

O Sistema Internacional de Unidades (SI)

CITAÇÃO

Magalhães, C. (2021)
O Sistema Internacional de Unidades (SI),
Rev. Ciência Elem., V9(01):003.
doi.org/10.24927/rce2021.003

EDITOR

José Ferreira Gomes,
Universidade do Porto

EDITOR CONVIDADO

Jorge Manuel Canhoto
Universidade de Coimbra

RECEBIDO EM

16 de novembro de 2020

ACEITE EM

20 de novembro de 2020

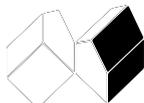
PUBLICADO EM

25 de fevereiro de 2021

COPYRIGHT

© Casa das Ciências 2021.
Este artigo é de acesso livre, distribuído sob licença Creative Commons com a designação [CC-BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), que permite a utilização e a partilha para fins não comerciais, desde que citado o autor e a fonte original do artigo.

rce.casadasciencias.org



Clara Magalhães

UNSW Sydney/ IUPAC/ CICECO/ Universidade de Aveiro

As definições das unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) assentam em sete unidades de base para as quais há novas definições para a unidade de base da massa, o quilograma, e a unidade de base da quantidade de matéria, a mole, que passaram a vigorar internacionalmente a partir de 20 de maio de 2019¹. A tradução portuguesa oficial foi fixada pelo Decreto-Lei nº 76/2020 de 25 de setembro².



As novas definições das unidades de base (unidades fundamentais), pretendem criar um sistema coerente que assenta nos valores exatos de sete constantes universais que são, por definição, invariáveis e imutáveis. Os valores exatos das constantes universais fixados em acordo com os valores, anteriormente, determinados experimentalmente em diversos laboratórios internacionais de metrologia através das melhores técnicas disponíveis, foram definidos pelo Comité de Dados para a Ciência e Tecnologia (CODATA) e adotados pela 26ª reunião da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), que se reuniu em Versailles de 13 a 16 de novembro de 2018^{1,2}.

Na TABELA 1 apresentam-se as sete constantes universais, os respetivos símbolos, os valores fixados como exatos, pelo que não têm qualquer incerteza associada, e a respetiva unidade².

TABELA 1. Constantes universais, respetivos símbolos, valores numéricos exatos e unidades.

Constante Universal	Símbolo	Valor numérico	Unidade
Frequência da transição hiperfina do estado fundamental do átomo de ^{133}Cs não perturbado	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
Velocidade da luz no vazio	c	299 792 458	m s^{-1}
Constante de Planck	h	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
Carga elementar	e	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
Constante de Boltzmann	k	$1,380\,649 \times 10^{-23}$	J K^{-1}
Constante de Avogadro	N_{A}	$6,022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
Eficácia luminosa	K_{cd}	683	lm W^{-1}

Estas constantes universais foram escolhidas de modo a que cada unidade de base possa ser definida a partir dessas constantes ou a partir de produtos ou quocientes dessas constantes. Entre as unidades hertz (Hz), joule (J), coulomb (C), lúmen (lm) e watt (W) e as unidades segundo (s), metro (m), quilograma (kg), ampere (A), kelvin (K), mole (mol) e candela (cd) existem as relações seguintes:

$$\begin{aligned} \text{Hz} &= \text{s}^{-1} & \text{J} &= \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} & \text{C} &= \text{A s} \\ \text{lm} &= \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr} & (\text{sr} &= \text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{ é o esterradiano}) & \text{W} &= \text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \end{aligned}$$

Na TABELA 2 apresentam-se as sete grandezas fundamentais, respetivas unidades de base, símbolos das unidades e as constantes universais a partir das quais se define diretamente a respetiva unidade de base.^{1,2}

TABELA 2. Grandezas fundamentais (símbolos das grandezas), suas unidades de base, símbolos das unidades e constantes universais com que se definem as unidades de base.

