una definició, de la Unió Astronòmica Internacional, que es basava en l'any tròpic 1900. Això no obstant, la recerca experimental ja havia demostrat que un patró atòmic de temps, basat en una transició entre dos nivells d'energia d'un àtom o una molècula, es podia realitzar i reproduir amb una exactitud molt més gran. Tenint en compte que una definició d'alta precisió de la unitat de temps era indispensable per a la ciència i la tecnologia, la 13a CGPM (1967-1968, Resolució 1; CR, 103, i *Metrologia*, 1968, 4, 43) va escollir una nova definició del segon basada en la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133. La 26a CGPM (2018), a la Resolució 1, va adoptar una redacció més precisa d'aquesta definició, ara basada en un valor numèric fixat de la freqüència de la transició hiperfina de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133 sense pertorbar, $\Delta\nu_{Cs}$.

Unitat de longitud, el metre

L'11a CGPM (1960) va substituir la definició del metre de 1889, és a dir, la longitud del prototip internacional de platí irídic, per una definició basada en la longitud d'ona de la radiació corresponent a una transició particular del criptó 86, per tal de millorar l'exactitud amb què es podia realitzar la definició del metre. Aquesta realització es va dur a terme mitjançant un interferòmetre i un microscopi mòbil en translació per a mesurar la variació dels trajectes òptics per comptatge de franges. La 17a CGPM (1983, Resolució 1; CR, 97, i *Metrologia* 1984, 20, 25) va substituir, el 1983, aquesta definició per una definició basada en la longitud del trajecte que recorre la llum en el buit durant un interval de temps específic. El prototip internacional del metre original, que va ser aprovat per la 1a CGPM el 1889 (CR, 34-38), es conserva al BIPM en les condicions establertes aquell mateix any. Per tal de deixar clara la seva dependència del valor numèric fixat de la velocitat de la llum, c , la redacció de la definició del metre es va modificar a la Resolució 1 de la 26a CGPM (2018).

Unitat de massa, el kilogram

Segons la definició del kilogram de 1889, la unitat de massa era simplement igual a la massa del prototip internacional del kilogram, un artefacte fet de platí irídic. Aquest es va conservar al BIPM, i encara s'hi conserva, en les condicions especificades a la 1a CGPM de 1889 (CR, 34-38) quan va sancionar el prototip i va declarar: «Aquest prototip serà considerat, d'ara endavant, com la unitat de massa». Es van fabricar quaranta prototips similars a la mateixa època, i tots es van fabricar i polir perquè tinguessin la mateixa massa que el prototip internacional. A la 1a CGPM (1889), després del calibratge amb el prototip internacional, la majoria d'aquests *patrons nacionals* es van assignar individualment als estats membres de la Convenció del Metre i, alguns, al BIPM. La 3a CGPM (1901, CR, 70), en una declaració destinada a eliminar l'ambigüitat que existia en l'ús habitual respecte al significat del terme *pes*, va confirmar que «el kilogram és la unitat de massa; és igual a la massa del prototip

internacional del kilogram». La versió completa d'aquesta declaració es troba a la pàgina 70 de les actes de la CGPM mencionades anteriorment.

Després de la segona verificació dels prototips nacionals el 1946, es va constatar que, de mitjana, la massa d'aquests prototips divergia de la del prototip internacional. Això es va confirmar a la tercera verificació, efectuada de 1989 a 1991, amb una diferència mitjana de 25 micrograms, aproximadament, per al conjunt dels prototips originals sancionats a la 1a CGPM (1889). Per tal d'assegurar l'estabilitat de la unitat de massa a llarg termini, obtenir el màxim benefici dels patrons elèctrics quàntics i adaptar-se de la millor manera a la ciència moderna, la 26a CGPM (2018), a la Resolució 1, va decidir adoptar una nova definició per al kilogram basada en el valor d'una constant fonamental, la constant de Planck h .

