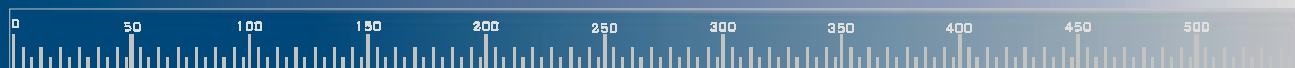


# SI SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES



S

m

mol/m<sup>3</sup>

A

Pa

kg/m<sup>3</sup>

cd

K

kg

mol

A/m<sup>2</sup>



# **SI** Sistema Internacional de Unidades

**INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA,  
NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL**

**Ministro Luiz Fernando Furlan**  
Ministério do Desenvolvimento,  
Indústria e Comércio Exterior - MDIC

**Armando Mariante Carvalho**  
Presidente do INMETRO

**João Alziro Herz da Jornada**  
Diretor de Metrologia Científica e Industrial

**Roberto Luiz de Lima Guimarães**  
Diretor de Metrologia Legal

**Alfredo Carlos Orphão Lobo**  
Diretor de Qualidade

**Joseph Brais**  
Diretor de Administração e Finanças

Ricardo de Oliveira  
Coordenador-Geral de Planejamento

Elizabeth Cavalcanti  
Coordenadora-Geral de Credenciamento

Paulo Ferracioli  
Coordenador-Geral de Articulações Internacionais



# SI Sistema Internacional de Unidades

8ª edição  
Rio de Janeiro  
2003

© 2003. INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

NOTA DO AUTOR

Este documento é uma tradução da 7ª edição do original francês "Le Système International d'Unités", elaborada pelo Bureau International des Poids et Mesures - BIPM.

Ficha Catalográfica

---

INMETRO. SISTEMA Internacional de Unidades -  
SI. 8. ed. Rio de Janeiro, 2003. 116 p.

ISBN 85-87-87090-85-2

METROLOGIA

CDU: 006.915.1

---

INMETRO  
Instituto Nacional de  
Metrologia,  
Normalização e  
Qualidade Industrial

Av. N. S. das Graças, 50 –  
Vila Operária  
25250-020  
Duque de Caxias – RJ  
Tel.: (21) 2679-9001  
Fax: (21) 2679-1409

# SUMÁRIO

## APRESENTAÇÃO

<b>Sistema Internacional de Unidades (SI)</b> .....	11
---	----

## 1 Introdução

1.1 Histórico .....	15
1.2 As duas classes de unidades SI .....	17
1.3 Os prefixos SI .....	18
1.4 Sistema de grandezas .....	19
1.5 As unidades SI no quadro da relatividade geral .....	19
1.6 Legislações sobre as unidades .....	20

## 2 Unidades SI

2.1 Unidades SI de base .....	21
2.1.1 Definições .....	21
2.1.1.1 Unidade de comprimento (metro) .....	21
2.1.1.2 Unidade de massa (quilograma) .....	21
2.1.1.3 Unidade de tempo (segundo) .....	22
2.1.1.4 Unidade de corrente elétrica (ampère) .....	22
2.1.1.5 Unidade de temperatura termodinâmica (kelvin) .....	23
2.1.1.6 Unidade de quantidade de matéria (mol) .....	24
2.1.1.7 Unidade de intensidade luminosa (candela) .....	25
2.1.2 Símbolos das unidades de base .....	25
2.2 Unidades SI derivadas .....	25
2.2.1 Unidades expressas a partir de unidades de base .....	26
2.2.2 Unidades possuidoras de nomes especiais e símbolos particulares; unidades utilizando unidades possuidoras de nomes especiais e símbolos particulares .....	26
2.2.3 Unidades de grandezas sem dimensão, grandezas de dimensão um .....	30

## 3 Múltiplos e submúltiplos decimais das unidades SI

3.1 Prefixos SI .....	31
3.2 O quilograma .....	32

<b>4 Unidades fora do SI</b>	
4.1 Unidades em uso com o SI .....	33
4.2 Outras unidades fora do SI .....	35
<b>5 Regras para escrita de nomes e símbolos de unidades SI</b>	
5.1 Princípios gerais .....	39
5.2 Símbolos das unidades SI .....	39
5.3 Expressão algébrica dos símbolos das unidades SI .....	39
5.4 Regras para emprego dos prefixos SI .....	40
<b>Anexos</b>	
<b>Anexo1 – Decisões da Conferência Geral e do Comitê Internacional de Pesos e Medidas .....</b>	<b>43</b>
<b>1 Decisões relativas ao estabelecimento do Sistema Internacional de Unidades (SI)</b>	
1.1 Sistema prático de unidades: estabelecimento do SI .....	45
1.2 O SI .....	46
<b>2 Decisões relativas às unidades de base do Sistema Internacional</b>	
2.1 Comprimento .....	51
2.2 Massa .....	55
2.3 Tempo .....	56
2.4 Corrente elétrica .....	61
2.5 Temperatura termodinâmica .....	62
2.6 Quantidade de matéria .....	65
2.7 Intensidade luminosa .....	66
<b>3 Decisões relativas às unidades SI derivadas e suplementares</b>	
3.1 Unidades SI derivadas .....	69
3.2 Unidades SI suplementares .....	72
<b>4 Decisões relativas à terminologia e às unidades em uso com o SI</b>	
4.1 Prefixos SI .....	75
4.2 Símbolos de unidades e dos números .....	76
4.3 Nomes de unidades .....	77
4.4 Unidades em uso com o SI; exemplo: o litro .....	78

<b>Anexo 2 – Realização Prática das Definições das Principais Unidades .....</b>	<b>81</b>
<b>1 Comprimento .....</b>	<b>83</b>
<b>2 Massa .....</b>	<b>95</b>
<b>3 Tempo .....</b>	<b>97</b>
<b>4 Grandezas elétricas .....</b>	<b>101</b>
<b>5 Temperatura .....</b>	<b>107</b>
<b>6 Quantidade de matéria .....</b>	<b>111</b>
<b>7 Grandezas fotométricas .....</b>	<b>113</b>





# Apresentação

O desenvolvimento e a consolidação da cultura metrológica vem se constituindo em uma estratégia permanente das organizações, uma vez que resulta em ganhos de produtividade, qualidade dos produtos e serviços, redução de custos e eliminação de desperdícios. A construção de um senso de cultura metrológica não é tarefa simples, requer ações duradouras de longo prazo e depende não apenas de treinamentos especializados, mas de uma ampla difusão dos valores da qualidade em toda a sociedade.

Ciente dessa responsabilidade o Inmetro lança mais uma edição da brochura “SI - Sistema Internacional de Unidades” com firme propósito de difundir o conhecimento metrológico através da disseminação de literatura especializada, tornando mais acessíveis conceitos e informações básicas para um público especializado bem como para toda a sociedade.

Armando Mariante Carvalho  
Presidente do Inmetro



# Sistema Internacional de Unidades (SI)

## O BIPM e a Convenção do Metro

O Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) foi criado pela Convenção do Metro, assinada em Paris em 20 de maio de 1875 por 17 Estados, por ocasião da última sessão da Conferência Diplomática do Metro. Esta Convenção foi modificada em 1921.

O Bureau Internacional tem sua sede perto de Paris, nos domínios do Pavilhão Breteuil (43.520 m<sup>2</sup>) (Parque de Saint-Cloud), posto à sua disposição pelo governo francês; e sua manutenção no que se refere às despesas é assegurada pelos Estados Membros da Convenção do Metro.<sup>(1)</sup>

O Bureau Internacional, que tem por missão assegurar a unificação mundial das medidas físicas, é encarregado:

- de estabelecer os padrões fundamentais e as escalas das principais grandezas físicas, e de conservar os protótipos internacionais;
- de efetuar a comparação dos padrões nacionais e internacionais;
- de assegurar a coordenação das técnicas de medidas correspondentes;
- de efetuar e de coordenar as determinações relativas às constantes físicas que intervêm naquelas atividades.

O Bureau Internacional funciona sob a fiscalização exclusiva do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), sob autoridade da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM).

A Conferência Geral é formada de delegados de todos os Estados Membros da Convenção do Metro e reúne-se, atualmente, de quatro em quatro anos. Ela recebe em cada uma de suas sessões o Relatório do Comitê Internacional sobre os trabalhos executados, e tem por missão:

- discutir e provocar as medidas necessárias para assegurar a propagação e o aperfeiçoamento do Sistema Internacional de Unidades (SI), forma moderna do Sistema Métrico;

---

(1) Em 31 de dezembro de 1997, 48 Estados eram membros desta Convenção: África do Sul, Alemanha, Argentina, Austrália, Áustria, Bélgica, Brasil, Bulgária, Camarões, Canadá, Chile, China, Coreia (República da), Coreia (República Popular Democrática da), Dinamarca, Dominicana (República), Egito, Espanha, Estados Unidos, Eslováquia, Finlândia, França, Holanda, Hungria, Índia, Indonésia, Irã (Rep. Islâmica), Irlanda, Israel, Itália, Japão, México, Noruega, Nova Zelândia, Paquistão, Polônia, Portugal, Reino Unido, Romênia, Rússia (Federação), Cingapura, Suécia, Suíça, Tcheca (Rep.), Tailândia, Turquia, Uruguai e Venezuela.

- sancionar os resultados das novas determinações metroológicas fundamentais e as diversas resoluções científicas de cunho internacional;
- adotar as decisões importantes concernentes à organização e ao desenvolvimento do Bureau Internacional.

O Comitê Internacional é composto de 18 membros pertencentes a Estados diferentes, reunindo-se atualmente todos os anos. A mesa dirigente deste Comitê (composta pelo Presidente, Vice-Presidente e Secretário) envia aos governos dos Estados Membros da Convenção do Metro um Relatório Anual sobre a situação administrativa e financeira do Bureau Internacional. A principal missão do Comitê Internacional é garantir a unificação mundial das unidades de medidas, tratando diretamente ou submetendo propostas à Conferência Geral.

Limitadas, inicialmente, às medidas de comprimento e de massa e aos estudos metroológicos relacionados com essas grandezas, as atividades do Bureau Internacional foram estendidas aos padrões de medidas elétricas (1927), fotométricas (1937), radiações ionizantes (1960) e às escalas de tempos (1988).

Para este fim, em 1929 teve lugar uma expansão dos primeiros laboratórios construídos em 1876-78. Dois novos edifícios foram construídos em 1963-64, para os laboratórios da Seção de Radiações Ionizantes, e em 1984 para os trabalhos sobre lasers. Em 1988, foi inaugurado um prédio para biblioteca e escritórios.

Aproximadamente 45 físicos e técnicos trabalham nos laboratórios do Bureau Internacional; fazem pesquisas metroológicas, principalmente, e comparações internacionais das realizações das unidades e verificações de padrões. Esses trabalhos são objeto de um relatório anual detalhado, que é publicado como *procès-verbaux* das sessões do Comitê Internacional.

Diante da extensão das tarefas confiadas ao BIPM, em 1927, o Comitê Internacional instituiu os Comitês Consultivos, órgãos destinados a esclarecer as questões que ele submete a seu exame. Os Comitês Consultivos, que podem criar “Grupos de Trabalho” temporários ou permanentes para o estudo de assuntos particulares, são encarregados de coordenar os trabalhos internacionais efetuados nos seus domínios respectivos, e de propor ao Comitê Internacional as recomendações concernentes às unidades.

Os Comitês Consultivos têm um regulamento comum (PV, 1963, 31, 97). Cada Comitê Consultivo, cuja presidência é geralmente confiada a um membro do Comitê Internacional, é composto por um delegado dos grandes laboratórios de metrologia e dos institutos especializados, cuja lista é estabelecida pelo Comitê Internacional, bem como por membros individuais designados igualmente

pelo Comitê Internacional e por um representante do Bureau Internacional. Estes Comitês, que têm suas sessões com intervalos regulares, são atualmente em número de nove:

1 - Comitê Consultivo de Eletricidade (CCE), criado em 1927.

2 - Comitê Consultivo de Fotometria e Radiometria (CCPR), novo nome dado em 1971 ao Comitê Consultivo de Fotometria (CCP), criado em 1933 (de 1930 a 1933, as questões eram tratadas pelo Comitê precedente, CCE).

3 - Comitê Consultivo de Termometria (CCT), antes denominado Comitê Consultivo de Termometria e Calorimetria (CCTC), criado em 1937.

4 - Comitê Consultivo para a Definição do Metro (CCDM), criado em 1952.

5 - Comitê Consultivo para a Definição do Segundo (CCDS), criado em 1956.

6 - Comitê Consultivo para os Padrões de Medida das Radiações Ionizantes (CCEMR), criado em 1958. Em 1969, este Comitê Consultivo instituiu quatro seções: Seção I (Raios X e  $\gamma$ , Elétrons), Seção II (Medida dos Radionuclídeos), Seção III (Medidas Neutrônicas), Seção IV (Padrões de Energia  $\alpha$ ), sendo que esta última Seção foi dissolvida em 1975 e seu domínio de atividade confiado à Seção II.

7 - Comitê Consultivo das Unidades (CCU), criado em 1964 (este Comitê Consultivo substituiu a “Comissão do Sistema de Unidades”, instituída pelo CIPM em 1954).

8 - Comitê Consultivo para as Massas e as grandezas aparentes (CCM), criado em 1980.

9 - Comitê Consultivo para a quantidade de matéria, criado em 1993.

Os trabalhos da Conferência Geral, do Comitê Internacional, dos Comitês Consultivos e do Bureau Internacional são publicados sob os cuidados deste último nas seguintes coleções ou séries:

- *Comptes-Rendus* das sessões da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CR);
- *Procès-verbaux* das sessões do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (PV);
- Sessões dos Comitês Consultivos.

O Bureau Internacional publica, também, monografias sobre assuntos particulares da metrologia e, sob o título *O Sistema Internacional de Unidades (SI)*, esta brochura, revisada periodicamente, reunindo todas as decisões e recomendações relativas às unidades.

A coleção dos trabalhos e memórias do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (22 tomos publicados de 1881 a 1966) foi suspensa em 1966 por decisão do Comitê Internacional, bem como o *recueil* dos trabalhos do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (11 volumes publicados de 1966 a 1988).

Os trabalhos do Bureau Internacional são publicados em revistas científicas; uma lista é fornecida anualmente nos *procès-verbaux* do Comitê Internacional.

Após 1965 o periódico *Metrologia*, editado sob os auspícios do Comitê Internacional de Pesos e Medidas, passou a publicar artigos sobre os principais trabalhos de metrologia científica efetuados no mundo, sobre melhoramentos dos métodos de medida e dos padrões, sobre as unidades, etc., assim como informações sobre atividades, decisões e recomendações dos órgãos da Convenção do Metro.

# 1 Introdução

## 1.1 HISTÓRICO

Em 1948 a 9ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), por sua Resolução 6, encarregou o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) de:

“estudar o estabelecimento de uma regulamentação completa das unidades de medida”;

“proceder, com esse intuito, a um inquérito oficial sobre a opinião dos meios científicos, técnicos e pedagógicos de todos os países”;

“emitir recomendações atinentes ao estabelecimento de um sistema prático de unidades de medidas, suscetível de ser adotado por todos os países signatários da Convenção do Metro”.

A mesma Conferência Geral adotou também a Resolução 7, que fixou princípios gerais para a grafia dos símbolos de unidades e forneceu uma lista de unidades com nomes especiais.

A 10ª CGPM (1954), por meio de sua Resolução 6, e a 14ª CGPM, (1971), em sua Resolução 3, decidiram adotar, como unidades de base deste “sistema prático de unidades”, as unidades das sete grandezas seguintes: comprimento, massa, tempo, intensidade de corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria e intensidade luminosa.

A 11ª CGPM (1960), por intermédio de sua Resolução 12, adotou finalmente o nome Sistema Internacional de Unidades, com abreviação internacional SI, para este sistema prático de unidades de medida, e instituiu regras para os prefixos, para as unidades derivadas e as unidades suplementares, além de outras indicações, estabelecendo, assim, uma regulamentação de conjunto para as unidades de medidas.

Podemos, então, resumir as principais etapas históricas que levam a estas importantes decisões da Conferência Geral:

- A criação do Sistema Métrico Decimal, durante a Revolução Francesa, e o depósito que resultou, em 22 de junho de 1799, de dois padrões de platina, representando o metro e o quilograma, nos Arquivos da



República, em Paris, podem ser considerados como a primeira etapa que levou ao Sistema Internacional de Unidades atual.

- Em 1832, Gauss trabalhava ativamente em prol da aplicação do Sistema Métrico, associado ao segundo, definido em astronomia como Sistema Coerente de Unidades para as Ciências Físicas. Gauss foi o primeiro a fazer medidas absolutas do campo magnético terrestre, utilizando um sistema decimal baseado em três unidades mecânicas: milímetro, grama e segundo para, respectivamente, as grandezas: comprimento, massa e tempo. Em consequência, Gauss e Weber realizaram, também, medidas de fenômenos elétricos.
- Maxwell e Thomson aplicaram de maneira mais completa essas medidas nos domínios da eletricidade e do magnetismo junto à British Association for the Advancement of Science (BAAS) nos anos de 1860. Eles expressaram a necessidade de um Sistema Coerente de Unidades formado de unidades de base e de unidades derivadas. Em 1874, a BAAS criou o sistema CGS, um sistema tridimensional de unidades, coerente e baseado nas três unidades mecânicas: centímetro, grama e segundo, e utilizando os prefixos micro e mega para expressar os submúltiplos e múltiplos decimais. É em grande parte à utilização deste sistema que se deve o progresso da física como ciência experimental.
- Foram escolhidas as unidades CGS coerentes para os domínios da eletricidade e magnetismo; e a BAAS e o Congresso Internacional de Eletricidade, que antecedeu a Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI), aprovaram, nos anos 1880, um sistema mutuamente coerente de unidades práticas. Dentre elas, figuravam o ohm para a resistência elétrica, o volt para a força eletromotriz e o ampère para a corrente elétrica.
- Após a assinatura da Convenção do Metro, em 20 de maio de 1875, o Comitê Internacional se dedica à construção de novos protótipos, escolhendo o metro e o quilograma como unidades de base de comprimento e de massa. Em 1889, a 1ª CGPM sanciona os protótipos internacionais do metro e do quilograma. Com o segundo dos astrônomos como unidade de tempo, essas unidades constituíam um sistema tridimensional de unidades mecânicas, similar ao CGS, mas cujas unidades de base eram o metro, o quilograma e o segundo, o sistema MKS.
- Em 1901, Giorgi demonstra que seria possível associar as unidades mecânicas desse sistema, metro-quilograma-segundo, ao sistema prático de unidades elétricas, para formar um único sistema coerente quadridimensional, juntando a essas três unidades de base uma quarta

unidade, de natureza elétrica, tal como o ampère ou o ohm, e racionalizando as expressões utilizadas em eletromagnetismo. A proposta de Giorgi abriu caminho para outras extensões.