Grandeza (símbolo)	Unidade	Símbolo	Constante universal
Tempo (t)	segundo	s	frequência da transição hiperfina do átomo de ^{133}Cs
Comprimento (L, r, \dots)	metro	m	velocidade da luz no vazio
Massa (m)	quilograma	kg	constante de Planck
Corrente elétrica (I, i)	ampere	A	carga elementar
Temperatura termodinâmica (T)	kelvin	K	constante de Boltzmann
Quantidade de matéria (n)	mole	mol	constante de Avogadro
Intensidade luminosa (I_v)	candela	cd	eficácia luminosa

Definições das unidades de base

Todas as definições estão redigidas com um formato semelhante – primeiro indica-se para cada grandeza física qual a unidade de base e respetivo símbolo. Numa outra frase define-se a relação entre a unidade de base e a constante universal com a qual se relaciona e como se relaciona. Como se pode ver pelo texto há uma certa ordenação na definição das unidades das várias grandezas, uma vez que algumas delas necessitam de mais do que uma constante universal para a sua definição.

Unidade de tempo

O segundo, símbolo s, é a unidade de tempo do SI. Define-se tomando o valor numérico fixado da frequência do cézio, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, a frequência da transição hiperfina do estado fundamental do átomo de cézio-133 não perturbado, igual a 9 192 631 770, quando expressa na unidade hertz, que é igual a s^{-1} .



Esta definição implica a relação exata:

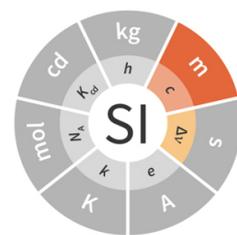
$$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz ou } \Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$$

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

Um segundo é o tempo que demoram 9 192 631 770 períodos da radiação resultante da transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo ^{133}Cs não perturbado.³

Unidade de comprimento

O metro, símbolo m, é a unidade de comprimento do SI. Define-se tomando o valor numérico fixado da velocidade da luz no vácuo, c , igual a 299 792 458, quando expressa na unidade m s^{-1} , sendo o segundo definido em função de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



Esta definição implica a relação exata:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

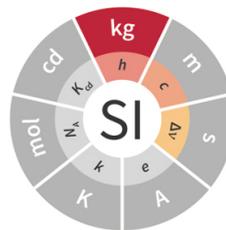
$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} = 30,663\,319\,0 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

Um metro é o comprimento percorrido pela luz no vácuo no intervalo de tempo de $1 / 299\,792\,458$ do segundo.³

Unidade de massa

O quilograma, símbolo kg, é a unidade de massa do SI. Define-se tomando o valor numérico fixado da constante de Planck, h , igual a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$, quando expressa na unidade J s , que é igual a $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, sendo o metro e o segundo definidos, respetivamente,

em função de c e $\Delta\nu_{Cs}$.



Esta definição implica a relação exata:

$$h = 6,626\,070 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

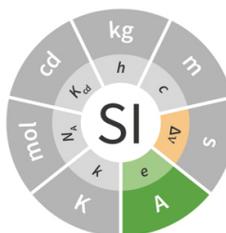
$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ kg} &= \frac{(299\,792\,458)^2 (9\,192\,631\,770)}{(9\,192\,631\,770)^2 (6,626\,070\,15 \times 10^{-34})} \frac{(\Delta\nu_{Cs})^2 h}{\Delta\nu_{Cs} c^2} = \\ &= \frac{(299\,792\,458)^2}{(9\,192\,631\,770) (6,626\,070\,15 \times 10^{-34})} \frac{(\Delta\nu_{Cs}) h}{c^2} \\ 1 \text{ kg} &= 1,475\,521\,40 \times 10^{40} \frac{(\Delta\nu_{Cs}) h}{c^2} \end{aligned}$$

A definição de quilograma só é possível em função da constante de Planck.³

Unidade de corrente elétrica

O ampere, símbolo A, é a unidade de corrente elétrica do SI. Define-se tomando o valor numérico fixado da carga elementar, e , igual a $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, quando expressa na unidade C, que é igual a A s, sendo o segundo definido em função de $\Delta\nu_{Cs}$.