Unitat d'intensitat de corrent elèctric, l'ampere

El Congrés Internacional per a l'Electricitat que es va celebrar a Chicago el 1893 va introduir les unitats elèctriques, anomenades *internacionals*, per al corrent i la resistència. La Conferència Internacional de Londres el 1908 va confirmar les definicions de l'*ampere internacional* i l'*ohm internacional*.

En el moment de la 8a CGPM (1933) hi havia un desig unànim de substituir les *unitats internacionals* per les unitats anomenades *absolutes*. Tot i això, com que alguns laboratoris encara no havien completat els experiments necessaris per a determinar les relacions entre les unitats internacionals i les unitats absolutes, la CGPM va donar autoritat al CIPM per a decidir, quan fos oportú, tant aquestes relacions com la data en què les noves unitats absolutes entrarien en vigor. El 1946, el CIPM va decidir (1946, Resolució 2, PV, **20**, 129-137) que les noves unitats entrarien en vigor l'1 de gener de 1948. L'octubre d'aquell mateix any, la 9a CGPM va aprovar les decisions preses pel CIPM. La definició de *ampere* que havia escollit el CIPM es basava en la força produïda entre dos conductors paral·lels pels quals circula un corrent elèctric i , consegüentment, fixava el valor de la permeabilitat magnètica del buit μ_0 (o constant magnètica). A conseqüència de la nova definició del metre adoptada el 1983, també es va fixar el valor de la permitivitat elèctrica del buit ϵ_0 (o constant elèctrica).

Tanmateix, la definició de l'ampere de 1948 va resultar difícil de realitzar i els patrons quàntics pràctics (basats en l'efecte Josephson i en l'efecte Hall quàntic), que relacionen tant el volt com l'ohm amb combinacions particulars de la constant de Planck h i de la càrrega elemental e , són els que es van fer servir d'una manera universal com a *mise en pratique* de l'ampere a través de la llei d'Ohm (CGPM, 1987, Resolució 6; CR, 100). A conseqüència d'això, va esdevenir natural fixar no només el valor numèric de h per a redefinir el kilogram, sinó també el valor numèric de e per a redefinir l'ampere de manera que els patrons elèctrics quàntics pràctics concordessin exactament amb el SI. La definició actual de l'ampere, basada en un valor numèric fixat per a la càrrega elemental, e , es va adoptar a la Resolució 1 de la 26a CGPM (2018).

Unitat de temperatura termodinàmica, el kelvin

La 10a CGPM va donar la definició de la unitat de temperatura termodinàmica (1954, Resolució 3; CR, 79) que va seleccionar el punt triple de l'aigua, T_{TPW} , com a punt fix fonamental, i li assignà la temperatura de 273,16 K per definició. La 13a CGPM (1967-1968, Resolució 3; CR, 104, i *Metrologia*, 1968, **4**, 43) va adoptar el nom de *kelvin*, amb símbol K, en lloc de *grau kelvin*, amb símbol °K, per a la unitat definida d'aquesta manera. Això no

obstant, les dificultats pràctiques lligades a la realització d'aquesta definició, que requereixen una mostra d'aigua pura de composició isotòpica ben definida, i el desenvolupament de nous mètodes primaris de termometria, van dur a l'adopció d'una nova definició del kelvin basada en un valor numèric fixat de la constant de Boltzmann, k . La 26a CGPM (2018) va adoptar, a la Resolució 1, la definició actual del kelvin, que elimina aquestes restriccions.