- Após a revisão da Convenção do Metro pela 6ª CGPM, em 1921, que estendeu as atribuições e as responsabilidades do Bureau Internacional a outros domínios da física, e a criação do CCE pela 7ª CGPM, em 1927, a proposta de Giorgi foi discutida detalhadamente pela CEI, UIPPA e outros organismos internacionais. Essas discussões levaram o CCE a propor, em 1939, a adoção de um sistema quadridimensional baseado no metro, quilograma, segundo e ampère – o sistema MKSA, uma proposta que foi aprovada pelo Comitê Internacional, em 1946.
- Como resultado de uma consulta internacional realizada pelo Bureau Internacional, a partir de 1948, a 10ª CGPM, em 1954, aprova a introdução do ampère, do kelvin e da candela como unidades de base, respectivamente, para intensidade de corrente elétrica, temperatura termodinâmica e intensidade luminosa. A 11ª CGPM dá o nome Sistema Internacional de Unidades (SI) para esse sistema, em 1960. Na 14ª CGPM, em 1971, o mol foi incorporado ao SI como unidade de base para quantidade de matéria, sendo a sétima das unidades de base do SI, tal como conhecemos até hoje.

## 1.2 AS DUAS CLASSES DE UNIDADES SI

No SI distinguem-se duas classes de unidades:

- Unidades de base;
- Unidades derivadas.<sup>(2)</sup>

Sob o aspecto científico, a divisão das unidades SI nessas duas classes é arbitrária porque não é uma imposição da física.

Entretanto, a Conferência Geral, levando em consideração as vantagens de se adotar um sistema prático único para ser utilizado mundialmente nas relações internacionais, no ensino e no trabalho científico, decidiu basear o Sistema Internacional em sete unidades perfeitamente definidas, consideradas como independentes sob o ponto de vista dimensional: o metro, o quilograma, o segundo, o ampère, o kelvin, o mol e a candela (ver subitem 2.1). Estas unidades SI são chamadas *unidades de base*.

---

(2) A 11ª CGPM (1960, Resolução 12; CR, 87) admitia uma classe separada de unidades SI, denominadas unidades suplementares, que continha o radiano e o esterradiano, unidades de ângulo plano e de ângulo sólido. A 20ª CGPM (1995, Resolução 8; CR, 223 e Metrologia, 1996, 33, 83) eliminou a classe de unidades suplementares no SI, e o radiano e o esterradiano foram integrados à classe de unidades derivadas.

A segunda classe de unidades SI abrange as *unidades derivadas*, isto é, as unidades que podem ser formadas combinando-se unidades de base segundo relações algébricas que interligam as grandezas correspondentes. Diversas destas expressões algébricas, em razão de unidades de base, podem ser substituídas por nomes e símbolos especiais, o que permite sua utilização na formação de outras unidades derivadas (ver subitem 2.2).

As unidades SI destas duas classes constituem um conjunto coerente, na acepção dada habitualmente à expressão “*sistema coerente de unidades*”, isto é, sistema de unidades ligadas pelas regras de multiplicação e divisão, sem qualquer fator numérico diferente de 1.

Segundo a Recomendação 1 (1969; PV, 37, 30-31 e Metrologia, 1970, 6, 66) do CIPM, as unidades desse conjunto coerente de unidades são designadas sob o nome de unidades SI.<sup>(3)</sup>

É importante acentuar que cada grandeza física tem uma só unidade SI, mesmo que esta unidade possa ser expressa sob diferentes formas. Porém o inverso não é verdadeiro: a mesma unidade SI pode corresponder a várias grandezas diferentes.

### 1.3 OS PREFIXOS SI

A Conferência Geral adotou uma série de prefixos para a formação dos múltiplos e submúltiplos decimais das unidades SI (ver subitens 3.1 e 3.2). De acordo com a Recomendação 1 (1969) do CIPM, o conjunto desses prefixos é designado pelo nome de prefixos SI.

As unidades SI, isto é, as unidades de base e as unidades derivadas do SI, formam um conjunto coerente.

Os múltiplos e submúltiplos das unidades SI, formados por meio dos prefixos SI, devem ser designados pelo seu nome completo: “*múltiplos e submúltiplos decimais das unidades SI*”. Esses múltiplos e submúltiplos decimais das unidades SI não são coerentes com as unidades SI propriamente ditas.

Como exceção à regra, os múltiplos e submúltiplos do quilograma são formados adicionando os nomes dos prefixos ao nome da unidade “grama” e símbolos dos prefixos ao símbolo da unidade “g”.

---

(3) As recomendações do Comitê Internacional constam dos *procès-verbaux* das sessões do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (mencionados sob a forma: PV)

## 1.4 SISTEMA DE GRANDEZAS

Essa publicação não se refere ao sistema de grandezas a ser utilizado com as unidades SI, campo do qual se ocupa o Comitê Técnico 12 da Organização Internacional de Normalização (ISO), que publicou a partir de 1955 uma série de normas internacionais sobre as grandezas e unidades, recomendando fortemente o uso do Sistema Internacional de Unidades.<sup>(4)</sup>

Nessas normas internacionais, a ISO adotou um sistema de grandezas físicas baseado nas sete grandezas de base: comprimento, massa, tempo, intensidade de corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria e intensidade luminosa.

As outras grandezas — grandezas derivadas — são definidas em função dessas sete grandezas de base; as relações entre as grandezas derivadas e as grandezas de base são expressas por um sistema de equações. É conveniente empregar com as unidades SI esse sistema de grandezas e esse sistema de equações.

## 1.5 AS UNIDADES SI NO QUADRO DA RELATIVIDADE GERAL

As definições das unidades SI de base foram aprovadas num contexto que não leva em conta os efeitos relativistas. Se introduzimos tal noção, é claro que essas condições só se aplicam ao pequeno domínio espacial que acompanha, em seu movimento, os padrões que as realizam. As unidades de base SI são, então, unidades próprias: suas realizações provêm de experiências locais, nas quais os efeitos relativistas a serem considerados são aqueles da relatividade restrita. As constantes da física são grandezas locais, cujo valor é expresso em unidades próprias.\*

As realizações de uma unidade com o auxílio de diferentes padrões são, geralmente, comparadas ao nível local. Todavia, para os padrões de frequência, é possível realizar tais comparações a distância, por meio de sinais eletromagnéticos. Para interpretar os resultados, é necessário apelar para a teoria da relatividade geral, pois esta prevê, entre outras coisas, um desvio de frequência entre os padrões de, aproximadamente,  $1 \times 10^{-16}$ , em valor relativo, por metro de altitude à superfície da Terra. Efeitos dessa ordem de grandeza podem ser comparados à incerteza da realização do metro ou do segundo baseado num sinal periódico ou numa dada frequência (ver Anexo 2).

---

(4) Para mais informações sobre o sistema de grandezas em uso com as unidades SI, ver a norma internacional ISO 31, grandezas e unidades (Handbook Normas ISO, 3<sup>a</sup> edição, ISO, genebra, 1993).

\* As questões das unidades próprias foram tratadas na Resolução A4, adotada pela XXI Assembléia Geral da União Astronômica Internacional (UAI), em 1991, e no relatório do Grupo de Trabalho do CCDS sobre aplicação da relatividade geral na metrologia (Metrologia, 1997, 34, 261/290).

## **1.6 LEGISLAÇÕES SOBRE AS UNIDADES**

Os países fixam por via legislativa as regras concernentes à utilização das unidades no plano nacional, de uma maneira geral ou em apenas alguns campos, como no comércio, na saúde ou na segurança pública, no ensino, etc. Em um número crescente de países essas legislações são baseadas no emprego do Sistema Internacional de Unidades.

A Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML), criada em 1955, cuida da uniformidade internacional dessas legislações.

## 2 Unidades SI

### 2.1 UNIDADES SI DE BASE

As definições oficiais de todas as unidades de base do SI foram aprovadas pela Conferência Geral. A primeira dessas definições foi aprovada em 1889, e a mais recente em 1983. Essas definições são modificadas periodicamente a fim de acompanhar a evolução das técnicas de medição e para permitir uma realização mais exata das unidades de base.

#### 2.1.1 DEFINIÇÕES

A definição atual de cada unidade de base, extraída dos *compte-rendus* da Conferência Geral (CR) que a aprovou, aparece aqui em negrito. O texto principal fornece notas históricas e explicativas, mas não é parte integrante das definições.

##### 2.1.1.1 UNIDADE DE COMPRIMENTO (METRO)

A definição do metro baseada no protótipo internacional em platina iridiada, em vigor desde 1889, foi substituída na 11ª CGPM (1960) por uma outra definição baseada no comprimento de onda de uma radiação do criptônio 86, com a finalidade de aumentar a exatidão da realização do metro. A 17ª CGPM (1983, Resolução 1; CR 97 e Metrologia, 1984, 20, 25) substituiu, em 1983, essa última definição pela seguinte: **“O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de 1/299 792 458 de segundo.”**

Essa definição tem o efeito de fixar a velocidade da luz em 299 792 458 m.s<sup>-1</sup>, exatamente. O antigo protótipo internacional do metro, que fora sancionado pela 1ª CGPM em 1889, é conservado no Bureau Internacional de Pesos e Medidas nas mesmas condições que foram fixadas em 1889.

##### 2.1.1.2 UNIDADE DE MASSA (QUILOGRAMA)

O protótipo internacional do quilograma foi sancionado pela 1ª CGPM (1889) ao declarar que “este protótipo será considerado doravante como unidade de massa”.

A 3ª CGPM (1901; CR,70), para acabar com a ambigüidade que ainda existia no uso corrente sobre o significado da palavra “peso”, confirmou que:

**“O quilograma é a unidade de massa (e não de peso, nem força); ele é igual à massa do protótipo internacional do quilograma.”**

Este protótipo internacional em platina iridiada é conservado no Bureau Internacional, nas condições que foram fixadas pela 1ª CGPM em 1889.

### 2.1.1.3 UNIDADE DE TEMPO (SEGUNDO)

Primitivamente, o segundo, unidade de tempo, era definido como a fração  $1/86\,400$  do dia solar médio. A definição exata do “dia solar médio” fora deixada aos cuidados dos astrônomos, porém os seus trabalhos demonstraram que o dia solar médio não apresentava as garantias de exatidão requeridas, por causa das irregularidades da rotação da Terra. Para conferir maior exatidão à definição da unidade de tempo, a 11ª CGPM (1960) sancionou outra definição fornecida pela União Astronômica Internacional, e baseada no ano trópico. Na mesma época as pesquisas experimentais tinham já demonstrado que um padrão atômico de intervalo de tempo, baseado numa transição entre dois níveis de energia de um átomo, ou de uma molécula, poderia ser realizado e reproduzido com precisão muito superior. Considerando que uma definição de alta exatidão para a unidade de tempo do Sistema Internacional, o segundo, é indispensável para satisfazer às exigências da alta metrologia, a 13ª CGPM (1967) decidiu substituir a definição do segundo pela seguinte:

**“O segundo é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.”**

Na sessão de 1997, o Comitê Internacional confirmou que:

**“Essa definição se refere a um átomo de césio em repouso, a uma temperatura de 0 K.”**

### 2.1.1.4 UNIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA (AMPÈRE)

Diversas unidades elétricas, ditas *internacionais*, para a intensidade de corrente elétrica e para a resistência, haviam sido introduzidas no Congresso Internacional de Eletricidade, reunido em Chicago em 1893. As definições do ampère “*internacional*” e do ohm “*internacional*” foram confirmadas pela Conferência Internacional de Londres em 1908.

Embora por ocasião da 8ª CGPM (1933) já fosse evidente a opinião unânime no sentido de substituir estas unidades “*internacionais*” por unidades ditas “*absolutas*”, a decisão formal de suprimir estas unidades

“internacionais” foi tomada somente pela 9ª CGPM (1948), que adotou para o ampère, unidade de corrente elétrica, a seguinte definição:

**“O ampère é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível, e situados à distância de 1 metro entre si, no vácuo, produz entre estes condutores uma força igual a  $2 \times 10^{-7}$  newton por metro de comprimento.”**

A expressão “unidade MKS de força”, que figura no texto original, foi aqui substituída por “newton”, denominação adotada pela 9ª CGPM (1948 — Resolução 7).

#### 2.1.1.5 UNIDADE DE TEMPERATURA TERMODINÂMICA (KELVIN)

A definição da unidade de temperatura termodinâmica foi dada pela 10ª CGPM (1954 — Resolução 3), que escolheu o ponto tríplice da água como ponto fixo fundamental, atribuindo-lhe a temperatura de 273,16°K por definição. A 13ª CGPM (1967 — Resolução 3) adotou o nome kelvin (símbolo K) em lugar de “grau kelvin” (símbolo °K) e formulou, na sua Resolução 4, a definição da unidade de temperatura termodinâmica, como se segue:

**“O kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração  $1/273,16$  da temperatura termodinâmica no ponto tríplice da água.”**

A 13ª CGPM (1967 — Resolução 3) decidiu também que a unidade kelvin e seu símbolo K fossem utilizados para expressar um intervalo ou uma diferença de temperatura.

Além da temperatura termodinâmica (símbolo T) expressa em kelvins, utiliza-se, também, a temperatura Celsius (símbolo t), definida pela equação:

$$t = T - T_0$$

A unidade de temperatura Celsius é o grau Celsius, símbolo °C, igual à unidade kelvin, por definição. Um intervalo ou uma diferença de temperatura pode ser expressa tanto em kelvins quanto em graus Celsius (13ª CGPM, 1967-1968, Resolução 3, mencionada acima).

O valor numérico de uma temperatura Celsius t, expressa em graus Celsius, é dada pela relação:

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

O kelvin e o grau Celsius são também as unidades da Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) adotada pelo Comitê



Internacional em 1989, em sua Recomendação 5 (CI-1989) (PV, 57, 26 e Metrologia, 1990, 27, 13).

#### **2.1.1.6 UNIDADE DE QUANTIDADE DE MATÉRIA (MOL)**

Desde a descoberta das leis fundamentais da química, utilizaram-se diversas unidades denominadas, por exemplo, “átomo grama” ou “molécula grama”, para especificar quantidades de diversos elementos ou compostos químicos. Estas unidades eram estritamente ligadas aos “pesos atômicos” ou aos “pesos moleculares”. Originalmente os “pesos atômicos” eram referidos ao elemento químico oxigênio (16 por convenção). Porém, enquanto os físicos separavam os isótopos no espectrógrafo de massa e atribuíam o valor 16 a um dos isótopos de oxigênio, os químicos atribuíam o mesmo valor à mistura (levemente variável) dos isótopos 16, 17 e 18, que para eles constituía o elemento oxigênio natural. Um acordo entre a União Internacional de Física Pura e Aplicada (UIPPA) e a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) resolveu esta dualidade em 1959-1960. Desde esta época, físicos e químicos concordam em atribuir o valor 12 ao isótopo 12 do carbono.

A escala unificada assim obtida dá os valores das “massas atômicas relativas”. Faltava determinar a massa que corresponde à unidade de quantidade de carbono 12. Por acordo internacional, esta massa foi fixada em 0,012kg, e deu-se o nome de mol (símbolo mol) à unidade da grandeza “quantidade de matéria”.

Aderindo à proposta da UIPPA, da IUPAC e da ISO, o CIPM deu em 1967, e confirmou em 1969, a seguinte definição do mol, que foi finalmente adotada pela 14ª CGPM (1971 — Resolução 3):

**1º) O mol é a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 quilograma de carbono 12.**

**2º) Quando se utiliza o mol, as entidades elementares devem ser especificadas, podendo ser átomos, moléculas, íons, elétrons, assim como outras partículas, ou agrupamentos especificados em tais partículas.**

Em 1980, o Comitê Internacional aprovou o relatório do CCU (1980), que determinava:

Nesta definição, entende-se que se faz referência aos átomos de carbono 12 livres, em repouso e no seu estado fundamental.\*

---

\* Quando se cita a definição do mol, é conveniente adicionar, também, essa observação.

### 2.1.1.7 UNIDADE DE INTENSIDADE LUMINOSA (CANDELA)

As unidades de intensidade luminosa baseadas em padrões de chama ou filamento incandescente, que eram usadas em diversos países, foram substituídas em 1948 pela “vela nova”, que correspondia à luminância do emissor de radiação Planck (corpo negro) à temperatura de solidificação da platina. Esta decisão preparada pela Comissão Internacional de Iluminação e pelo CIPM, desde antes de 1937, foi tomada pelo Comitê Internacional em sua sessão de 1946. A 9ª CGPM (1948) ratificou a decisão do Comitê e adotou novo nome internacional, *candela* (símbolo cd), para designar a unidade de intensidade luminosa. Em 1967, a 13ª CGPM modificou a definição de 1946. Em virtude das dificuldades experimentais da realização do irradiador de Planck a temperaturas elevadas e das novas possibilidades oferecidas pela radiometria, isto é, a medida de potência dos raios ópticos, a 16ª CGPM adotou em 1979 a nova definição:

**“A candela é a intensidade luminosa, numa dada direção de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  hertz e cuja intensidade energética nessa direção é 1/683 watt por esterradiano.”**

### 2.1.2 SÍMBOLOS DAS UNIDADES DE BASE

As unidades de base do Sistema Internacional estão reunidas no Quadro 1 com seus nomes e símbolos (10ª CGPM — 1954, Resolução 6; 11ª CGPM — 1960, Resolução 12; 13ª CGPM — 1967, Resolução 3; 14ª CGPM — 1971, Resolução 3).