Esta definição implica a relação exata:

$$e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ A s}$$

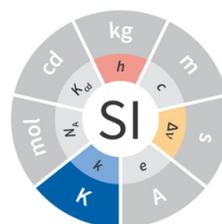
$$1 \text{ A} = \left(\frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ A} &= \frac{1}{(1,602\,176\,634 \times 10^{-19}) (9\,192\,631\,770)} \Delta\nu_{Cs} e = \\ &= 6,789\,686\,817 \times 10^8 \Delta\nu_{Cs} e \end{aligned}$$

Um ampere é a corrente elétrica correspondente ao fluxo de $1 / (1,602\,176\,634 \times 10^{-19})$ cargas elementares por segundo.³

Unidade de temperatura termodinâmica

O kelvin, símbolo K, é a unidade de temperatura termodinâmica do SI. Define-se tomando o valor numérico fixado da constante de Boltzmann, k , igual a $1,380\,649 \times 10^{-23}$, quando expressa na unidade J K^{-1} , que é igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, sendo o quilograma, o metro e o segundo definidos, respetivamente, em função de h , c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



Esta definição implica a relação exata:

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

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

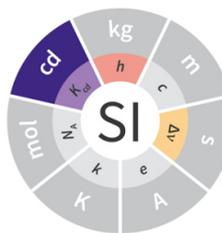
$$1 \text{ K} = \frac{1,380\,649 \times 10^{-23}}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}$$

$$= 2,266\,665 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}$$

Um kelvin é igual à variação da temperatura termodinâmica que resulta da variação de $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}$ na energia térmica kT .³

Unidade de intensidade luminosa

A candela, símbolo cd, é a unidade de intensidade luminosa do SI numa dada direção. Define-se tomando o valor numérico fixado da eficácia luminosa de uma radiação monocromática de frequência $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$, K_{cd} , igual a 683, quando expressa na unidade lm W^{-1} , que é igual a cd sr W^{-1} ou $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$, sendo o quilograma, o metro e o segundo definidos, respetivamente, em função de h , c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



Esta definição implica a relação exata:

$$K_{\text{cd}} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$$

para a radiação monocromática com a frequência $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$.

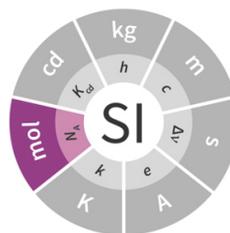
$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{\text{cd}}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$
$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)^2 683} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}} =$$
$$= 2,614\,830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}$$

Uma candela é a intensidade luminosa, numa dada direção, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz e cuja intensidade energética nessa direção é $1/683$ W/sr.³

Unidade de quantidade de matéria

A mole, símbolo mol, é a unidade de quantidade de matéria do SI. Uma mole contém exatamente $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entidades elementares. Este número é o valor numérico fixado da constante de Avogadro, N_A , quando expressa em mol^{-1} e é designado por “número de Avogadro”.

A quantidade de matéria, símbolo n , de um sistema é uma representação do número de entidades elementares especificadas. Uma entidade elementar pode ser um átomo, uma molécula, um ião, um eletrão, ou qualquer outra partícula ou agrupamento especificado de partículas.



Esta definição implica a relação exata:

$$N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$1 \text{ mol} = \frac{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A}$$

Uma mole é a quantidade de matéria de um sistema que contém $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ das entidades elementares especificadas.³

NOTA

O Decreto-Lei nº 76/2020 de 25 de setembro utiliza as denominações quantidade de matéria para quantidade de substância e eficácia luminosa para eficiência luminosa.

REFERÊNCIAS

¹ BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (BIPM), *Le Système international d'unités/The International System of Units*, BIPM, Sèvres, France, 9, 216 p. 2019. (consultado em 12 de fevereiro de 2021)

² DIÁRIO DA REPÚBLICA, Decreto-Lei nº 76/2020, 1ª Série, nº 188, 12-21.

³ BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (BIPM), *Les unités de mesure: Le SI*. (consultado em 12 de fevereiro de 2021)