Unitat de quantitat de substància, el mol

Després del descobriment de les lleis fonamentals de la química, per a especificar quantitats d'elements o compostos químics es van fer servir unitats anomenades, per exemple, «àtom gram» i «molècula gram». Aquestes unitats estaven directament relacionades amb els «pesos atòmics» i els «pesos moleculars», que, de fet, són masses atòmiques i moleculars relatives. Els «pesos atòmics» van prendre com a referència, originàriament, el pes atòmic de l'oxigen, que, per conveni, era igual a 16. Mentre que els físics separaven els isòtops a l'espectròmetre de masses i atribuïen el valor 16 a un dels isòtops de l'oxigen, els químics van atribuir el mateix valor a la mescla (de composició lleugerament variable) dels isòtops 16, 17 i 18, que constitueix l'element natural oxigen. Un acord entre la Unió Internacional de Física Pura i Aplicada (IUPAP) i la Unió Internacional de Química Pura i Aplicada (IUPAC) va posar fi a aquesta dualitat el 1959-1960. Els físics i els químics van acordar atribuir el valor 12, exactament, al «pes atòmic» de l'isòtop 12 del carboni (carboni 12, ^{12}C) o, segons una formulació més correcta, a la massa atòmica relativa A_r de l'isòtop 12 del carboni. L'escala unificada que es va obtenir d'aquesta manera proporciona les masses atòmiques i moleculars relatives, també conegudes com a *pesos atòmics* i *moleculars*, respectivament. Aquest acord es mantingué en vigor fins a la redefinició del SI de 2018.

La magnitud que fan servir els químics per a especificar la quantitat d'elements o compostos químics s'anomena «quantitat de substància». La quantitat de substància, amb símbol n , es defineix com a proporcional al nombre d'entitats elementals N d'una mostra, en què la constant de proporcionalitat és una constant universal idèntica per a totes les entitats. La constant de proporcionalitat és la inversa de la constant d'Avogadro, N_A , de manera que $n = N/N_A$. La unitat de quantitat de substància s'anomena *mol*, amb símbol mol. Seguint les propostes de la IUPAP, de la IUPAC i de l'ISO, el CIPM va desenvolupar una definició del mol el 1967, que va confirmar el 1969, segons la qual la massa molar del carboni 12 havia de ser exactament 0,012 kg/mol. Això va permetre que la quantitat de substància $n_S(X)$ de qualsevol mostra pura S d'una entitat X es pogués determinar directament a partir de la massa de la mostra m_S i de la massa molar $M(X)$ de l'entitat X, determinant la massa molar a partir de la seva massa atòmica relativa A_r (pes atòmic o molecular) sense haver de conèixer d'una manera exacta la constant d'Avogadro, mitjançant les equacions

$$n_S(X) = m_S/M(X), \text{ i } M(X) = A_r(X) \text{ g/mol.}$$

Així, la definició del mol depenia de la definició del kilogram, basada en un artefacte.

En definir la constant d'Avogadro d'aquesta manera, el seu valor numèric era igual al nombre d'àtoms en 12 grams de carboni 12. Tot i això, a causa dels avenços recents en tecnologia, avui dia aquest nombre es coneix amb una precisió tal que ha permès una definició més simple i universal del mol, és a dir, una definició que especifica exactament el nombre d'entitats en un mol de qualsevol substància, fixant així el valor numèric de la constant d'Avogadro. Per tant, la nova definició del mol i del valor de la constant d'Avogadro ja no

depenen de la definició del kilogram. D'altra banda, això emfatitza la distinció entre les magnituds, fonamentalment diferents «quantitat de substància» i «massa». La 26a CGPM (2018) va adoptar la definició actual del mol basada en un valor numèric fixat de la constant d'Avogadro, N_A , a la Resolució 1.

Unitat d'intensitat lluminosa, la candela

Les unitats d'intensitat lluminosa basades en patrons de flama o de filaments incandescents, que es van fer servir a diversos països abans de 1948, es van substituir inicialment per la «bugia nova», basada en la luminància del radiador de Planck (cos negre) a la temperatura de congelació del platí. La Comissió Internacional d'Il·luminació (CIE) i el CIPM havien preparat aquesta modificació abans de 1937 i, el 1946, el CIPM la va promulgar. El 1948, la 9a CGPM la va ratificar i va adoptar un nom internacional nou per a aquesta unitat, la candela, amb símbol cd; el 1954, la 10a CGPM va establir la candela com a unitat bàsica, i el 1967, la 13a CGPM (Resolució 5; CR, 104, i *Metrologia*, 1968, **4**, 43-44) va modificar la forma d'aquesta definició.