Quadro 1 - Unidades SI de Base

GRANDEZA	[UNIDADES SI DE BASE]	
	NOME	SÍMBOLO
comprimento	metro	m
massa	quilograma	kg
tempo	segundo	s
corrente elétrica	ampère	A
temperatura termodinâmica	kelvin	K
quantidade de matéria	mol	mol
intensidade luminosa	candela	cd

### 2.2 UNIDADES SI DERIVADAS

As unidades derivadas são unidades que podem ser expressas a partir das unidades de base, utilizando símbolos matemáticos de multiplicação e de divisão. Dentre essas unidades derivadas, diversas receberam nome especial e símbolo particular, que podem ser utilizados, por sua vez, com os símbolos de outras unidades de base ou derivadas para expressar unidades de outras grandezas.

**2.2.1 UNIDADES EXPRESSAS A PARTIR DE UNIDADES DE BASE**

O Quadro 2 fornece alguns exemplos de unidades derivadas expressas diretamente a partir de unidades de base. As unidades derivadas são obtidas por multiplicação e divisão das unidades de base.

Quadro 2 - Exemplos de unidades SI derivadas, expressas a partir das unidades de base.

GRANDEZA	[UNIDADE SI]	
	NOME	SÍMBOLO
superfície	metro quadrado	m <sup>2</sup>
volume	metro cúbico	m <sup>3</sup>
velocidade	metro por segundo	m/s
aceleração	metro por segundo ao quadrado	m/s <sup>2</sup>
número de ondas	metro elevado à potência menos um (1 por metro)	m <sup>-1</sup>
massa específica	quilograma por metro cúbico	kg/m <sup>3</sup>
volume específico	metro cúbico por quilograma	m <sup>3</sup> /kg
densidade de corrente	ampère por metro quadrado	A/m <sup>2</sup>
campo magnético	ampère por metro	A/m
concentração (de quantidade de matéria)	mol por metro cúbico	mol/m <sup>3</sup>
luminância	candela por metro quadrado	cd/m <sup>2</sup>
índice de refração	(o número) um	1*

\* Geralmente, não se emprega o símbolo “1”, com um valor numérico.

**2.2.2 UNIDADES POSSUIDORAS DE NOMES ESPECIAIS E SÍMBOLOS PARTICULARES; UNIDADES UTILIZANDO UNIDADES POSSUIDORAS DE NOMES ESPECIAIS E SÍMBOLOS PARTICULARES**

Por questões de comodidade, certas unidades derivadas, que são mencionadas no Quadro 3, receberam nome especial e símbolo particular. Esses nomes e símbolos podem ser utilizados, por sua vez, para expressar outras unidades derivadas: alguns exemplos figuram no Quadro 4. Os nomes especiais e os símbolos particulares permitem expressar, de maneira mais simples, unidades freqüentemente utilizadas.

Os três últimos nomes e símbolos que figuram no final do Quadro 3 são unidades particulares: elas foram, respectivamente, aprovadas pela 15ª CGPM (1975, Resoluções 8 e 9; CR, 105 e Metrologia, 1975, 11, 1980); 16ª CGPM (1979, Resoluções 5; CR; 100 e Metrologia, 1980, 16, 56) visando à proteção da saúde humana.

Na última coluna dos Quadros 3 e 4, encontramos a expressão das unidades SI mencionadas em função das unidades SI de base. Nesta coluna, fatores tais como m°, kg°, etc., considerados como iguais a 1, não são geralmente escritos explicitamente.

Quadro 3 - Unidades SI derivadas possuidoras de nomes especiais e símbolos particulares.

GRANDEZA DERIVADA	UNIDADE SI DERIVADA			
	NOME	SÍMBOLO	EXPRESSÃO EM OUTRAS UNIDADES SI	EXPRESSÃO EM UNIDADES SI DE BASE
ângulo plano	radiano <sup>(a)</sup>	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
ângulo sólido	esterradiano <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
freqüência	hertz	Hz		$s^{-1}$
força	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
pressão, esforço	pascal	Pa	$N / m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
energia, trabalho, quantidade de calor	joule	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
potência, fluxo de energia	watt	W	$J / s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
quantidade de eletricidade, carga elétrica	coulomb	C		$s \cdot A$
diferença de potencial elétrico, força eletromotriz	volt	V	$W / A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
capacidade elétrica	farad	F	$C / V$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
resistência elétrica	ohm	$\Omega$	$V / A$	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
condutância elétrica	siemens	S	$A / V$	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
fluxo de indução magnética	weber	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
indução magnética	tesla	T	$Wb / m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
indutância	henry	H	$Wb / A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
temperatura Celsius	grau Celsius <sup>(d)</sup>	$^{\circ}C$	$\Omega$	K
fluxo luminoso	lúmen	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
iluminamento	lux	lx	$lm/m^2$	$m^{-2} \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
atividade (de um radionucleico)	becquerel	Bq		$s^{-1}$
dose absorvida, energia específica, (comunicada), kerma	gray	Gy	$J / kg$	$m^2 \cdot s^{-2}$
equivalente de dose, equivalente de dose ambiente, equivalente de dose direcional, equivalente de dose individual, dose equivalente num órgão	sievert	Sv	$J / kg$	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) O radiano e o esterradiano podem ser utilizados nas expressões das unidades derivadas, a fim de distinguir grandezas de natureza diferente tendo a mesma dimensão. No Quadro 4 são dados exemplos de sua utilização para formar nomes de unidades derivadas.

(b) Na prática, emprega-se os símbolos rad e sr, quando útil, porém a unidade derivada "1" não é habitualmente mencionada.

(c) Em fotometria, mantém-se, geralmente, o nome e o símbolo do esterradiano, sr, na expressão das unidades.

(d) Esta unidade pode ser utilizada associada aos prefixos SI, como, por exemplo, para exprimir o submúltiplo miligrado Celsius,  $m^{\circ}C$ .

Quadro 4 - Exemplos de unidades SI derivadas, cujos nome e símbolo compreendem unidades SI derivadas tendo nomes especiais e símbolos particulares

GRANDEZA	UNIDADE SI DERIVADA		
	NOME	SÍMBOLO	EXPRESSÃO EM UNIDADES SI DE BASE
viscosidade dinâmica	pascal segundo	Pa . s	$m^{-1} . kg . s^{-1}$
momento de uma força	newton metro	N . m	$m^2 . kg . s^{-2}$
tensão superficial	newton por metro	N / m	$kg . s^{-2}$
velocidade angular	radiano por segundo	rad / s	$m . m^{-1} . s^{-1} = s^{-1}$
aceleração angular	radiano por segundo quadrado	rad / s <sup>2</sup>	$m . m^{-1} . s^{-2} = s^{-2}$
fluxo térmico superficial, iluminamento energético	watt por metro quadrado	W / m <sup>2</sup>	$kg . s^{-3}$
capacidade térmica, entropia	joule por kelvin	J / K	$m^2 . kg . s^{-2} . K^{-1}$
capacidade térmica específica, entropia específica	joule por quilograma kelvin	J / (kg . K)	$m^2 . s^{-2} . K^{-1}$
energia mássica	joule por quilograma	J / kg	$m^2 . s^{-2}$
condutividade térmica	watt por metro kelvin	W / (m . K)	$m . kg . s^{-3} . K^{-1}$
densidade de energia	joule por metro cúbico	J / m <sup>3</sup>	$m^{-1} . kg . s^{-2}$
campo elétrico	volt por metro	V / m	$m . kg . s^{-3} . A^{-1}$
densidade de carga (elétrica)	coulomb por metro cúbico	C / m <sup>3</sup>	$m^{-3} . s . A$
densidade de fluxo elétrico	coulomb por metro quadrado	C / m <sup>2</sup>	$m^{-2} . s . A$
permissividade	farad por metro	F / m	$m^{-3} . kg^{-1} . s^4 . A^2$
permeabilidade	henry por metro	H / m	$m . kg . s^{-2} . A^{-2}$
energia molar	joule por mol	J / mol	$m^2 . kg . s^{-2} . mol^{-1}$
entropia molar,	joule por mol kelvin	J / (mol . K)	$m^2 . kg . s^{-2} . K^{-1} . mol^{-1}$
capacidade térmica molar			
exposição (raio X e $\gamma$ )	coulomb por quilograma	C / kg	$kg^{-1} . s . A$
taxa de dose absorvida	gray por segundo	Gy / s	$m^2 . s^{-3}$
intensidade energética	watt por esterradiano	W / sr	$m^4 . m^{-2} . kg . s^{-3} = m^2 . kg . s^{-3}$
luminância energética	watt por metro quadrado esterradiano	W / (m <sup>2</sup> . sr)	$m^2 . m^{-2} . kg . s^{-3} = kg . s^{-3}$

Assim como mencionado no subitem 1.2, uma mesma unidade SI pode corresponder a várias grandezas distintas. Vários exemplos são dados no Quadro 4, onde a enumeração das grandezas citadas não deve ser considerada como limitada. Assim, joule por kelvin (J / K) é o nome da unidade SI para a grandeza capacidade térmica, como também para a grandeza entropia; da mesma forma, ampère (A) é o nome da unidade SI para a grandeza de base corrente elétrica, como também para a grandeza derivada força magnetomotriz. O nome da unidade não é suficiente, então, para se conhecer a grandeza medida: essa regra se aplica não somente aos textos científicos e técnicos, como também, por exemplo, aos instrumentos de medição (isto é, eles deveriam apresentar não somente a indicação da unidade, mas também a indicação da grandeza medida).

Uma unidade derivada pode ser expressa, freqüentemente, de várias maneiras diferentes, utilizando nomes de unidades de base e nomes especiais de unidades derivadas. Contudo, esta liberdade algébrica é limitada pelas considerações físicas de bom senso. O joule, por exemplo, pode-se escrever newton por metro, ou quilograma metro quadrado por segundo quadrado, porém, em determinadas situações, algumas formas podem ser mais úteis que outras.

Na prática, a fim de reduzir o risco de confusão entre grandezas de mesma dimensão, emprega-se para exprimir sua unidade, de preferência, um nome especial ou uma combinação particular de unidades. Por exemplo, emprega-se mais vezes a unidade SI de freqüência hertz do que segundo elevado à potência menos um; e a unidade SI de velocidade angular, radiano por segundo, mais vezes que segundo elevado à potência menos um (nesse caso, o uso da palavra radiano enfatiza que a velocidade angular é igual a  $2\pi$  vezes a freqüência de rotação). Do mesmo modo, emprega-se a unidade SI de momento de força, newton metro, mais vezes que joule. No domínio das radiações ionizantes, emprega-se a unidade SI de atividade, becquerel, mais vezes que o segundo elevado à potência menos um; e utiliza-se a unidade SI de dose absorvida e a unidade SI equivalente de dose, respectivamente, gray e sievert, mais vezes que joule por quilograma. Os nomes especiais becquerel, gray e sievert foram, especificamente, introduzidos, por motivo de riscos para a saúde humana que poderiam resultar de erros no uso das unidades: segundo elevado à potência menos um e joule por quilograma.\*

---

\* O Comitê Internacional, reconhecendo a importância particular das unidades relativas à saúde humana, aprovou um texto aplicativo sobre o sievert, quando da redação da 5ª edição desta brochura, ver p. 52, Recomendação 1 (CI-1984) do Comitê Internacional (PV, 1984, 52, 31 e Metrologia, 1985, 21, 90).

### 2.2.3 UNIDADES DE GRANDEZAS SEM DIMENSÃO, GRANDEZAS DE DIMENSÃO UM

Certas grandezas são definidas em relação a duas grandezas de mesma natureza; essas grandezas possuem uma dimensão que pode ser expressa pelo número um. A unidade associada a tais grandezas é necessariamente uma unidade derivada coerente com as outras unidades do SI, e como ela resulta da relação dessas duas unidades SI idênticas, essa unidade pode também ser expressa pelo número um. Então, a unidade SI de todas as grandezas, cuja dimensão é um produto de dimensão igual a um, é igual a um. Podemos citar, como exemplo dessas grandezas, o índice de refração, a permeabilidade relativa e o fator de fricção. Outras grandezas, que possuem para unidade o número um, recebem “nomes característicos”, como o número de Prandtl  $\eta c_p / \lambda$  e os números que servem para indicar um contador, como o número de moléculas, degeneração (número de níveis de energia) ou função de repartição em termodinâmica estática.

Todas essas grandezas são descritas como sendo sem dimensão, ou de dimensão um, e possuem, como unidade, a unidade SI coerente 1. O valor dessas grandezas só é expresso por um número, geralmente, a unidade 1 não é mencionada explicitamente. Entretanto, em certos casos, essa unidade recebe um nome especial, principalmente para evitar confusão com algumas unidades derivadas compostas. É o caso do radiano, do esterradiano e do neper.

# 3 Múltiplos e submúltiplos decimais das unidades SI

## 3.1 PREFIXOS SI

A 11ª CGPM (1960, Resolução 12; CR, 87) adotou uma série de prefixos e símbolos prefixos para formar os nomes e símbolos dos múltiplos e submúltiplos decimais das unidades SI de  $10^{12}$  a  $10^{-12}$ . Os prefixos para  $10^{-15}$  e  $10^{-18}$  foram adicionados pela 12ª CGPM (1964, Resolução 8; CR, 94),  $10^{15}$  e  $10^{18}$  pela 15ª CGPM (1975, Resolução 10; CR 106 e Metrologia, 1975, 11,180-181) e  $10^{21}$ ,  $10^{24}$ ,  $10^{-21}$ ,  $10^{-24}$  pela 19ª CGPM (1991, Resolução 4; CR 97 e Metrologia, 1992, 29, 3). Os prefixos e símbolos de prefixos adotados constam do Quadro 5.\*

Quadro 5 - Prefixos SI

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

\* Estes prefixos representam, estritamente, potências de 10. Eles não devem ser utilizados para exprimir múltiplos de 2 (por exemplo, um kilobit representa 1.000 bits e não 1.024 bits).



### 3.2 O QUILOGRAMA

Entre as unidades de base do Sistema Internacional, a unidade de massa é a única cujo nome, por motivos históricos, contém um prefixo. Os nomes dos múltiplos e dos submúltiplos decimais da unidade de massa são formados pelo acréscimo dos prefixos à palavra “grama” (CIPM — 1967, Recomendação 2; PV, 35, 29 e Metrologia, 1968, 4, 45).

Por exemplo:

$10^{-6}\text{kg} = 1$  miligrama (1mg), porém nunca 1 microquilograma (1 $\mu$ kg).

# 4 Unidades fora do SI

## 4.1 UNIDADES EM USO COM O SI

O CIPM (1969) reconheceu que os utilizadores do SI terão necessidade de empregar conjuntamente certas unidades que não fazem parte do Sistema Internacional, porém estão amplamente difundidas.

Estas unidades desempenham papel tão importante que é necessário conservá-las para uso geral com o Sistema Internacional de Unidades. Elas figuram no Quadro 6 a seguir.

A combinação de unidades deste quadro com unidades SI, para formar unidades compostas, não deve ser praticada senão em casos limitados, a fim de não perder as vantagens de coerência das unidades SI.

Quadro 6 - Unidades fora do Sistema Internacional, em uso com o Sistema Internacional

NOME	SÍMBOLO	VALOR EM UNIDADE SI
minuto	min	1 min = 60s
hora <sup>(a)</sup>	h	1 h = 60 min = 3.600s
dia	d	1 d = 24 h = 86.400s
grau <sup>(b)</sup>	°	1° = ( $\pi$ / 180) rad
minuto	'	1' = (1/60)° = ( $\pi$ / 10 800) rad
segundo	''	1'' = (1/60)' = ( $\pi$ / 648 000) rad
litro <sup>(c)</sup>	l, L	1l = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
tonelada <sup>(d), (e)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
neper <sup>(f), (h)</sup>	Np	1 Np = 1
bel <sup>(g), (h)</sup>	B	1B = (1/2) ln 10 (Np) <sup>(i)</sup>

a) O símbolo *h* desta unidade foi incluído na Resolução 7 da 9ª CGPM (1948; CR, 70).

b) A norma ISO 31 recomenda que o grau seja subdividido preferencialmente de maneira decimal a se utilizar o minuto e o segundo.

c) Esta unidade e o símbolo *l* foram adotados pelo Comitê Internacional em 1879 (*Procès-verbaux* — CIPM, 1879, p. 41); o outro símbolo *L* foi adotado pela 16ª CGPM (1979, Resolução 6; CR 101 e Metrologia, 1980, 16, 56-57) a fim de se evitar a confusão entre a letra *l* e o algarismo 1. A definição atual do litro encontra-se na Resolução 6 da 12ª CGPM (1964; CR, 93).

d) O símbolo *t* e a unidade foram adotados pelo Comitê Internacional em 1879 (*Procès-verbaux* — CIPM, 1879, p. 41).

- e) Em alguns países de língua inglesa, essa unidade apresenta o nome de “tonelada métrica” (metric ton).
- f) O neper é utilizado para expressar o valor de grandezas logarítmicas, tais como nível de campo, nível de potência, nível de pressão acrílica ou decremento logarítmico. Os logaritmos naturais são utilizados para obter os valores numéricos das grandezas expressas em nepers. O neper é coerente com o SI, mas ainda não foi adotado pela Conferência Geral como unidade SI. Para mais informações, ver a norma internacional ISO 31.
- g) O bel é utilizado para expressar o valor de grandezas logarítmicas, tais como nível de campo, nível de potência, nível de pressão acústica ou atenuação. Os logaritmos de base 10 são utilizados para se obter os valores numéricos das grandezas expressas em bels. O submúltiplo decimal decibel, dB, é de uso corrente. Para mais informações, ver a norma internacional ISO 31.
- h) É especialmente importante especificar a grandeza em questão quando se utiliza essas unidades. Não é necessário considerar a unidade para especificar a grandeza.
- i) Np figura entre parênteses porque, embora o neper seja coerente com o SI, ainda não foi adotado pela Conferência Geral.

Do mesmo modo é necessário admitir algumas outras unidades não pertencentes ao Sistema Internacional, cujo uso é útil em domínios especializados da pesquisa científica, pois seu valor (a ser expresso em unidades SI) tem de ser obtido experimentalmente, portanto não é exatamente conhecido (Quadro 7).