El 1979, a causa de les dificultats lligades a la realització del radiador de Planck a temperatures elevades i a les noves possibilitats que ofería la radiometria, és a dir, el mesurament de la potència de radiació òptica, la 16a CGPM (1979, Resolució 3; CR, 100, i *Metrologia*, 1980, **16**, 56) va adoptar una definició nova de la candela.

La 26a CGPM (2018), a la Resolució 1, va adoptar la definició actual de la candela, que es basa en un valor numèric fixat de l'eficàcia lluminosa d'una radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz, K_{cd} .

Llista de les sigles usades en aquest volum

1 Sigles de laboratoris, comitès i conferències

BAAS	Associació Britànica per l'Avanç de la Ciència (British Association for the Advancement of Science)
BIPM	Oficina Internacional de Pesos i Mesures (Bureau International des Poids et Mesures)
CARICOM	Comunitat del Carib (Caribbean Community)
CCAUV	Comitè Consultiu per a l'Acústica, els Ultrasons i les Vibracions (Comité Consultatif de l'Acoustique, des Ultrasons et des Vibrations)
CCDS	Comitè Consultiu per a la Definició del Segon (Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde), vegeu CCTF
CCE	Comitè Consultiu d'Electricitat (Comité Consultatif d'Électricité), vegeu CCEM
CCEM	(antigament el CCE) Comitè Consultiu per a l'Electricitat i el Magnetisme (Comité Consultatif d'Électricité et Magnétisme)
CCL	Comitè Consultiu per a la Longitud (Comité Consultatif des Longueurs)
CCM	Comitè Consultiu per a la Massa i les Magnituds Relacionades (Comité Consultatif pour la Masse et les Grandeurs Apparentées)
CCPR	Comitè Consultiu per a la Fotometria i la Radiometria (Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie)
CCQM	Comitè Consultiu per a la Quantitat de Substància: Metrologia en Química i Biologia (Comité Consultatif pour la Quantité de Matière: Métrologie en Chimie et Biologie)
CCRI	Comitè Consultiu per a les Radiacions Ionitzants (Comité Consultatif des Rayonnements Ionisants)
CCT	Comitè Consultiu per a la Termometria (Comité Consultatif de Thermométrie)
CCTF	(antigament el CCDS) Comitè Consultiu per al Temps i les Freqüències (Comité Consultatif du Temps et des Fréquences)
CCU	Comitè Consultiu per a les Unitats (Comité Consultatif des Unités)
CGPM	Conferència General de Pesos i Mesures (Conférence Générale des Poids et Mesures)
CIPM	Comitè Internacional de Pesos i Mesures (Comité International des Poids et Mesures)
CODATA	Comitè de Dades per a la Ciència i la Tecnologia (Committee on Data for Science and Technology)
CR	<i>Comptes rendus</i> ('actes') de la Conferència General de Pesos i Mesures
IAU	Unió Astronòmica Internacional (International Astronomical Union), vegeu UAI
ICRP	Comissió Internacional de Protecció Radiològica (International Commission on Radiological Protection)
ICRU	Comissió Internacional de les Unitats i Mesures de Radiació (International Commission on Radiation Units and Measurements)

IEC	Comissió Electrotècnica Internacional (International Electrotechnical Commission)
IERS	Servei Internacional de Rotació de la Terra i Sistemes de Referència (International Earth Rotation and Reference Systems Service)
ISO	Organització Internacional per a la Normalització (International Organization for Standardization)
IUPAC	Unió Internacional de Química Pura i Aplicada (International Union of Pure and Applied Chemistry)
IUPAP	Unió Internacional de Física Pura i Aplicada (International Union of Pure and Applied Physics)
OIML	Organització Internacional de Metrologia Legal (Organisation Internationale de Métrologie Légale)
OMS	Organització Mundial de la Salut
PV	<i>Procès-verbaux</i> ('actes') del Comitè Internacional de Pesos i Mesures
SUNAMCO	Comissió per a Símbols, Unitats, Nomenclatura, Masses Atòmiques i Constants Fonamentals, IUPAP (Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants, IUPAP)
UAI	Unió Astronòmica Internacional (Union Astronomique Internationale)

2 Sigles de termes científics

CGS	sistema d'unitats coherents basat en les tres unitats mecàniques centímetre, gram i segon
EIPT-68	escala internacional pràctica de temperatura de 1968 (échelle internationale pratique de température de 1968)
EIT-90	escala internacional de temperatura de 1990 (échelle internationale de température de 1990)
EPT-76	escala provisional de temperatura de 1976 (échelle provisoire de température de 1976)
GUM	<i>Guia per a l'expressió de la incertesa de mesura (Guide to the expression of uncertainty in measurement)</i>
IPTS-68	escala internacional pràctica de temperatura de 1968 (international practical temperature scale of 1968), vegeu EIPT-68
ITS-90	escala internacional de temperatura de 1990 (international temperature scale of 1990), vegeu EIT-90
MKS	sistema d'unitats basat en les tres unitats mecàniques metre, kilogram i segon
MKSA	sistema d'unitats quadridimensional basat en el metre, el kilogram, el segon i l'ampere
SI	sistema internacional d'unitats (système international d'unités)
TAI	temps atòmic internacional (temps atomique international)
TCG	temps-coordenada geocèntric (temps-coordonnée géocentrique)
TT	temps terrestre
UTC	temps universal coordinat
VSMOW	aigua oceànica mitjana normalitzada de Viena (Vienna standard mean ocean water)

Índex

A

acceleració de la gravetat (g_n) 32, 48
 activitat d'un radionúclid 26, 27
 aigua, composició isotòpica 58, 76, 80, 83, 106
 ampere (A) 13, 16, 18, 20, 28, 44, 49, 51, 52, 54, 55, 71, 81, 82-86, 88, 91-94, 99, 101-103, 105
 angle 25, 26, 32, 36-39, 48, 55, 65
 atmosfera estàndard 52
 àtom de cesi, nivells hiperfins 15, 17, 18, 56, 58, 83, 84, 91, 93, 99, 100, 104
 àtom gram 106

B

balança de watt / de Kibble 83, 100
 bar 51
 becquerel (Bq) 26, 29, 57, 63
 bel (B) 32, 33
 British Association for the Advancement of Science (BAAS) 102

C

càlcul formal 35
 caloria 50, 51
 candela (cd) 13, 16, 18, 22, 23, 29, 48, 51, 52, 54, 59, 63, 64, 71, 80, 82-85, 91-93, 99, 101, 103, 105
 capacitat calorífica 28, 35
 carboni 12 22, 62, 85, 92, 106
 càrrega elèctrica 26, 28
 CGS 50, 102, 110
 CODATA *vegeu* Comitè de Dades per a la Ciència i la Tecnologia
 Comitè de Dades per a la Ciència i la Tecnologia 33, 84-86, 88
 constant
 d'Avogadro 15-17, 21, 22, 81, 83, 84, 88, 91, 93, 103, 106, 107
 d'estructura fina 17, 85, 92, 101

de Boltzmann 15-17, 20, 81, 83, 84, 88, 91, 93, 100, 103, 106
 de Josephson (K_J , K_{J-90}) 68, 83, 85, 92
 de Planck 10, 15-17, 19, 81, 83, 84, 88, 91, 93, 100, 103, 105, 107
 de Von Klitzing (R_K , R_{K-90}) 69, 83, 85, 92
 fonamental (de la física) 10, 15, 16, 71, 73, 81, 83, 84, 86, 91, 103, 105
 magnètica, permeabilitat del buit 20, 85, 92, 105
 que defineix el SI 10, 14-16, 23, 25, 103

continuitat 11, 16, 41, 64, 69
 Convenció del Metre 5-7, 10, 13, 47, 50, 53, 101, 102
 corrent elèctric 18, 20, 24, 28, 49, 52, 54, 84, 88, 93, 99-102, 105
 coulomb (C) 16, 26, 49, 51, 55, 83, 84, 91
 curie (Ci) 57

D

dalton (Da) 32, 33
 decibel (dB) 32, 33
 definició de la constant explícita 100
 definició de la unitat explícita 99, 100
 dia (d) 32
 dimensió (d'una magnitud) 24, 29
 dina (dyn) 51, 52
 dosi absorbida 26, 28-30, 63, 64, 67, 74
 dosi equivalent *vegeu* sievert