Quadro 7 - Unidades fora do SI, em uso com o Sistema Internacional, cujo valor em Unidades SI é obtido experimentalmente

NOME	SÍMBOLO	DEFINIÇÃO	VALOR EM UNIDADES SI
eletronvolt <sup>(a)</sup>	eV	<sup>(b)</sup>	1 eV = 1,602 177 33 (49) x 10 <sup>-19</sup> J
unidade (unificada) de massa atômica	u	<sup>(c)</sup>	1 u = 1,660 540 2 (10) x 10 <sup>-27</sup> kg
unidade astronômica	ua	<sup>(d)</sup>	1 ua = 1,495 978 706 91 (30) x 10 <sup>11</sup> m

a) Os valores do eletronvolt e da unidade massa atômica unificada são dados no Boletim CODATA, 1986, nº 63.

b) 1 eletronvolt é a energia cinética adquirida por um elétron atravessando uma diferença de potencial de 1 volt no vácuo:

$$1 \text{ eV} = 1,602 19 \times 10^{-19} \text{ J, aproximadamente.}$$

c) A unidade unificada de massa atômica é igual à fração 1/12 da massa de um átomo do nuclídeo <sup>12</sup>C.

$$1 \text{ u} = 1,660 57 \times 10^{-27} \text{ kg, aproximadamente.}$$

d) A unidade astronômica é unidade de comprimento; seu valor é, aproximadamente, igual à distância média entre a Terra e o Sol. Essa unidade é tal que, quando utilizada para descrever os movimentos dos corpos no Sistema Solar, a constante gravitacional heliocêntrica é de (0,017 202 098 95)<sup>2</sup> ua<sup>3</sup> . d<sup>-2</sup>.

O Quadro 8 menciona outras unidades fora do SI utilizadas de maneira corrente e com o SI, a fim de satisfazer às necessidades no campo comercial ou jurídico, ou a interesses científicos particulares.

Quadro 8 - Outras unidades fora do SI em uso com o Sistema Internacional

NOME	SÍMBOLO	VALOR EM UNIDADE SI
milha marítima <sup>(a)</sup>		1 milha marítima = 1 852m
nó		1 milha marítima por hora = (1 852/3 600)m/s
angström	Å	1 Å = 0,1 nm = 10 <sup>-10</sup> m
are <sup>(b)</sup>	a	1 a = 1dam <sup>2</sup> = 10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
hectare <sup>(b)</sup>	ha	1ha = 1hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
barn <sup>(c)</sup>	b	1 b = 100fm <sup>2</sup> = 10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
bar <sup>(d)</sup>	bar	1bar = 0,1MPa = 100kPa = 1000hPa = 10 <sup>5</sup> Pa

a) A milha é uma unidade especial utilizada na navegação marítima e aérea para expressar distâncias. Este valor convencional foi adotado pela Primeira Convenção Hidrográfica Internacional Extraordinária, Mônaco 1929, sob o nome de “milha marítima internacional”. Não existe símbolo consensado em nível internacional. Originalmente, essa unidade foi escolhida porque uma milha marítima na superfície da Terra subtende, aproximadamente, um minuto de ângulo no centro da Terra.

b) Estas unidades e seus símbolos foram adotados pelo Comitê Internacional em 1879 (*Procès-verbaux* — CIPM, 1879, p. 41), e são empregados para exprimir superfícies agrárias.

c) O barn é uma unidade especial utilizada na física nuclear para exprimir as “seções eficazes”.

d) O bar e seu símbolo estão incluídos na Resolução 7 da 9ª CGPM, (1948; CR, 70).

#### 4.2 OUTRAS UNIDADES FORA DO SI

Algumas unidades fora do SI continuam a ser empregadas ocasionalmente. Algumas delas são importantes na interpretação de antigos textos científicos. Essas unidades são mencionadas nos Quadros 7 e 8, mas é preferível evitar o seu uso.

O Quadro 9 fornece as relações entre as unidade CGS e as unidades SI. O quadro menciona as unidades CGS com nomes especiais. No campo da mecânica, o sistema de unidades CGS se baseava em 3 grandezas de base e suas unidades: o centímetro, o grama e o segundo. No campo da eletricidade e magnetismo, as unidades foram também expressas em função dessas três unidades de base. Como essas unidades podiam ser expressas de várias maneiras, vários sistemas foram estabelecidos, como, por exemplo, o Sistema CGS Eletrostático, o Sistema CGS Eletromagnético e o Sistema CGS de Gauss. Nesses três últimos sistemas, o sistema de grandezas e o sistema de equações correspondentes são diferentes daqueles que se utilizam com as unidades SI.

Quadro 9 - Unidades CGS derivadas dotadas de nomes particulares

NOME	SÍMBOLO	VALOR EM UNIDADE SI
erg <sup>(a)</sup>	erg	1 erg = 10 <sup>-7</sup> J
dina <sup>(a)</sup>	dyn	1 dyn = 10 <sup>-5</sup> N
poise <sup>(a)</sup>	P	1 P = 1 dyn.s/cm <sup>2</sup> = 0,1Pa.s
stokes	St	1 St = 1 cm <sup>2</sup> /s = 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
gauss <sup>(b)</sup>	G	1G ≙ 10 <sup>-4</sup> T
oersted <sup>(b)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (1000/4π) A/m
maxwell <sup>(b)</sup>	Mx	1 Mx ≙ 10 <sup>-8</sup> Wb
stilb <sup>(a)</sup>	sb	1 sb = 1cd/cm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
phot	ph	1 ph = 10 <sup>4</sup> lx
gal <sup>(c)</sup>	Gal	1 Gal = 1cm/s <sup>2</sup> = 10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

a) Esta unidade e seu símbolo foram incluídos na Resolução 7 da 9ª CGPM (1948).

b) Esta unidade pertence ao Sistema CGS dito “eletromagnético” a três dimensões, e não é estritamente comparável com a unidade correspondente do SI, que possui quatro dimensões, quando se refere a grandezas mecânicas e elétricas. Por isso, a relação entre esta unidade e a unidade SI é expressa por meio do símbolo matemático ( ≙ ).

c) O gal é uma unidade especial utilizada em geodésia e em geofísica para exprimir a aceleração da gravidade.

O Quadro 10 se refere às unidades de uso corrente em antigos textos. É preferível evitá-las nos textos atuais, para não se perder as vantagens do SI. Cada vez que essas unidades são mencionadas num documento, é conveniente se indicar sua equivalência com a unidade SI.

Quadro 10 - Exemplos de outras unidades fora do SI

NOME	SÍMBOLO	VALOR EM UNIDADE SI
curie <sup>(a)</sup>	Ci	1 Ci = 3,7 x 10 <sup>10</sup> Bq
roentgen <sup>(b)</sup>	R	1 R = 2,58 x 10 <sup>-4</sup> C/kg
rad <sup>(c,f)</sup>	rad	1 rad = 1 cGy = 10 <sup>-2</sup> Gy
rem <sup>(d,f)</sup>	rem	1 rem = 1cSv = 10 <sup>-2</sup> Sv
unidade X <sup>(e)</sup>		1 unidade X ≈ 1,002 x 10 <sup>-4</sup> nm
gama <sup>(f)</sup>	γ	1 γ = 1 nT = 10 <sup>-9</sup> T
jansky	Jy	1 Jy = 10 <sup>-26</sup> W.m <sup>-2</sup> Hz <sup>-1</sup>
fermi <sup>(f)</sup>		1 fermi = 1fm = 10 <sup>-15</sup> m
quilate métrico <sup>(g)</sup>		1 quilate métrico = 200mg = 2 x 10 <sup>-4</sup> kg
torr	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
atmosfera normal	atm <sup>(h)</sup>	1 atm = 101 325 Pa
caloria	cal	(i)
micron <sup>(f)</sup>	μ <sup>(j)</sup>	1μ = 1mm = 10 <sup>-6</sup> m

a) O curie é uma unidade especial empregada em física nuclear para expressar a atividade dos radionuclídeos (12<sup>a</sup> CGPM, 1964, Resolução 7; CR, 94).

b) O roentgen é uma unidade especial empregada para exprimir a exposição às radiações X ou γ.

c) O rad é uma unidade especial empregada para exprimir a dose absorvida das radiações ionizantes. Quando houver risco de confusão no símbolo do radiano, pode-se utilizar rd como símbolo do rad.

d) O rem é uma unidade especial empregada em radioproteção para exprimir o equivalente de dose.

e) A unidade X era empregada para exprimir comprimentos de onda dos raios X: sua equivalência com a unidade SI é aproximada.

f) Essa unidade fora do SI é exatamente equivalente a um submúltiplo decimal de uma unidade SI.

g) O quilate métrico foi adotado pela 4<sup>a</sup> CGPM 1907 (CR, 89-91) para o comércio de diamantes, pérolas finas e pedras preciosas.

h) Resolução 4 da 10<sup>a</sup> CGPM (1954; CR, 79). A designação “atmosfera normal” é admitida para a pressão de referência de 101 325 Pa.

i) Várias calorias são adotadas para uso:

- Caloria dita 15°C:

1 cal<sub>15</sub> = 4,1855 J (valor adotado pelo CIPM em 1950), (PV, 1950, 22, 79-80);

- Caloria dita IT (International Table)

1 cal<sub>IT</sub> = 4,1868 J (5<sup>a</sup> Conferência Internacional sobre as Propriedades do Vapor, Londres, 1956);

- Caloria dita termodinâmica:

1 cal<sub>th</sub> = 4, 184 J

j) O micron e seu símbolo, que foram adotados pelo Comitê Internacional em 1879 (PV, 1879, 41) e novamente admitidos na Resolução 7 da 9<sup>a</sup> CGPM (1948; CR, 70), foram eliminados pela 13<sup>a</sup> CGPM (1967-1968) (Resolução 7; CR 105 e Metrologia, 1968, 4, 44).



# 5 Regras para escrita dos nomes e símbolos das unidades SI

**5.1 PRINCÍPIOS GERAIS** Os princípios gerais referentes à grafia dos símbolos das unidades foram adotados pela 9ª CGPM (1948, Resolução 7). Em seguida, foram adotados pela ISO/TC 12 (ISO 31, Grandezas e Unidades).

**5.2 SÍMBOLOS DAS UNIDADES SI** 1) Os símbolos das unidades são expressos em caracteres romanos (verticais) e, em geral, minúsculos. Entretanto, se o nome da unidade deriva de um nome próprio, a primeira letra do símbolo é maiúscula.

2) Os símbolos das unidades permanecem invariáveis no plural.

3) Os símbolos das unidades não são seguidos por ponto.

**5.3 EXPRESSÃO ALGÉBRICA DOS SÍMBOLOS DAS UNIDADES SI** De acordo com os princípios gerais adotados pelo ISO/TC 12 (ISO 31):

1. O produto de duas ou mais unidades pode ser indicado de uma das seguintes maneiras:

N.m ou Nm

2. Quando uma unidade derivada é constituída pela divisão de uma unidade por outra, pode-se utilizar a barra inclinada (/), o traço horizontal, ou potências negativas.

Por exemplo: m/s,  $\frac{m}{s}$  ou  $m \cdot s^{-1}$



3. Nunca repetir na mesma linha mais de uma barra inclinada, a não ser com o emprego de parênteses, de modo a evitar quaisquer ambigüidades. Nos casos complexos deve-se utilizar parênteses ou potências negativas.

Por exemplo:  $m/s^2$  ou  $m \cdot s^{-2}$ , porém não  $m/s/s$   
 $m \cdot kg/(s^3 \cdot A)$  ou  $m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$ , porém não  $m \cdot kg/s^3/A$

#### 5.4 REGRAS PARA EMPREGO DOS PREFIXOS SI

Conforme os princípios gerais adotados pela International Standardization Organization (ISO 31), o CIPM recomenda que no emprego dos prefixos SI sejam observadas as seguintes regras:

1) Os símbolos dos prefixos são impressos em caracteres romanos (verticais), sem espaçamento entre o símbolo do prefixo e o símbolo da unidade.

2) O conjunto formado pelo símbolo de um prefixo ligado ao símbolo de uma unidade constitui um novo símbolo inseparável (símbolo de um múltiplo ou submúltiplo dessa unidade) que pode ser elevado a uma potência positiva ou negativa e que pode ser combinado a outros símbolos de unidades para formar os símbolos de unidades compostas.

Por exemplo:

$$1\text{cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

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

$$1\mu\text{s}^{-1} = (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$1\text{V/cm} = (1\text{V})/(10^{-2} \text{ m}) = 10^2 \text{ V/m}$$

3) Os prefixos compostos, formados pela justaposição de vários prefixos SI, não são admitidos;

Exemplo:

1nm, porém nunca 1m $\mu$ m

4) Um prefixo não deve ser empregado sozinho.

Exemplo:

$10^6/m^3$ , porém nunca  $M/m^3$

# Anexos



# Anexo 1

## Decisões da Conferência Geral e do Comitê Internacional de Pesos e Medidas

O presente Anexo reúne as decisões da Conferência Geral ou do Comitê Internacional que se referem diretamente às definições das unidades SI, aos prefixos utilizados como o SI e, também, às convenções relativas à grafia dos símbolos de unidades e números. Não se trata de uma lista exaustiva das decisões da Conferência Geral e do Comitê Internacional. Para se consultar todas essas decisões, é necessário fazer referência aos volumes sucessivos dos *comptes-rendus* das sessões da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CR) e dos *procès-verbaux* do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (PV), bem como, para decisões recentes, à revista *Metrologia*.

O SI não é uma convenção estática; ele acompanha o progresso da metrologia, portanto, certas decisões são revogadas ou modificadas; outras podem ser mais bem determinadas por meio de complementações. As decisões que foram objeto de uma modificação estão identificadas por meio de um asterisco (\*) e conduzem a uma nota de rodapé que faz referência à decisão que oficializou essa modificação.



# 1 Decisões relativas ao estabelecimento do Sistema Internacional de Unidades (SI)

## 1.1 SISTEMA PRÁTICO DE UNIDADES: ESTABELECIMENTO DO SI

- 9ª CGPM, 1948, RESOLUÇÃO 6 (CR, 64): PROPOSTA PARA O ESTABELECIMENTO DE UM SISTEMA PRÁTICO DE UNIDADES DE MEDIDA

A Conferência Geral

considerando

– que o Comitê Internacional de Pesos e Medidas recebeu um pedido da União Internacional de Física, solicitando adotar para as relações internacionais um sistema prático internacional de unidades, recomendando o sistema MKS e uma unidade elétrica do sistema prático absoluto, sem todavia recomendar que o sistema CGS seja abandonado pelos físicos;

– que ela mesma recebeu do Governo francês pedido similar acompanhado de um projeto destinado a servir como base da discussão para o estabelecimento da regulamentação completa das unidades de medida;

encarrega o Comitê Internacional:

– de promover com esse objetivo um inquérito oficial sobre a opinião dos meios científicos, técnicos e pedagógicos de todos os países (oferecendo-lhes efetivamente o documento francês como base), e de levá-lo avante ativamente;

– de centralizar as respostas; e

– de emitir recomendações atinentes ao estabelecimento de um mesmo sistema prático de unidades de medida, suscetível de ser adotado em todos os países signatários da Convenção do Metro.

• 10ª CGPM, 1954, RESOLUÇÃO 6, (CR, 80): SISTEMA PRÁTICO DE UNIDADES DE MEDIDAS

A Décima Conferência Geral de Pesos e Medidas, conforme voto expresso na Resolução 6 da Nona Conferência Geral sobre o estabelecimento de um sistema prático de unidades de medida para as relações internacionais, decide adotar, como unidades de base deste sistema a ser estabelecido, as unidades seguintes:

comprimento	metro
massa	quilograma
tempo	segundo
intensidade de corrente elétrica	ampère
temperatura termodinâmica	grau kelvin *
intensidade luminosa	candela

\* Nome trocado por kelvin em 1967 (13ª GPM, Resolução 3)

## 1.2 O SI

• CIPM, 1956, RESOLUÇÃO 3 (PV, 25, 83): SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas,

considerando:

– a missão de que foi incumbido pela Nona Conferência Geral de Pesos e Medidas na sua Resolução 6 atinente ao estabelecimento de um sistema prático de unidades de medida suscetível de ser adotado por todos os países signatários da Convenção do Metro;

– o conjunto de documentos enviados pelos 21 países que responderam ao inquérito prescrito pela Nona Conferência Geral de Pesos e Medidas;

– a Resolução 6 da Décima Conferência Geral de Pesos e Medidas determinando a escolha das unidades de base do sistema a estabelecer;

recomenda:

1º) que o sistema estabelecido sobre as unidades de base, enumeradas a seguir, adotadas pela Décima Conferência, seja designado como “Sistema Internacional de Unidades”;

[segue-se a lista das seis unidades de base com seus símbolos, reproduzida na Resolução 12 da 11ª CGPM (1960)].

2º) que sejam utilizadas as unidades deste sistema, enumeradas no quadro seguinte, sem prejuízo de outras unidades, que poderão ser acrescentadas ulteriormente:

[segue-se o quadro das unidades reproduzido no parágrafo 4 da Resolução 12 da 11ª CGPM (1960)].

• 11ª CGPM, 1960, RESOLUÇÃO 12 (CR, 87): SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

A Décima Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando:

– a Resolução 6 da Décima Conferência Geral de Pesos e Medidas pela qual ela adotou as seis unidades que devem servir de base ao estabelecimento de um sistema prático de medida para as relações internacionais:

comprimento	metro	m
massa	quilograma	kg
tempo	segundo	s
intensidade de corrente elétrica	ampère	A
temperatura termodinâmica	grau kelvin	°k*
intensidade luminosa	candela	cd

– a Resolução 3 adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em 1956;

– as recomendações adotadas pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em 1958, a respeito da abreviatura do nome daquele sistema e dos prefixos para a formação dos múltiplos e submúltiplos das unidades;

decide:

1º) o sistema estabelecido sobre as seis unidades de base anteriores é designado pelo nome de “Sistema Internacional de Unidades”; \*\*

2º) a abreviatura internacional do nome deste Sistema é: SI;

3º) os nomes dos múltiplos e submúltiplos das unidades são formados mediante os seguintes prefixos: \* \* \*

\*Nome e símbolo da unidade modificada em 1967 (13ª CGPM, Resolução 3).

\*\* Uma sétima unidade de base, o mol, foi adotada em 1971 pela 14ª CGPM (Resolução 3).

\*\*\* Quatro novos prefixos foram adotados pela 12ª CGPM (1964), Resolução 8, 15ª CGPM (1975), Resolução 10, e pela 19ª CGPM (1991), Resolução 4.



FATOR PELO QUAL A UNIDADE É MULTIPLICADA	PREFIXO	SÍMBOLO
1 000 000 000 000 = $10^{12}$	tera	T
1 000 000 000 = $10^9$	giga	G
1 000 000 = $10^6$	mega	M
1 000 = $10^3$	quilo	k
100 = $10^2$	hecto	h
10 = $10^1$	deca	da
0,1 = $10^{-1}$	deci	d
0,01 = $10^{-2}$	centi	c
0,001 = $10^{-3}$	mili	m
0,000 001 = $10^{-6}$	micro	$\mu$
0,000 000 001 = $10^{-9}$	nano	n
0,000 000 000 001 = $10^{-12}$	pico	p

4º) as unidades a seguir são utilizadas nesse Sistema, sem prejuízo de outras unidades que poderão ser acrescentadas futuramente.

UNIDADES SUPLEMENTARES		
ângulo plano	radiano	rad
ângulo sólido	esterradiano	sr

UNIDADES DERIVADAS			
superfície	metro quadrado	$m^2$	
volume	metro cúbico	$m^3$	
freqüência	hertz	Hz	1/s
massa específica (densidade)	quilograma por metro cúbico	$Kg/m^3$	
velocidade	metro por segundo	m/s	
velocidade angular	radiano por segundo	rad/s	
aceleração	metro por segundo quadrado	$m/s^2$	
aceleração angular	radiano por segundo quadrado	$rad/s^2$	
força	newton	N	$kg.m/s^2$
pressão (tensão mecânica)	newton por metro quadrado	$N/m^2$	
viscosidade cinemática	metro quadrado por segundo	$m^2/s$	
viscosidade dinâmica	newton segundo por metro quadrado	$N.s/m^2$	
trabalho, energia, quantidade de calor	joule	J	N.m
potência	watt	$\Omega$	J/s
quantidade de eletricidade	coulomb	C	A.s
tensão elétrica, diferença de potência, força eletromotriz	volt	V	W/A
intensidade de campo elétrico	volt por metro	V/m	
resistência elétrica	ohm	W	V/A
capacitância elétrica	farad	F	A.s/V
fluxo de indução magnética	weber	Wb	V.s
indutância	henry	H	V.s/A
indução magnética	tesla	T	$Wb/m^2$
intensidade de campo magnético	ampère por metro	A/m	
força magnetomotriz	ampère	A	
fluxo luminoso	lúmen	lm	cd.sr
luminância	candela por metro quadrado	$cd/m^2$	
luminamento (ou aclaramento)	lux	lx	$lm/m^2$

• CIPM, 1969, RECOMENDAÇÃO 1 (PV, 37, 30 E METROLOGIA, 1970, 6, 66):  
SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES, MODALIDADES DE APLICAÇÃO DA  
RESOLUÇÃO 12 DA 11ª CGPM (1960) \*

O Comitê Internacional Geral de Pesos e Medidas,

Considerando que a Resolução 12 da Décima Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas (1960), relativa ao Sistema Internacional de Unidades, deu origem a discussões a respeito de certas denominações,

declara:

1º) As unidades de base, as unidades suplementares e as unidades derivadas do Sistema Internacional de Unidades, que constituem um conjunto coerente, são designadas sob o nome de “unidades SI”;

2º) Os prefixos adotados pela Conferência Geral para a formação de múltiplos e submúltiplos decimais das unidades SI são chamados “prefixos SI”;

e recomenda:

3º) O emprego das unidades SI e de seus múltiplos e submúltiplos decimais, cujos nomes são formados por meio dos prefixos SI.

Nota: A designação “unidades suplementares” que figura na Resolução 12 da Décima Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas (assim como na presente recomendação) é conferida às unidades SI para as quais a Conferência Geral não decidiu se devem ser tratadas como unidades de base ou como unidades derivadas. \*

---

\* A 20ª CGPM (1995, Resolução 8) decidiu eliminar a classe de unidades suplementares.

# 2 Decisões relativas às unidades de base do Sistema Internacional

## 2.1 COMPRIMENTO

- 1ª CGPM, 1889 (CR, 34-38): SANÇÃO DOS PROTÓTIPOS DO METRO E DO QUILOGRAMA

A Conferência Geral,

considerando

- o “Compte-Rendu do Presidente do Comitê Internacional” e o “Relatório do Comitê Internacional de Pesos e Medidas”, dos quais se conclui que, graças aos cuidados conjuntos da Seção francesa da Comissão Internacional do Metro e do Comitê Internacional de Pesos e Medidas, as determinações metroológicas fundamentais dos protótipos internacionais e nacionais do metro e do quilograma foram executadas com todas as condições de garantia e de exatidão que comporta o estado atual da ciência;
- que os protótipos internacionais e nacionais do metro e do quilograma são constituídos por platina ligada a 10 por cento de irídio, a 0,0001 aproximadamente;
- a identidade de comprimento do metro e a identidade da massa do quilograma internacionais, com o comprimento do metro e a massa do quilograma depositados nos Arquivos de França;
- que as equações dos metros nacionais em relação ao metro internacional ficam dentro do limite de 0,01 milímetro, e que estas equações são baseadas numa escala termométrica de hidrogênio, sempre fácil de reproduzir, em razão da permanência do estado deste corpo, quando posto em condições idênticas;
- que as equações dos quilogramas nacionais em relação ao quilograma internacional ficam dentro do limite de 1 miligrama;
- que o metro e o quilograma internacionais e que os metros e quilogramas nacionais satisfazem às exigências da Convenção do Metro;

sanciona

A) No que se refere aos protótipos internacionais:

1º) O protótipo do metro escolhido pelo Comitê Internacional. Este protótipo representará doravante, à temperatura de fusão do gelo, a unidade métrica de comprimento.

2º) O protótipo do quilograma adotado pelo Comitê Internacional. Este protótipo será considerado, doravante, como unidade de massa.

3º) A escala termométrica centígrada de hidrogênio em relação à qual forem estabelecidas e as equações dos metros protótipos.

B) No que se refere aos protótipos nacionais:

.....

• 7ª CGPM, 1927 (CR, 49): DEFINIÇÃO DO METRO PELO PROTÓTIPO INTERNACIONAL \*

A unidade de comprimento é o metro, definido pela distância a 0º entre os eixos dos dois traços médios gravados sobre a barra de platina iridiada depositada no Bureau Internacional de Pesos e Medidas, e declarada Protótipo do metro pela Primeira Conferência de Pesos e Medidas, estando essa régua submetida à pressão atmosférica normal e apoiada sobre dois rolos de, pelo menos, 1 centímetro de diâmetro, situados simetricamente num mesmo plano horizontal e à distância de 571 mm um do outro.

• 11ª CGPM, 1960, RESOLUÇÃO 6 (CR, 85): DEFINIÇÃO DO METRO \*\*

A Décima Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando

– que o protótipo internacional não define o metro com precisão suficiente para as atuais necessidades da metrologia;

– que, de outra parte, é desejável adotar um padrão natural e indestrutível;

decide:

1º) O metro é o comprimento igual a 1 650 763,73 comprimentos de onda no vácuo da radiação correspondente à transição entre os níveis  $2p_{10}$  e  $5d_5$  do átomo do criptônio 86.

---

\* Definição revogada em 1960 (11ª CGPM, Resolução 6).

\*\* Definição revogada em 1983 (17ª CGPM, Resolução 1).

2º) A definição do metro em vigor desde 1889, baseada no protótipo internacional em platina iridiada, fica revogada.

3º) O protótipo internacional do metro, sancionado pela Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas em 1889, será conservado no Bureau Internacional de Pesos e Medidas nas mesmas condições que foram estipuladas em 1889.

- 15ª CGPM, 1975, RESOLUÇÃO 2 (CR, 103 E METROLOGIA, 1975, 11, 179 -180): VALOR RECOMENDADO PARA A VELOCIDADE DA LUZ

A 15ª Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando a excelente concordância entre os resultados das medições do comprimento de onda das radiações dos lasers observados sobre uma raia de absorção molecular na região visível ou infravermelho, com uma incerteza estimada de  $\pm 4 \times 10^{-9}$  que corresponde à indeterminação da realização do metro.\*

considerando também as medições concordantes da frequência das várias destas radiações, recomenda o emprego do valor que resulta para a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo  $c = 299\,792\,458$  metros por segundo.

- 17ª CGPM, 1983, RESOLUÇÃO 1 (CR, 97 E METROLOGIA, 1984, 20, 2): DEFINIÇÃO DO METRO

A 17ª Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando

– que a definição atual não permite uma realização do metro suficientemente precisa para todas as necessidades,

– que os progressos realizados no domínio dos lasers permitem obter radiações mais reprodutíveis e mais fáceis de utilizar que a radiação padrão emitida por uma lâmpada de criptônio 86,

– que os progressos realizados na medição das frequências e dos comprimentos de onda destas radiações concluíram sobre determinações concordantes da velocidade da luz, cuja exatidão é limitada principalmente pela realização do metro segundo sua atual definição,

---

\* A incerteza relativa deve ser entendida como sendo igual a três vezes a incerteza-padrão estimada nos resultados considerados.

– que os valores dos comprimentos de onda determinados a partir das medições de frequência e de um dado valor de velocidade da luz têm uma precisão superior àquela que pode ser obtida por comparação com o comprimento de onda da radiação padrão do criptônio 86,

– que há vantagem, notadamente para a astronomia e para a geodésia, em manter inalterado o valor da velocidade da luz recomendado em 1975 pela 15ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, na sua Resolução 2 ( $c = 299\,792\,458\text{m/s}$ ),

– que uma nova definição do metro foi encarada sob diversas formas, todas objetivando dar à velocidade da luz um valor exato, igual ao valor recomendado, e que isso não introduzisse nenhuma descontinuidade apreciável da unidade de comprimento, levando em conta a incerteza relativa de  $\pm 4 \times 10^{-9}$  das melhores realizações do metro na sua atual definição,\*

– que estas diversas formas referindo-se seja ao trajeto percorrido pela luz num intervalo de tempo especificado, seja ao comprimento de onda de uma radiação de frequência medida ou de frequência especificada, foram objeto de consultas e discussões profundas, e que elas foram reconhecidas como equivalentes mas que um consenso manifestou-se em favor da primeira forma,

– que o Comitê Consultivo para a Definição do Metro foi desde logo colocado em posição de dar instruções para ser posta em prática uma tal definição, instruções estas que poderão incluir o emprego da radiação alaranjada do criptônio 86, utilizada até aqui como padrão e que poderão ser completadas ou revistas em seguida,

decide:

1º) O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo, durante um intervalo de tempo de  $1/299\,792\,458$  do segundo.

2º) Revogada a definição do metro em vigor desde 1960, baseada na transição entre os níveis  $2p_{10}$  e  $5d_5$  do átomo do criptônio 86.

---

\* O valor da incerteza relativa indicada aqui corresponde a três vezes o desvio-padrão do valor em questão.

- 17ª CGPM, 1983, RESOLUÇÃO 2 (CR, 98 E METROLOGIA, 1984, 20, 25-26):  
COLOCAÇÃO EM PRÁTICA DA DEFINIÇÃO DO METRO

A 17ª Conferência Geral de Pesos e Medidas convida o Comitê Internacional de Pesos e Medidas,

a estabelecer instruções para a colocação em prática da nova definição do metro,\*

a escolher as radiações que possam ser recomendadas como padrões de comprimento de onda para a medida interferencial dos comprimentos a estabelecer instruções para seu emprego,

a prosseguir os estudos efetuados para melhorar estes padrões.

## 2.2 MASSA

- 1ª CGPM, 1889 (CR, 34-38): SANÇÃO DOS PROTÓTIPOS INTERNACIONAIS DO METRO E DO QUILOGRAMA

- 3ª CGPM, 1901(CR, 70): DECLARAÇÃO RELATIVA À UNIDADE DE MASSA E À DEFINIÇÃO DO PESO; VALOR CONVENCIONAL DE  $g_n$  \*\*

Tendo em conta a decisão do Comitê Internacional de Pesos e Medidas de 15 de outubro de 1887, segundo o qual o quilograma foi definido como unidade de massa;

Tendo em conta a decisão incluída na fórmula de sanção dos protótipos do Sistema Métrico, aceita por unanimidade pela Conferência Geral de Pesos e Medidas em sua reunião de 26 de setembro de 1889;

Considerando a necessidade de acabar com a ambigüidade ainda existente na prática corrente com respeito ao significado do termo “peso”, empregado ora no sentido de *massa*, ora no sentido de *esforço mecânico*;

A Conferência declara:

1º) O quilograma é a unidade de massa; ele é igual à massa do protótipo internacional do quilograma;

2º) O termo *peso* designa uma grandeza da mesma natureza que uma força; o peso de um corpo é o produto da massa deste corpo pela aceleração da gravidade; em particular, o peso normal de um corpo é o produto da massa deste corpo pela aceleração normal da gravidade;

---

\* Ver Recomendação 1 (CI -1997) do Comitê Internacional relativa à revisão da colocação em prática da definição do metro (Anexo 2).

\*\* Esse valor de  $g_n$  é o valor convencional de referência para cálculo da unidade quilograma-força atualmente abolida.



3º) O número adotado no Serviço Internacional de Pesos e Medidas para o valor da aceleração normal da gravidade é 980,665 cm/s<sup>2</sup>, valor já sancionado por diversas legislações.

• CIPM, 1967, RECOMENDAÇÃO 2 (PV 35, 29 E METROLOGIA, 1968, 4, 45):  
MÚLTIPLOS E SUBMÚLTIPLOS DECIMAIS DA UNIDADE MASSA

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas,

considerando que a regra de formação dos nomes para os múltiplos e submúltiplos decimais das unidades do parágrafo 3º da Resolução 12 da Décima Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas (1960) pode dar lugar a interpretações divergentes quando aplicadas à unidade de massa

declara que no caso do quilograma as disposições da Resolução 12 da Décima Primeira Conferência Geral aplicam-se do modo seguinte: os nomes do múltiplos e submúltiplos decimais da unidade de massa são formados pela adição dos prefixos à palavra *grama*.

## 2.3 TEMPO

• CIPM, 1956, RESOLUÇÃO 1 (PV 25, 77): DEFINIÇÃO DA UNIDADE DE TEMPO (SEGUNDO) \*

Em virtude dos poderes que foram conferidos pela Décima Conferência Geral de Pesos e Medidas através da sua Resolução 5,

o Comitê Internacional de Pesos e Medidas,

considerando:

1º) que a Nona Assembléia Geral da União Astronômica Internacional (Dublin, 1955) emitiu parecer favorável ao relacionamento do segundo com o ano trópico;

2º) que, de acordo com as decisões da Oitava Assembléia Geral da União Astronômica Internacional (Roma, 1952), o segundo do tempo das efemérides (T.E.) é a fração:

$$\frac{12\ 960\ 276\ 813}{408\ 986\ 496} \times 10^{-9} \text{ do ano trópico para 1.900 janeiro às 12 h T.E.}$$

decide:

“O segundo é a fração 1/31 556 925,974 7 do ano trópico para 1900 janeiro 0 às 12 horas do tempo das efemérides.”\*

---

\* Definição revogada em 1967 (13ª CGPM, Resolução 1).

• 11ª CGPM, 1960, RESOLUÇÃO 9 (CR 86): DEFINIÇÃO DA UNIDADE DE TEMPO (SEGUNDO) \*

A Décima Primeira Conferência de Pesos e Medidas,

considerando:

– os poderes conferidos pela Décima Conferência Geral de Pesos e Medidas ao Comitê Internacional de Pesos e Medidas, para tomar uma decisão a respeito da definição da unidade fundamental de tempo;

– a decisão tomada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em sua sessão de 1956:

ratifica a seguinte definição:

“O segundo é a fração  $1/31\,556\,925,974\,7$  do ano trópico para 1900 janeiro 0 às 12 horas do tempo das efemérides.”\*

• 12ª CGPM, 1964, RESOLUÇÃO 5 (CR, 93): PADRÃO ATÔMICO DE FREQUÊNCIA

A Décima Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando:

– que a Décima Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas salientou na sua Resolução 10 a urgência, para os fins da alta metrologia, de se chegar a um padrão atômico ou molecular de intervalo de tempo;

– que apesar dos resultados obtidos na utilização dos padrões atômicos de frequência de césio ainda não chegou o momento para a Conferência Geral adotar uma nova definição do *segundo*, unidade de base do Sistema Internacional de Unidades, em razão dos novos e importantes progressos que podem ser alcançados em consequência dos estudos já em curso;

– considerando também que não se pode mais esperar para basear as medidas físicas de tempo em padrões atômicos ou moleculares de frequência:

– habilita o Comitê Internacional de Pesos e Medidas a designar os padrões atômicos ou moleculares de frequência a serem usados temporariamente; e

---

\* Definição revogada em 1967 (13ª CGPM, Resolução 1).

convida as organizações e os laboratórios especializados neste domínio a prosseguirem os estudos que possam levar a uma nova definição do segundo.

- CIPM, 1964, DECLARAÇÃO (PV, 32, 26 E CR 93)

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas

habilitado pela Resolução 5 da Décima Segunda Conferência Geral de Pesos e Medidas a designar os padrões atômicos ou moleculares de frequência a serem utilizados temporariamente para as medidas físicas de tempo,

declara que o padrão a utilizar e a transição entre os níveis hiperfinos  $F = 4, M = 0$  e  $F = 3, M = 0$  do estado fundamental  $^2S_{1/2}$  do átomo do césio 133 não perturbado por campos externos, e que o valor 9 192 631 770 hertz é atribuído à frequência desta transição.