E

efecte
 Hall (inclou l'efecte Hall quàntic) 67, 69, 83, 85, 92, 100, 105
 Josephson 67, 68, 83, 85, 92, 100, 105
 EIT-90 *vegeu* escala internacional de temperatura de 1990

electró-volt (eV) 32, 33
 erg 51
 escala de temperatura termodinàmica
 17, 21, 100
 escala internacional de temperatura
 de 1990 21, 69, 70
 escotòpica *vegeu* visió escotòpica
 estereoradian (sr) 23, 25-27, 38, 39, 48,
 55, 65, 70, 71

F

farad (F) 26, 49, 51
 fotòpica *vegeu* visió fotòpica
 freqüència del cesi 17, 18, 93, 100

G

gal (Gal) 32
 Gauss 102
 Giorgi 102
 gram 51, 58, 102
 grau Celsius (°C) 21, 26, 27, 29, 35, 36,
 50, 51
 grau kelvin 52, 54, 58, 105
 gray (Gy) 26, 29, 63, 67, 74

H

hectàrea (ha) 32
 henry (H) 20, 26, 49, 51, 55
 hertz (Hz) 16, 26, 29, 51, 55, 84, 91
 hora (h) 32, 51

I

iarda 33
 incertesa 15, 16, 18-22, 37
 intensitat lluminosa 18, 22-24, 45, 101,
 103, 107
 ISO 34, 103
 ISO/TC 12 65
 sèrie ISO/IEC 80000 14, 17, 29, 35
 IUPAC 35, 103, 106; llibre verd 35
 IUPAP 103, 106
 IUPAP SUNAMCO; llibre vermell 35

J

joule (J) 16, 17, 26, 29, 49, 50, 55, 83,
 84, 91

K

katal (kat) 26, 71, 72
 kelvin (K) 13, 16-18, 20, 21, 27, 49,
 52, 58, 59, 69, 76, 80, 81, 83-86, 88,
 90-93, 99, 100, 101, 103, 105, 106
 kilogram 13, 18, 19, 31, 47, 48, 52, 54,
 71, 80-86, 88, 90, 91-93, 99-107
 múltiples i submúltiples 31, 57, 58
 prototip internacional 13, 47, 48,
 80-85, 92, 104, 105

L

legislació sobre les unitats 14, 48
 litre (L, l) 32, 34, 46
 longitud 6, 15, 18, 19, 24, 32, 38, 39,
 42, 99, 100, 102, 104
 lumen (lm) 16, 29, 48, 51, 55, 91;
 nou lumen 48
 lux (lx) 26, 29, 51, 55

M

magnituds 15
 adimensionals 65
 bàsiques 17, 18, 24, 28, 101
 de recompte 24, 38
 derivades 22, 24-28
 fotobiològiques 29, 97
 fotoquímiques 29, 97
 logarítmiques 33
 normes d'escriptura 35-39
 símbols (recomanats) 24, 35-39
 valor numèric 35-38
 massa 18, 19, 24, 32, 36, 37, 43, 99-
 102, 104, 105
 massa de l'electró 101
 massa i pes 48
 massa molar 22, 85, 92, 106
 Maxwell 102
 mesòpica *vegeu* visió mesòpica
 metre (m) 13, 14, 16, 18, 19, 47-49, 51-
 54, 66, 72, 73, 75, 77-79, 82, 84-87,
 89, 91-93, 99-104
 prototip internacional 47, 48, 53,
 102, 104
 minut (min) 32, 36
 MKS 49, 50, 102
 MKSA 103

mol (mol) 16-18, 21, 22, 54, 62, 81-85,
90-93, 99, 101, 103, 106, 107
molècula gram 106
múltiples del kilogram 31, 57, 58
múltiples i submúltiples, prefixos 25,
27, 31, 54, 57, 60, 63, 70, 72