- 13ª CGPM, 1967-1968, RESOLUÇÃO 1 (CR, 103 E METROLOGIA, 1968, 4, 43): UNIDADE DE TEMPO DO SI (SEGUNDO)

A Décima Terceira Conferência Geral de Pesos e Medidas

considerando:

– que a definição do segundo adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em sua reunião de 1956 (Resolução 1), ratificada pela Resolução 9 da Décima Primeira Conferência Geral (1960), e depois mantida pela Resolução 5 da Décima Segunda Conferência Geral (1964), é insuficiente para atender às necessidades atuais da metrologia;

– que na sua sessão de 1964 o Comitê Internacional de Pesos e Medidas, habilitado pela Resolução 5 da Décima Segunda Conferência Geral (1964), indicou para atender a essas necessidades um padrão atômico de frequência de césio, a ser utilizado temporariamente;

– que esse padrão de frequência está agora suficientemente comprovado e possui precisão suficiente para permitir uma definição do segundo atendendo às necessidades atuais;

– que chegou o momento oportuno para substituir a definição ora em vigor, para a unidade de tempo do Sistema Internacional de Unidades, por uma definição atômica baseada naquele padrão;

decide:

1º) A unidade de tempo do Sistema Internacional de Unidades é o segundo, definido nos termos seguintes:

“O segundo é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.”

2º) A Resolução 1 adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas, em sua reunião de 1956, e a Resolução 9 da Décima Primeira Conferência de Pesos e Medidas são revogadas.

• 14ª CGPM, 1971, RESOLUÇÃO 1 (CR, 77 E METROLOGIA, 1972, 8, 35):  
TEMPO ATÔMICO INTERNACIONAL; PAPEL DO CIPM

A 14ª Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando:

– que o segundo, unidade de tempo do Sistema Internacional de Unidades, é definido desde 1967 a partir de uma frequência atômica natural, e não mais conforme escalas de tempo fornecidas por movimentos astronômicos,

– que a necessidade de uma escala de Tempo Atômico Internacional (TAI) é consequência da definição atômica do segundo,

– que várias organizações internacionais asseguraram e ainda asseguram com sucesso o estabelecimento de escalas de tempo baseadas em movimentos astronômicos, particularmente graças aos serviços permanentes do Bureau Internacional da Hora (BIH),

– que o Bureau Internacional da Hora começou a estabelecer uma escala de tempo atômico cujas qualidades são reconhecidas e que fez prova de sua utilidade,

– que os padrões atômicos de frequência que servem à realização do segundo têm sido considerados e devem continuar a sê-lo pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas assessorado por um Comitê Consultivo, e que o intervalo unitário da escala de Tempo Atômico Internacional deve ser o segundo realizado conforme sua definição atômica,

– que todas as organizações científicas internacionais competentes e os laboratórios nacionais em atividade neste domínio expressaram o desejo de que o Comitê Internacional e a Conferência Geral de Pesos e Medidas forneçam uma definição do Tempo Atômico Internacional, e contribuam para o estabelecimento da escala do Tempo Atômico Internacional,

– que a utilidade do Tempo Atômico Internacional necessita de uma coordenação estreita com as escalas de tempo baseadas nos movimentos astronômicos,

solicita ao Comitê Internacional de Pesos e Medidas:

1º) dar uma definição do Tempo Atômico Internacional;\*

“O Tempo Atômico Internacional é a coordenada de localização temporal estabelecida pelo Bureau Internacional da Hora com base nas indicações de relógios atômicos em funcionamento em diversos estabelecimentos conforme a definição do segundo, unidade de tempo do Sistema Internacional de Unidades.”

2º) tomar as providências necessárias, de acordo com as organizações internacionais interessadas, para que as competências científicas e os meios de ação existentes sejam utilizados do melhor modo para a realização da escala de Tempo Atômico Internacional, e para que sejam satisfeitas as necessidades dos utilizadores do Tempo Atômico Internacional.

• 15ª CGPM, 1975, RESOLUÇÃO 5 (CR, 104 E METROLOGIA, 1975, 11, 180):  
TEMPO UNIVERSAL COORDENADO (UTC)

A 15ª Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando que o sistema chamado “Tempo Universal Coordenado” (UTC) é empregado largamente, que ele é difundido pela maioria dos emissores hertzianos de sinais horários, que sua difusão fornece aos utilizadores ao mesmo tempo as frequências-padrão, o Tempo Atômico Internacional e uma aproximação do Tempo Universal (ou, se for preferido, o tempo solar médio),

constata que esse Tempo Universal Coordenado é a base do tempo civil, cujo uso é legal na maioria dos países.

estima que este emprego é perfeitamente recomendável.

---

\* Ver Anexo 2, no que concerne às recomendações do CIPM e do CCDS (agora chamado de CCTF) relativas à definição do Tempo Atômico Internacional.

## 2.4 CORRENTE ELÉTRICA

• CIPM, 1946, RESOLUÇÃO 2 (PV, 20, 129-137): DEFINIÇÕES DAS UNIDADES ELÉTRICAS\*

.....

4º) Definições das unidades mecânicas utilizadas nas definições das unidades elétricas:

Unidade de força - A unidade de força [no Sistema MKS (Metro, Quilograma, Segundo)] é a força que comunica a uma massa de 1 quilograma a aceleração de 1 metro por segundo, por segundo.

Joule (unidade de energia ou de trabalho) - O joule é o trabalho produzido quando o ponto de aplicação de 1 unidade MKS de força (newton) se desloca de uma distância igual a 1 metro na direção da força.

Watt (unidade de potência) - O watt é a potência que desenvolve uma produção de energia igual a 1 joule por segundo.

B) Definições das unidades elétricas. O Comitê (internacional) admite as seguintes proposições que definem a grandeza teórica das unidades elétricas:

Ampère (unidade de intensidade de corrente elétrica) - O ampère é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível e situados no vácuo à distância de 1 metro um do outro, produziria entre esses condutores uma força igual a  $2 \times 10^{-7}$  unidade MKS de força (newton) por metro de comprimento.

Volt (unidade de diferença de potencial e de força eletromotriz) - O volt é a diferença de potencial elétrico que existe entre dois pontos de um fio condutor transportando uma corrente constante de 1 ampère, quando a potência dissipada entre esses pontos é igual a 1 watt.

Ohm (unidade de resistência elétrica) - O ohm é a resistência elétrica que existe entre dois pontos de um condutor quando uma diferença de potencial constante de 1 volt, aplicada entre esses dois pontos, produz, nesse condutor, uma corrente de 1 ampère, não tendo esse condutor nenhuma força eletromotriz.

Coulomb (unidade de quantidade de eletricidade) - O coulomb é a quantidade de eletricidade transportada em 1 segundo por uma corrente de 1 ampère.

---

\* As definições contidas nessa Resolução foram aprovadas pela 9ª CGPM (CR, 49), que também adotou o nome newton (Resolução 7) para a unidade MKS de força.

Farad (unidade de capacitância) - O farad é a capacidade de um condensador elétrico, entre as armaduras do qual se manifesta uma diferença de potencial elétrico de 1 volt, quando ele é carregado por uma quantidade de eletricidade igual a 1 coulomb.

Henry (unidade de indutância elétrica) - O henry é a indutância elétrica de um circuito fechado dentro do qual é produzida uma força eletromotriz de 1 volt quando a corrente elétrica que percorre o circuito varia uniformemente à razão de 1 ampère por segundo.

Weber (unidade de fluxo magnético) - O weber é o fluxo magnético que, atravessando um circuito de uma única espira, desenvolveria nele uma força eletromotriz de 1 volt se fosse reduzido a zero em 1 segundo em decréscimo uniforme.

- 14ª CGPM, 1971 (CR, 78): PASCAL; SIEMENS

A 14ª CGPM (CR, p. 59) adotou os nomes especiais *pascal* (símbolo Pa) para a unidade SI newton por metro quadrado e *siemens* (símbolo S) para a unidade SI de condutância elétrica (ohm elevado a potência menos um).

## 2.5 TEMPERATURA TERMODINÂMICA

- 9ª CGPM, 1948, RESOLUÇÃO 3 (CR, 55 E 63): PONTO TRIPLO DA ÁGUA; ESCALA TERMODINÂMICA COM UM SÓ PONTO FIXO; UNIDADE DE QUANTIDADE DE CALOR (JOULE)

1) No estado atual da técnica, o ponto triplo da água é suscetível de constituir um marco termométrico com precisão maior que o ponto de fusão do gelo.

Conseqüentemente, o Comitê Consultivo (de Termometria e Calorimetria) acha que o zero da escala termodinâmica centesimal deve ser definido como sendo a temperatura inferior em 0,0100 grau à do ponto triplo da água pura.

2) O Comitê Consultivo (de Termometria e Calorimetria) admite o princípio de uma escala termodinâmica absoluta comportando apenas um ponto fixo fundamental, constituído atualmente pelo ponto triplo da água pura, cuja temperatura absoluta será fixada anteriormente.

A introdução dessa nova escala não afeta em nada o emprego da Escala Internacional, que continua sendo a escala prática aconselhada.

3) A unidade de quantidade de calor é o joule.

*Nota:* Solicita-se que os resultados de experiências calorimétricas sejam sempre que for possível expressos em joules. Se as experiências forem feitas por comparação com um aquecimento d'água (e quando por qualquer razão não se possa prescindir do emprego da caloria), deverão ser fornecidas todas as informações necessárias para a conversão em joules. Fica o Comitê Internacional, após parecer do Comitê Consultivo de Termometria e Calorimetria, encarregado de estabelecer uma tabela que apresentará, em joules, por grau, os valores mais precisos que possam resultar das experiências relativas ao calor específico da água.

Uma tabela, estabelecida segundo solicitação, foi aprovada pelo Comitê Internacional, em 1950 (PV, 22, 92).

- CIPM, 1948, (PV, 21, 88) E 9ª CGPM, 1948 (CR,64): ADOÇÃO DO “GRAU CELSIUS”

Entre as três expressões (grau centígrado, grau centesimal, grau Celsius) propostas para significar o grau de temperatura, o CIPM escolheu grau Celsius (PV, 21, 88).

Esta denominação foi igualmente adotada pela Conferência Geral (CR, 64).

- 10ª CGPM, 1954, RESOLUÇÃO 3 (CR, 79): DEFINIÇÃO DA ESCALA TERMODINÂMICA DE TEMPERATURA

A Décima Conferência Geral de Pesos e Medidas decide definir a escala termodinâmica de temperatura por meio do ponto triplo da água como ponto fixo fundamental, atribuindo-lhe a temperatura de 273,16 graus kelvin, exatamente.\*

- 10ª CGPM, 1954, RESOLUÇÃO 4 (CR, 79): DEFINIÇÃO DA ATMOSFERA NORMAL

A Décima Conferência Geral de Pesos e Medidas, havendo constatado que a definição da atmosfera normal dada pela Nona Conferência Geral de Pesos e Medidas na definição da Escala Internacional de Temperatura induziu alguns físicos a pensarem que a validade daquela definição da atmosfera normal ficava limitada às necessidades da termometria de precisão,

---

\* A 13ª CGPM (1967-1968; Resolução 4) definiu explicitamente o kelvin.



declara que adota, para todos os usos, a definição:

1 atmosfera normal = 1 013 250 dinas por centímetro quadrado, isto é, 101 325 newtons por metro quadrado.

• 13ª CGPM, 1967-1968, RESOLUÇÃO 3 (CR, 104 E METROLOGIA, 1968, 4, 43): UNIDADE SI DE TEMPERATURA TERMODINÂMICA (KELVIN)\*

A Décima Terceira Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando:

– que os nomes *grau kelvin* e *grau*, os símbolos °K e deg e as regras de seu emprego contidas na Resolução 7 da Nona Conferência Geral (1948), na Resolução 12 da Décima Primeira Conferência Geral (1960) e a decisão tomada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em 1962 (*Procès-Verbaux*, 30, p. 27);

– que a unidade de temperatura termodinâmica e a unidade de intervalo de temperatura são uma mesma unidade, que deveria ser designada por um nome único e por um símbolo;

decide:

1º) a unidade de temperatura termodinâmica é designada pelo nome kelvin e seu símbolo é K;

2º) este mesmo nome e este mesmo símbolo são utilizados para exprimir um intervalo de temperatura;

3º) um intervalo de temperatura pode também ser expresso em graus Celsius;

4º) as decisões mencionadas no primeiro *considerando* a respeito do nome da unidade de temperatura termodinâmica, seu símbolo e a designação da unidade para exprimir um intervalo ou diferença de temperatura são revogadas, porém os usos decorrentes daquelas decisões continuam admitidos temporariamente.

---

\* Na sessão de 1980, o CIPM aprovou o relatório da 7ª Sessão do CCU estabelecendo que o emprego dos símbolos “°K” e “deg” não é mais admitido.

- 13ª CGPM, 1967-1968, RESOLUÇÃO 4 (CR, 104 E METROLOGIA, 1968, 4, 43): DEFINIÇÃO DA UNIDADE SI DE TEMPERATURA TERMODINÂMICA (KELVIN)\*

A Décima Terceira Conferência Geral de Pesos e Medidas

considerando que é necessário especificar por uma redação explícita a definição da unidade de temperatura termodinâmica contida na Resolução 3 da Décima Conferência Geral (1954);

decide exprimir essa definição do modo seguinte:

“O kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração  $1/273,16$  da temperatura termodinâmica do ponto tríplice da água.”

## 2.6 QUANTIDADE DE MATÉRIA

- 14ª CGPM, 1971, RESOLUÇÃO 3 (CR, 78 E METROLOGIA, 1972, 8, 36): UNIDADE SI DE QUANTIDADE DA MATÉRIA (MOL)\*\*

A Décima Quarta Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando os pareceres da União Internacional de Física Pura e Aplicada, União Internacional de Química Pura e Aplicada, e da Organização Internacional de Normalização a propósito da necessidade de definir uma unidade de quantidade de matéria,

decide:

1º) O mol é a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 quilograma de carbono 12,\*\* o seu símbolo é mol.

2º) Quando se utiliza o mol, as entidades elementares devem ser especificadas e podem ser átomos, moléculas, íons elétrons, outras partículas ou agrupamentos especificados de tais partículas.

3º) O mol é uma unidade de base do Sistema Internacional de Unidades.

\* Ver Recomendação 5 (CI-1989) do CIPM relativa à Escala Internacional de Temperatura de 1990 (Anexo 2).

\*\* Na sessão de 1980, o CIPM aprovou o relatório da 7ª Sessão do CCU (1980) estabelecendo que “nesta definição deve-se entender que a referência é aos átomos de carbono 12 não livres, em repouso e no seu estado fundamental”.

## 2.7 INTENSIDADE LUMINOSA

• CIPM, 1946, RESOLUÇÃO (PV 20, 119-122): DEFINIÇÃO DAS UNIDADES FOTOMÉTRICAS\*

4º) As unidades fotométricas podem ser definidas como segue:

Vela nova (unidade de intensidade luminosa) — O valor da vela nova é tal que a brilhância do radiador integral à temperatura de solidificação da platina corresponda a 60 velas novas por centímetro quadrado.

Lúmen novo (unidade de fluxo luminoso) — O lúmen novo é o fluxo luminoso emitido no interior do ângulo sólido (unidade esterradiano) por uma fonte puntiforme uniforme tendo a intensidade luminosa de 1 vela nova.

5º) .....

• 13ª CGPM, 1967-1968, RESOLUÇÃO 5 (CR, 104 E METROLOGIA, 1968, 4, 43-44): UNIDADE SI DE INTENSIDADE LUMINOSA (CANDELA)\*\*

A Décima Terceira Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando:

A definição da unidade de intensidade luminosa ratificada pela Nona Conferência Geral (1948) e contida na “Resolução referente à mudança das unidades fotométricas” adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em 1946 (*Procès-Verbaux*, 20, p. 119), em virtude dos poderes conferidos pela Oitava Conferência Geral (1933);

– que esta definição determina satisfatoriamente a grandeza da unidade de intensidade luminosa, porém admite críticas à sua redação;

decide exprimir a definição da candela do modo seguinte:

“A candela é a intensidade luminosa, na direção perpendicular, de uma superfície de 1/600 000 metros quadrados de um corpo negro à temperatura de solidificação da platina sob pressão de 101 325 newtons por metro quadrado.”

---

\* As duas definições contidas nessa Resolução foram ratificadas pela 9ª CGPM (1948), que também aprovou o nome de candela dado à “vela nova” (CR, 54). Para o lúmen, o qualificativo “novo” foi abandonado.

A definição da candela foi modificada pela 13ª CGPM (1967-1968, Resolução 5).

\*\* Definição revogada pela 16ª CGPM (1979, Resolução 3).

- 16ª CGPM, 1979, RESOLUÇÃO 3 (CR, 100 E METROLOGIA, 1980, 16, 56):  
UNIDADE SI DE INTENSIDADE LUMINOSA (CANDELA)

A Décima Sexta Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando:

– que, apesar dos esforços dignos de se conferirem elogios aos laboratórios, ainda existem divergências entre os resultados obtidos para o padrão primário atual da candela, com o emprego do corpo negro,

– que as técnicas radiométricas se desenvolvem rapidamente, atingindo precisão análoga àquela da fotometria e que essas técnicas são empregadas nos laboratórios nacionais para reproduzir a candela sem recorrer ao corpo negro,

– que a relação entre as grandezas luminosas da fotometria e as grandezas energéticas, de valor conhecido como 683 lúmens por watt para eficácia luminosa espectral da radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  hertz, foi adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em 1977,

– que este valor é suficientemente exato para o sistema das grandezas luminosas fotópicas, e que só conduz a uma variação de cerca de 3% para o sistema das grandezas luminosas escotópicas, conseqüentemente assegurando uma satisfatória continuidade,

– que se deve à candela uma definição capaz de melhorar a obtenção dos padrões fotométricos e sua precisão, desde que se aplique às grandezas fotópicas e escotópicas da fotometria e às grandezas a definir no domínio mesópico,

decide:

1º) A candela é a intensidade luminosa, numa direção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  hertz e cuja intensidade energética nessa direção é  $1/683$  watt por esterradiano.

2º) A definição da candela (antes chamada vela nova) decidida pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em 1946 em virtude dos apelos da 8ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) em 1933, ratificada pela 9ª CGPM em 1948, depois corrigida pela 13ª CGPM em 1967, está revogada.



# 3 Decisões relativas às unidades SI derivadas e suplementares

## 3.1 UNIDADES SI DERIVADAS

- 12ª CGPM, 1964, RESOLUÇÃO 7 (CR, 94): CURIE\*

A Décima Segunda Conferência Geral de Pesos e Medidas

considerando:

– que há muito tempo o curie é utilizado em numerosos países como unidade para a atividade dos radionuclídios;

reconhecendo que, no Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade dessa atividade é o segundo elevado à potência menos um ( $s^{-1}$ );

admite que o curie seja ainda conservado como unidade não pertencente ao Sistema Internacional, para a atividade, com o valor  $3,7 \times 10^{10} s^{-1}$ . O símbolo desta unidade é Ci.

- 13ª CGPM, 1967-1968, RESOLUÇÃO 6 (CR, 105 E METROLOGIA, 1968, 4, 44): UNIDADES SI DERIVADAS \*\*

A Décima Terceira Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando que é necessário incluir outras unidades derivadas na lista do parágrafo 4º da Resolução 12 da Décima Primeira Conferência Geral (1960).

---

\* O nome “becquerel” (Bq) foi adotado pela 15ª CGPM (1975, Resolução 8) para a unidade SI de atividade:  $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10}\text{Bq}$ .

\*\* A unidade de atividade recebeu um nome especial e um símbolo particular na 15ª CGPM (1975, Resolução 8).

decide acrescentar àquela lista:

número de ondas	1 por metro	$m^{-1}$
entropia	joule por kelvin	J/K
calor específico	joule por quilograma kelvin	J/(kg.K)
condutividade térmica	watt por metro kelvin	W/(m.K)
intensidade energética	watt por esterradiano	W/sr
atividade (de uma fonte radioativa)	1 por segundo	$s^{-1}$

• 15ª CGPM, 1975, RESOLUÇÕES 8 E 9 (CR, 105 E METROLOGIA, 11, 1980):  
UNIDADES SI PARA AS RADIAÇÕES IONIZANTES (BECQUEREL, GRAY)\*

A 15ª Conferência Geral de Pesos e Medidas,

– em razão da urgência, expressa pela Comissão Internacional das Unidades de Medidas de Radiações (ICRU), no sentido de estender o uso do Sistema Internacional de Unidades às pesquisas e às aplicações da radiologia,

– em vista da necessidade de tornar tão simples quanto possível o uso das unidades aos não-especialistas,

– tendo em conta também a gravidade dos riscos de erros na terapêutica,

adota o nome especial seguinte da unidade SI para atividade:

*becquerel*, símbolo Bq, igual ao segundo elevado à potência menos 1 (Resolução 8),

adota o nome especial seguinte da unidade SI para os raios ionizantes:

*gray*, símbolo Gy, igual ao joule por quilograma. (Resolução 9)

*Nota:* O gray é a unidade SI de dose absorvida. No domínio das radiações ionizantes, o gray pode ser também empregado com outras grandezas físicas que se exprimem também em joules por quilograma; o Comitê Consultivo de Unidades está encarregado de estudar este assunto em colaboração com as organizações internacionais competentes.

---

\* Em sua sessão de 1976, o CIPM aprovou o relatório da 5ª Sessão do CCU (1976) declarando que segundo o aviso do ICRU, o gray pode ser empregado também para exprimir a energia específica, o kerma e o índice de dose absorvida.

- 16ª CGPM, 1979, RESOLUÇÃO 5 (CR, 100 E METROLOGIA, 1980, 16, 56):  
NOME ESPECIAL PARA A UNIDADE SI DE EQUIVALENTE DE DOSE (SIEVERT)\*

A Décima Sexta Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando:

- o esforço feito para introduzir as unidades SI no domínio das irradiações ionizantes.
- os riscos a que estão expostos os seres humanos submetidos às irradiações subestimadas, riscos que podem resultar da confusão entre dose absorvida e equivalente de dose.
- que a proliferação de nomes especiais representa um perigo para o Sistema Internacional de Unidades e deve ser evitado na medida do possível, mas que esta regra pode ser transgredida desde que se trate de salvaguardar a saúde humana, adota:
- o nome especial sievert, símbolo Sv, para a unidade SI de equivalente de dose, no domínio da radioproteção. O sievert é igual ao joule por quilograma.

- CIPM, 1984, RECOMENDAÇÃO 1 (PV, 52, 31 E METROLOGIA, 1985, 21, 90):  
SOBRE O SIEVERT

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas,

considerando a confusão que continua a existir a respeito da Resolução 5 votada pela 16ª CGPM (1979),

decide introduzir a seguinte explicação na publicação “Sistema Internacional de Unidades (SI)”:

A grandeza equivalente de dose  $H$  é o produto da dose absorvida  $D$  de radiações ionizantes e de dois fatores sem dimensão,  $Q$  (fator de qualidade) e  $N$  (produto de todos os outros fatores da multiplicação), prescritos pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica.

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

Assim, para uma radiação dada, o valor numérico de  $H$  em joules por quilograma pode ser diferente do valor numérico de  $D$  em joules por quilograma, pois ela é função do valor  $Q$  e de  $N$ .

---

\* O Comitê Internacional (1984, Recomendação 1) decidiu acompanhar essa Resolução da explicação a seguir.



Para evitar qualquer risco de confusão entre a dose absorvida D e o equivalente de dose H, é preciso empregar os nomes especiais para as unidades correspondentes, isto é, é necessário utilizar o nome gray no lugar de joule por quilograma para a unidade de dose absorvida D e o nome sievert no lugar de joule por quilograma para a unidade de equivalente de dose H.

### 3.2 UNIDADES SI SUPLEMENTARES

- CIPM, 1980, RECOMENDAÇÃO 1(PV 48, 24 E METROLOGIA, 1981, 17, 72): UNIDADES SI SUPLEMENTARES (RADIANO E ESTERRADIANO)\*

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas, levando em consideração a Resolução 3 adotada pelo ISO/TC 12, em 1978, e a Recomendação U1 (1980) adotada pelo Comitê Consultivo das Unidades (CCU) em sua 7ª Sessão,

considerando:

– que as unidades radiano e esterradiano são introduzidas usualmente nas expressões das unidades por exigência de clareza, notadamente em fotometria, onde o esterradiano representa um papel importante na distinção das unidades que correspondem às diversas grandezas,

– que, nas equações utilizadas se exprime geralmente o ângulo plano como a relação entre dois comprimentos e o ângulo sólido como a relação entre uma área e o quadrado de um comprimento, e que, por conseguinte, essas grandezas são tratadas como grandezas sem dimensão,

– que o estudo dos formalismos usados no domínio científico mostra que nada existe que seja ao mesmo tempo coerente e convincente para que as grandezas ângulo plano e ângulo sólido possam ser consideradas como grandezas de base,

considerando também

– que a interpretação feita pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) em 1969 para a classe das unidades suplementares introduzidas pela Resolução 12 da 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, em 1960, dá a liberdade de se tratar o radiano e o esterradiano como unidades de base do Sistema Internacional,

– que esta possibilidade compromete a coerência interna do Sistema Internacional estabelecido com apenas sete unidades de base,

---

\* A classe de unidades suplementares, no SI, foi eliminada por decisão da 20ª CGPM (1995, Resolução 8).

decide

interpretar a classe das unidades suplementares no Sistema Internacional como uma classe de unidades derivadas, sem dimensão, para as quais a Conferência Geral de Pesos e Medidas dá a liberdade de ser utilizada ou não dentro das expressões das unidades derivadas do Sistema Internacional.

- 20ª CGPM, 1995, RESOLUÇÃO 8 (CR, 121 E METROLOGIA, 1996, 33, 83):  
ELIMINAÇÃO DA CLASSE DE UNIDADES SUPLEMENTARES NO SI

A 20ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, considerando:

– que a Resolução 12 da Décima Primeira Conferência Geral, em 1960, estabelecendo o Sistema Internacional de Unidades, SI, distinguiu três classes de unidades: unidades de base, unidades derivadas e unidades suplementares, compreendendo, essa última, apenas o radiano e o esterradiano,

– que o status das unidades suplementares, em relação às unidades de base e às unidades derivadas, é susceptível de discussão,

– que o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), em 1980, observando que o status ambíguo das unidades suplementares compromete a coerência interna do SI, interpretou, na Recomendação 1 (CI-1980), as unidades suplementares no SI como unidades derivadas sem dimensão,

aprovando a interpretação dada pelo CIMP, em 1980.

decide:

– interpretar as unidades suplementares, no SI, isto é, o radiano e o esterradiano, como unidades derivadas sem dimensão, cujos nomes e símbolos podem ser utilizados, mas não necessariamente, nas expressões de outras unidades derivadas SI, conforme as necessidades,

– e, por conseguinte, eliminar a classe de unidades suplementares, como classe separada no SI.



# 4 Decisões relativas à terminologia e às unidades em uso com o SI

## 4.1 PREFIXOS SI

- 12ª CGPM, 1964, RESOLUÇÃO 8 (CR, 94): PREFIXOS SI FEMTO E ATTO\*

A Décima Segunda Conferência Geral de Pesos e Medidas

decide acrescentar à lista de prefixos para a formação dos nomes de múltiplos e submúltiplos das unidades, adotadas pela Décima Primeira Conferência Geral, Resolução 12, parágrafo 3º, os dois novos prefixos seguintes:

FATOR PELO QUAL A UNIDADE É MULTIPLICADA	PREFIXO	SÍMBOLO
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

- 15ª CGPM, 1975, RESOLUÇÃO 10 (CR, 106 E METROLOGIA, 1975, 11, 180-181): PREFIXOS SI PETA E EXA\*\*

A 15ª Conferência Geral de Pesos e Medidas,

decide acrescentar à lista dos prefixos SI para formação dos nomes dos múltiplos das unidades, adotada pela 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, Resolução 12, parágrafo 3º, os dois prefixos seguintes:

FATOR PELO QUAL A UNIDADE É MULTIPLICADA	PREFIXO	SÍMBOLO
$10^{15}$	peta	P
$10^{18}$	exa	E

\* Novos prefixos foram acrescentados pela 15ª CGPM (1975, Resolução 10).

\*\* Novos prefixos foram acrescentados pela 19ª CGPM (1991, Resolução 4).

- 19ª CGPM, 1991, RESOLUÇÃO 4 (CR, 97 E METROLOGIA 1992, 29, 3):  
PREFIXOS ZETTA, ZEPTO, YOTTA E YOCTO\*

A 19ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) decide acrescentar à lista dos prefixos SI para formação dos nomes dos múltiplos e submúltiplos das unidades, adotada pela 11ª CGPM, Resolução 12, parágrafo 3, pela 12ª CGPM, Resolução 8, e pela 15ª CGPM, Resolução 10, os seguintes.

FATOR PELO QUAL A UNIDADE É MULTIPLICADA	PREFIXO	SÍMBOLO
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

#### 4.2 SÍMBOLOS DE UNIDADES E DOS NÚMEROS

- 9ª CGPM, 1948, RESOLUÇÃO 7 (CR, 70): GRAFIA DOS SÍMBOLOS DE UNIDADES E DOS NÚMEROS\*\*

##### Princípios

Os símbolos das unidades são expressos em caracteres romanos, em geral minúsculos; todavia, se os símbolos são derivados de nomes próprios, são utilizados caracteres romanos maiúsculos. Esses símbolos não são seguidos de ponto.

Nos números, a vírgula (maneira francesa) ou o ponto (modo britânico) são utilizados somente para separar a parte inteira dos números de sua parte decimal. A fim de facilitar a leitura, os números podem ser repartidos em grupos de três algarismos cada um; estes grupos nunca são separados por pontos, nem por vírgulas.

\* Os nomes zepto e zetta são derivados de septo, sugerindo o algarismo sete (sétima potência de  $10^3$ ), e a letra “z” substitui a letra “s”, a fim de evitar duplicidade de uso da letra “s” como símbolo.

Os nomes yocto e yotta são derivados de octo, sugerindo o algarismo oito (oitava potência de  $10^3$ ), e a letra “y” foi incluída, a fim de evitar o uso da letra “o” como símbolo, por causa da possível confusão com o algarismo zero.

\*\* A Conferência Geral revogou um certo número de decisões relativas às unidades e à terminologia, em especial aquelas relativas ao micron e ao grau absoluto e aos termos “grau” e “deg” (13ª CGPM, 1967-1968, Resoluções 7 e 3, e 16ª CGPM, 1979, Resolução 6).

UNIDADES	SÍMBOLO	UNIDADES	SÍMBOLO
•metro	m	ampère	A
•metro quadrado	m <sup>2</sup>	volt	V
•metro cúbico	m <sup>3</sup>	watt	W
•micron	μ	ohm	Ω
•litro	l	coulomb	C
•grama	g	farad	F
•tonelada	t	henry	H
segundo	s	hertz	Hz
erg	erg	poise	P
dina	dyn	newton	N
grau Celsius	°C	candela (vela nova)	cd
•grau absoluto	°K	lux	lx
caloria	cal	lúmen	lm
bar	bar	stilb	sb
hora	h		

*Notas:*

1. Os símbolos correspondentes às unidades precedidas de um ponto são os que tinham sido adotados anteriormente por decisão do Comitê Internacional.
2. A unidade de volume *estere*, empregada na medição da madeira, terá por símbolo “st” e não mais “s”, que lhe tinha sido dado previamente pelo Comitê Internacional.
3. Tratando-se não de uma temperatura, porém de um intervalo ou uma diferença de temperatura, a palavra “grau” deve ser escrita com todas as letras, ou pela abreviatura deg.

**4.3 NOMES  
DE UNIDADES**

- **13ª CGPM, 1967-1968, RESOLUÇÃO 7 (CR, 105 E METROLOGIA, 1968, 4, 44): REVOGAÇÃO DE DECISÕES ANTERIORES (MICRON, VELA NOVA)**

A Décima Terceira Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando que decisões tomadas ulteriormente pela Conferência Geral, a respeito do Sistema Internacional de Unidades, estão em contradição com algumas partes da Resolução 7 da Nona Conferência Geral (1948),

decide, em conseqüência, suprimir da Resolução 7 da Nona Conferência:

1º) O nome de unidade *micron* e o símbolo “ $\mu$ ” que foi atribuído a esta unidade e que se tornou um prefixo;

2º) O nome de unidade *vela nova*.

**4.4 UNIDADES  
EM USO COM O SI;  
EXEMPLO: O LITRO**

- 3ª CGPM, 1901, (CR, 38-39): DECLARAÇÃO RELATIVA À DEFINIÇÃO DO LITRO\*  
.....

A Conferência declara:

1º) A unidade de volume, para determinações de alta precisão, é o volume ocupado pela massa de 1 quilograma de água pura em sua densidade máxima e sob pressão atmosférica normal; este volume é chamado de “litro”.

2º) .....

- 11ª CGPM, 1960, RESOLUÇÃO 13 (CR, 88): DECÍMETRO CÚBICO E LITRO

A Décima Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas

considerando:

– que o decímetro cúbico e o litro não são iguais, existindo entre eles uma diferença da ordem de 18 milionésimos;

– que as determinações de grandezas físicas envolvendo medições de volume requerem uma exatidão cada vez mais apurada, o que agrava as conseqüências de uma possível confusão entre o decímetro cúbico e o litro;

convida o Comitê Internacional de Pesos e Medidas a estudar este problema e apresentar suas conclusões à Décima Segunda Conferência Geral.

- CIPM, 1961, RECOMENDAÇÃO (PV, 29, 34): DECÍMETRO CÚBICO E LITRO

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas recomenda que os resultados das medições precisas de volume sejam expressos em unidades do Sistema Internacional, e não em litros.

---

\* Definição revogada pela 12ª CGPM (1964, Resolução 6).

- 12ª CGPM, 1964, RESOLUÇÃO 6 (CR, 93): LITRO

A Décima Segunda Conferência Geral de Pesos e Medidas

considerando a Resolução 13 adotada pela Décima Primeira Conferência Geral, em 1960, e a Recomendação adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas na sua sessão de 1961,

1º) abole a definição do litro dada em 1901 pela Terceira Conferência Geral de Pesos e Medidas;

2º) declara que a palavra *litro* pode ser utilizada como nome especial aplicado ao decímetro cúbico;

3º) recomenda que o nome *litro* não seja utilizado para exprimir resultados de medidas de volume de alta precisão.

- 16ª CGPM, 1979, RESOLUÇÃO 6 (CR, 101 E METROLOGIA, 1980, 16, 56-57): SÍMBOLO DO LITRO

A Décima Sexta Conferência Geral de Pesos e Medidas,

– reconhecendo os princípios gerais adotados para a escrita dos símbolos das unidades na Resolução 7 da 9ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (1948),

– considerando que o símbolo l para a unidade de litro foi adotado pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em 1870 e confirmado pela Resolução de 1948,

– considerando também que, para evitar confusão entre a letra l e o algarismo 1, vários países adotam o símbolo L em vez de l para a unidade de litro,

– considerando que o nome litro, mesmo não estando incluído no Sistema Internacional de Unidades, deve ser admitido para uso geral com o Sistema,

decide:

a título excepcional, adotar os dois símbolos l e L como símbolos utilizáveis para a unidade litro,

mas, considerando que um só desses símbolos deve permanecer, convida o Comitê Internacional de Pesos e Medidas para examinar o emprego desses dois símbolos e informar a 18ª Conferência Geral de Pesos e



Medidas para analisar sobre a possibilidade de suprimir um dos dois. No Brasil adota-se a letra l (manuscrita) como símbolo do litro e na falta desta, a letra L (maiúscula).\*

---

\* O Comitê Internacional considerou, ainda, prematura, em 1990, a escolha de um único símbolo para o litro.

# Anexo 2

## Realização Prática das Definições das Principais Unidades

O presente Anexo se refere à realização prática das definições das principais unidades do SI. São mencionadas as decisões da Conferência Geral e do Comitê Internacional relativas à realização atual das unidades e apresentada a estrutura na qual os laboratórios de metrologia devem trabalhar para que as unidades por eles realizadas estejam de acordo com o SI.