N

neper (Np) 32, 33
newton (N) 20, 26, 49, 51, 55
nombre d'Avogadro 21, 93
notes històriques 99-107

O

ohm (Ω) 26, 49, 51, 55, 61, 67, 69, 92,
102, 105
OIML *vegeu* Organització Internacional
de Metrologia Legal
OMS *vegeu* Organització Mundial de la
Salut
Organització Internacional de Metrologia
Legal 14, 86, 89
Organització Mundial de la Salut 30

P

pascal (Pa) 26, 61
peu 33
pes *vegeu* massa
pes atòmic 106
pes molecular 106
poise (P) 51
polzada 33
ppb 38
ppm 38
ppt 38
prefixos SI 25, 27, 31-35, 38, 46, 54,
57, 60, 63, 70, 72, 101-103
punt triple de l'aigua 13, 21, 49, 50, 52,
59, 76, 80, 85, 92, 99, 100, 105

Q

quantitat de calor *vegeu* joule
quantitat de substància 17, 18, 21, 22,
24, 38, 45, 101, 103, 106, 107
química clínica 22, 71

R

radiació ionitzant 29, 30, 63, 64, 67, 74
radiació monocromàtica 15-17, 22, 23,
64, 83, 85, 93, 107
radian (rad) 28, 29, 38, 39, 65, 70
relativitat general 30, 73

S

segon 10, 18, 19, 23, 32, 34, 51-54, 56,
58, 61, 78, 82, 84, 86-93, 99-104
segon d'arc 32
separador decimal 12, 37, 75, 76
SI *vegeu* sistema internacional d'unitats
siemens (S) 26, 61
sievert (Sv) 26, 27, 29, 64, 67, 74
símbols
de les magnituds 18, 24
escriptura i ús de 34-39
unitats 12, 18, 34
unitats (obligatòries) 18, 34
unitats derivades amb denominacions
especials 26-29
sistema
internacional d'unitats 10, 11, 13-17,
42; creació 42, 99-107
mètric decimal 102
stilb (sb) 51

T

TAI *vegeu* temps atòmic internacional
temperatura
Celsius 21, 26, 27, 36
termodinàmica 18, 20, 21, 24, 44,
99-101, 103, 105
temps
atòmic internacional 61, 62
durada 18, 24, 32, 37, 43, 101, 102,
104
universal coordinat 62
tesla (T) 26, 55
Thomson 102
tona 32, 51; mètrica 32

U

unitat(s)
absolutes 105

amb denominacions i símbols
especials 28, 29, 61, 64, 67, 71, 72
astronòmica 32
bàsiques 13, 14, 17, 18-23, 25-27,
52-54, 60, 65, 70-72, 80, 82, 91, 99-
104; definicions 17-30
de magnituds biològiques 28-30
derivades 13, 14, 17, 25-29, 39, 45
derivades coherents 20, 25-29
elèctriques 10, 44, 102, 105
fotomètriques 48, 59
internacionals OMS 30
múltiples i submúltiples de 25, 27,
31, 54, 57, 60, 63, 70, 72
noms 34
normes d'escriptura 34
pràctiques 102
que no pertanyen al SI 32, 33
realització 10, 11, 13, 14, 16, 23, 30
SI 17-30, 72
símbols 34, 36, 51
suplementàries 38, 39, 55, 60, 65,
70, 71, 101, 103
UTC *vegeu* temps universal coordinat

V

velocitat de la llum en el buit 10, 13-17,
19, 62, 66, 72, 82-84, 91, 93, 99, 100,
103, 104
verificació del kilogram 105
viscositat
 cinemàtica (stokes) 55
 dinàmica (poise) 28, 55
visió
 escotòpica 64
 fotòpica 64
 mesòpica 64
volt (V) 26, 49, 51, 55, 67-69, 85, 92,
102, 105
Von Klitzing *vegeu* constant de

W

watt (W) 16, 26, 49, 55, 83, 84, 91
Weber 102
weber (Wb) 26, 49, 55

X

xifres en grups de tres 37, 51, 76



Institut
d'Estudis
Catalans



Societat
Catalana
de Física