# 1 Comprimento

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) adotou, em 1997, a Recomendação 1 (CI-1997), que especifica e atualiza as regras para realização prática da definição do metro:

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas, lembrando:

– que, em 1983, a 17<sup>a</sup> Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) adotou uma nova definição do metro;

– que, na mesma data, o CGPM solicitou ao Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) para:

- elaborar instruções para a realização prática da nova definição do metro;
- escolher as radiações que possam ser recomendadas como padrões de comprimento de onda para a medida interferencial de comprimentos e estabelecer instruções para o seu emprego;
- desenvolver estudos com vista a aprimorar esses padrões e complementar ou revisar, em consequência, essas instruções;

– que, em resposta a essa solicitação, o CIPM adotou a Recomendação 1 (CI - 1983 - Realização Prática da Definição do Metro):

- que o metro seja realizado por um dos métodos seguintes:
  - a) por meio do comprimento  $l$  do trajeto percorrido no vácuo por uma onda eletromagnética plana durante um intervalo de tempo  $t$ ; este comprimento é obtido a partir da medição do intervalo de tempo  $t$ , utilizando a relação  $l = c_0 t$  e o valor da velocidade da luz no vácuo  $c_0 = 299\,792\,458\text{m/s}$ ;
  - b) por meio do comprimento de onda no vácuo  $\lambda$ , de uma onda eletromagnética plana de frequência  $f$ ; este comprimento de onda é obtido a partir da medida da frequência  $f$ , utilizando a relação  $\lambda = c_0/f$  e o valor da velocidade da luz no vácuo  $c_0 = 299\,792\,458\text{m/s}$ ;

---

\* É comum se utilizar a notação  $c_0$  para a velocidade da luz no vácuo (ISO 31). A notação  $c$  havia sido utilizada no texto original da Recomendação de 1983.

c) por meio de uma das radiações da lista seguinte, radiações para as quais pode-se utilizar o valor dado do comprimento de onda no vácuo ou da frequência, com incerteza indicada, providenciando-se a observação das condições especificadas e o modo operatório reconhecido como apropriado;

– e que em todos os casos as correções necessárias sejam aplicadas levando em conta as condições reais, tais como difração, gravitação ou imperfeição do vácuo.

– que o CIPM recomendou uma lista de radiações, com esse objetivo; lembrando, também, que, em 1992, o CIPM elaborou revisão da realização prática da definição do metro;

considerando:

– que a ciência e a tecnologia continuam a exigir uma melhor exatidão na realização do metro;

– que, a partir de 1992, os trabalhos realizados nos laboratórios nacionais, no BIPM e em outros laboratórios permitiram identificar novas radiações e métodos para sua operação, que conduzem a menores incertezas;

– que esses trabalhos permitem, também, reduzir sensivelmente a incerteza do valor da frequência e do comprimento de onda no vácuo de uma das radiações recomendadas anteriormente;

– que uma atualização da lista de radiações recomendadas é desejável para diversas aplicações que compreendem, não somente a realização direta do metro, implicando a interferometria óptica para a medição prática de comprimentos, como também, a espectroscopia, a física atômica e molecular e a determinação de constantes físicas fundamentais;

recomenda:

– que a lista de radiações recomendadas, dada pelo CIPM em 1992 (Recomendação 3, CI-1992) seja substituída pela lista de radiações dada a seguir.

– que a nota seguinte, referente à relatividade geral, seja adicionada às regras para realização do metro:

No contexto da relatividade geral, o metro é considerado como uma unidade de comprimento própria. Então, sua definição se aplica, somente, num domínio espacial suficientemente pequeno, para o qual os efeitos da não-uniformidade do campo gravitacional podem ser ignorados. Nesse caso, os únicos efeitos considerados são os efeitos da relatividade restrita. Os métodos locais para realização do metro

recomendado em b) e c), fornecem o metro próprio, mas o método recomendado em a) não permite, necessariamente. O método recomendado em a) deverá, então, ser restrito a comprimentos  $l$  suficientemente curtos, para que os efeitos previstos pela relatividade geral sejam desprezíveis em relação às incertezas de medição. Para interpretação de medições, que não se aplicam a esse caso, é conveniente fazer referência ao relatório do Grupo de Trabalho do CCDS sobre Aplicação da Relatividade Geral em Metrologia (Application of General Relativity to Metrology, Metrologia, 97, 34, 261-290).

## LISTA DAS RADIAÇÕES RECOMENDADAS PARA A REALIZAÇÃO DO METRO APROVADA PELO CIPM EM 1997: FREQUÊNCIAS E COMPRIMENTOS DE ONDA NO VÁCUO

A presente lista substitui as listas publicadas nos PV, 1983, 51, 25-28; 1992, 60, 141-144 e na Metrologia, 1984, 19, 165-166; 1993-1994, 30, 523-541.

Nesta lista, os valores de frequência  $f$  e do comprimento de onda  $\lambda$  deveriam ser rigorosamente ligados pela relação  $\lambda f = c_0$ , com  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s, mas os valores de  $\lambda$  são arredondados.

Os resultados das medições utilizados para a compilação desta lista, e sua análise, são dados no anexo: “Dados utilizados para elaboração da lista de radiações recomendadas”, 1997, e bibliografia\*.

É necessário observar que, para várias dessas radiações recomendadas, só dispomos de poucos valores independentes; resulta que as incertezas estimadas podem não refletir todas as fontes de variações possíveis.

Cada uma dessas radiações pode ser substituída, sem perda de exatidão, por uma radiação correspondente a um outro componente da mesma transição, ou por uma outra radiação, quando a diferença de frequência correspondente é conhecida com uma exatidão suficiente.

É necessário, então, observar que, para se obter as incertezas dadas nessa lista, não é suficiente satisfazer as condições exigidas para os parâmetros mencionados; além disso, é necessário respeitar as condições experimentais consideradas como as mais apropriadas, segundo o método de estabilização utilizado. Aqui são descritos os números das publicações científicas e técnicas. Exemplos de condições experimentais consideradas como convenientes para determinada radiação são descritos nas publicações cujas referências podem ser obtidas junto aos laboratórios membros do CCDM ou no BIPM.

---

\* Para consultar esse anexo, ver o relatório do CCDM (1997).

## 1 RADIAÇÕES RECOMENDADAS DE LASERS ESTABILIZADOS

### 1.1 ÁTOMO ABSORVENTE $^1\text{H}$ , TRANSIÇÃO 15-25 A DOIS FÓTONS

Os valores  $f = 1\,233\,030\,706\,593,7$  kHz

$$\lambda = 243\,134\,624,6260 \text{ fm}$$

Com uma incerteza global relativa de  $8,5 \times 10^{-13}$ , se aplicam a uma radiação estabilizada numa transição a dois fótons numa faísca de hidrogênio frio. Os valores são corrigidos a fim de restabelecê-los a uma potência laser nula e para considerar o desvio Doppler de segunda ordem, o que conduz a átomos realmente estacionários.

Pode-se também utilizar outras transições absorventes no hidrogênio; essas transições são dadas no anexo M3 do relatório do CCDM (1997).

### 1.2 MOLÉCULA ABSORVENTE $^{127}\text{I}_2$ , TRANSIÇÃO 43-0, P (13), COMPONENTE $A_3$ (OU S).

Os valores  $f = 582\,490\,603,37$  MHz

$$\lambda = 514\,673\,466,4 \text{ fm}$$

Com uma incerteza global relativa de  $2,5 \times 10^{-10}$ , se aplicam a radiação emitida por um laser  $\text{Ar}^+$  estabilizado com o auxílio de uma célula de iodo, situada no exterior do laser, tendo um ponto frio à temperatura de  $-(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

### 1.3 MOLÉCULA ABSORVENTE $^{127}\text{I}_2$ , TRANSIÇÃO 32-0, R (56), COMPONENTE $A_{10}$

Os valores  $f = 563\,260\,223,48$  MHz

$$\lambda = 532\,245\,036,14 \text{ fm}$$

Com uma incerteza global relativa de  $7 \times 10^{-11}$ , se aplicam a radiação emitida por um laser Nd: YAC à frequência dupla absorvida com a ajuda de uma célula de iodo, situada no exterior do laser, tendo um ponto frio a uma temperatura situada entre  $-10^\circ\text{C}$  e  $20^\circ\text{C}$ . Pode-se utilizar outras transições absorventes de  $^{127}\text{I}_2$ , próximas dessa transição, fazendo-se referência às diferenças de frequência, abaixo, cuja incerteza global é  $u_c = 2$  kHz.

COMPRIMENTOS DE ONDA DE TRANSIÇÕES DE $^{127}\text{I}_2$	
Transição X	Diferença de frequência [f(x) - f(32-0, R(56), a <sub>10</sub> )]/kHz
32-0, R(57), a <sub>1</sub>	-50 946 880,4
32-0, P(54), a <sub>1</sub>	-47 588 892,5
35-0, P(119), a <sub>1</sub>	-36 840 161,5
33-0, R(86), a <sub>1</sub>	-32 190 404,0
34-0, R(106), a <sub>1</sub>	-30 434 761,5
36-0, R(134), a <sub>1</sub>	-17 173 680,4
33-0, P(83), a <sub>21</sub>	-15 682 074,1
32,0, R(56), a <sub>10</sub>	0
32,0, P(53), a <sub>1</sub>	+ 2 599 708,0

Aqui f (x) representa a frequência da transição denominada x, e f(32-0, R(56), a<sub>10</sub>), a frequência da transição de referência.

#### 1.4 MOLÉCULA ABSORVENTE $^{127}\text{I}_2$ , TRANSIÇÃO 26-0, R(12), COMPONENTE A<sub>9</sub>

Os valores  $f = 551\,579\,482,96$  MHz

$\lambda = 543\,516\,333,1$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $2,5 \times 10^{-10}$ , que resulta da radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado com o auxílio de uma célula de iodo, situada no exterior do laser, tendo um ponto frio à temperatura de  $(0 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

#### 1.5 MOLÉCULA ABSORVENTE $^{127}\text{I}_2$ , TRANSIÇÃO 9-2, R (47), COMPONENTE A<sub>7</sub> (OU O)

Os valores  $f = 489\,880\,354,9$  MHz

$\lambda = 611\,970\,770,0$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $3 \times 10^{-10}$ , que resulta da radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado com o auxílio de uma célula de iodo, situada no interior ou no exterior do laser, tendo um ponto frio à temperatura de  $(-5 \pm 2)^\circ\text{C}$ .



## 1.6 MOLÉCULA ABSORVENTE $^{127}\text{I}_2$ , TRANSIÇÃO 11-5, R (127), COMPONENTE $A_{13}$ (OU I)

Os valores  $f = 473\,612\,214\,705$  kHz

$\lambda = 632\,991\,398,22$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $2,5 \times 10^{-11}$ , que resulta da radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado pela técnica do terceiro harmônico com o auxílio de uma célula de iodo, situada no interior do laser, quando são respeitadas as seguintes condições:

- temperatura das paredes da célula:  $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ ;
- ponto frio à temperatura de:  $(15 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ ;
- modulação de frequência, da crista à cavidade:  $(6 \pm 0,3)$  MHz;
- potência transportada pelos feixes num único sentido, no interior da cavidade (isto é, potência de saída dividida pelo fator de transmissão do espelho de saída):  $(10 \pm 5)$  mW, para um valor absoluto do coeficiente de deslocamento em função da potência  $\leq 1,4$  kHz/mW.

Essas condições não são suficientes, por si próprias, para garantir a obtenção da incerteza global indicada. É necessário, além disso, que as partes, ótica e eletrônica, do sistema de estabilização funcionem com desempenhos apropriados. A célula de iodo pode, também, ser utilizada em condições menos rigorosas, o que conduz à incerteza maior, dada no Anexo M2 do relatório do CCDM (1997).

## 1.7 MOLÉCULA ABSORVENTE $^{127}\text{I}_2$ , TRANSIÇÃO 8-5, P (10), COMPONENTE $A_9$ (OU G)

Os valores  $f = 468\,218\,332,4$  MHz

$\lambda = 640\,283\,468,7$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $4,5 \times 10^{-10}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado com o auxílio de uma célula de iodo, situada no interior do laser, tendo um ponto frio à temperatura de  $(16 \pm 1)^\circ\text{C}$ , com uma amplitude de modulação de frequência, da crista à cavidade, de  $(6 \pm 1)$  MHz.

## 1.8 ÁTOMO ABSORVENTE $^{40}\text{Ca}$ , TRANSIÇÃO $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ ; $\Delta M_J = 0$

Os valores  $f = 455\,986\,240\,494,15$  kHz

$\lambda = 657\,459\,439,2917$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $6 \times 10^{-13}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser estabilizado com o auxílio de átomo de Ca. Esses valores correspondem à frequência média de dois componentes de recuo

de átomos que são efetivamente estacionários, isto é, os valores são corrigidos levando-se em conta o desvio Doppler de segunda ordem.

### 1.9 ION ABSORVENTE $^{88}\text{Sr}^+$ , TRANSIÇÃO $5^2\text{S}_{1/2} - 4^2\text{D}_{5/2}$

Os valores  $f = 444\,779\,044,04$  MHz

$\lambda = 674\,025\,590,95$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $1,3 \times 10^{-10}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser estabilizado na transição que se observa com o auxílio de um ion de Sr capturado e resfriado. Os valores correspondem ao centro do multiplet Zeeman.

### 1.10 ÁTOMO ABSORVENTE $^{85}\text{Rb}$ , TRANSIÇÃO $5\text{S}_{1/2} (F=3) - 5\text{D}_{5/2} (F=5)$ A DOIS FÓTONS

Os valores  $f = 385\,285\,142\,378$  kHz

$\lambda = 778\,105\,421,22$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $1,3 \times 10^{-11}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser estabilizado no centro da transição a dois fótons. Os valores se aplicam a uma célula de Rb, à uma temperatura inferior a  $100^\circ\text{C}$ ; esses valores são corrigidos para uma potência laser nula e para levar em conta o desvio Doppler de segunda ordem.

### 1.11 MOLÉCULA ABSORVENTE $\text{CH}_4$ , TRANSIÇÃO $\text{V}_3$ , (P7), COMPONENTE $\text{F}_2^{(2)}$

#### 1.11.1 OS VALORES

$f = 88\,376\,181\,600,18$  kHz

$\lambda = 3\,392\,231\,397,327$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $3 \times 10^{-12}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado com o auxílio da componente central [transição (7-6)] do triplet de estrutura hiperfina resolvida. Esses valores correspondem à frequência média dos dois componentes de recuo de moléculas efetivamente estacionárias, isto é, eles são corrigidos para levar em conta o desvio Doppler de segunda ordem.

#### 1.11.2 OS VALORES

$f = 88\,376\,181\,600,5$  kHz

$\lambda = 3\,392\,231\,397,31$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $2,3 \times 10^{-11}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado no centro da estrutura hiperfina não resolvida, com o auxílio de uma célula de metano, situada no interior ou no exterior do laser, à temperatura ambiente, quando são respeitadas as seguintes condições:

- pressão do metano  $\leq 3$  Pa;
- potência superficial média transportada pelos feixes num único sentido (isto é, potência superficial de saída dividida pelo fator de transmissão do espelho de saída), no interior da cavidade  $\leq 10^4 \text{Wm}^{-2}$ ;
- raio de curvatura das superfícies de onda  $\geq 1$  m;
- diferença relativa de potência entre as duas ondas que se propagam em sentido inverso uma da outra  $\leq 5\%$ ;
- receptor de estabilização colocado na saída do dispositivo de revestimento do tubo de He-Ne.

### 1.12 MOLÉCULA ABSORVENTE $\text{OsO}_4$ , TRANSIÇÃO EM COINCIDÊNCIA COM O RAIOS LASER $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ , R (12)<sup>4</sup>

Os valores  $f = 29\,096\,274\,952,34$  kHz

$\lambda = 10\,303\,465\,254,27$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $6 \times 10^{-12}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser  $\text{CO}_2$  estabilizado numa célula de  $\text{OsO}_4$ , à pressão inferior a 0,2Pa, situada no exterior do laser. Podemos utilizar outras transições; estas são indicadas no anexo M3 do relatório do CCDM (1997).

## 2. VALORES RECOMENDADOS DE RADIAÇÕES DE LÂMPADAS ESPECTRAIS E OUTRAS FONTES

### 2.1 RADIAÇÃO CORRESPONDENTE À TRANSIÇÃO ENTRE OS NÍVEIS $2P_{10}$ e $5d_5$ DO ÁTOMO $^{86}\text{KR}$

O valor  $\lambda = 605\,780\,210,3$  fm

Com uma incerteza relativa expandida,  $U = k u_c$  ( $k = 3$ ),  $4 \times 10^{-9}$  (igual a três vezes a incerteza global relativa de  $1,3 \times 10^{-9}$ ), se aplica à radiação emitida por um lâmpada de descarga, utilizada nas condições recomendadas pelo CIPM, em 1960 (PV, 28, 71-72 e CR, 1960, 85).\*

\* A incerteza que figura, no documento de 1960, era de  $1 \times 10^{-8}$  e foi, posteriormente, modificada e transformada para  $4 \times 10^{-9}$  (BIPM Com. Cons. Def. do Metro, 1973, 5, M12).

As condições são as seguintes:

A radiação do kriptônio 86 é realizada por meio de uma lâmpada de descarga a catodo quente contendo o kriptônio 86 de pureza não inferior a 99%, em quantidade suficiente para garantir a presença do kriptônio sólido à temperatura de 64K, estando essa lâmpada munida de um capilar com as seguintes características: diâmetro interno de 2 mm a 4 mm; espessura da parede de 1mm, aproximadamente.

Estima-se que o comprimento de onda da radiação emitida pela coluna positiva é igual, próximo a  $1 \times 10^{-8}$  em valor relativo, ao comprimento de onda correspondente à transição entre os níveis não perturbados, quando as condições a seguir são satisfeitas:

1. o capilar é observado no fim, de maneira que os raios luminosos utilizados caminham do lado catódico em direção ao lado anódico;
2. a parte inferior da lâmpada, compreendendo o capilar, é imersa num banho refrigerado, mantido a temperatura do ponto tríplice do nitrogênio, próximo a 1 grau;
3. a densidade de corrente no capilar é  $(0,3 \pm 0,1) \text{ A/cm}^2$ .

## 2.2 RADIAÇÃO DOS ÁTOMOS DO $^{86}\text{Kr}$ , $^{198}\text{Hg}$ E $^{114}\text{Cd}$

Em 1963, o CIPM (BIPM Com. Cons. Def. Metro, 1962, 3, 18-19 e PV, 52, 26-27) recomendou valores de comprimentos de onda no vácuo,  $\lambda$ , e incertezas, para certas transições dos átomos de  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{198}\text{Hg}$  e  $^{114}\text{Cd}$ , bem como as seguintes condições de utilização:\*

COMPRIMENTOS DE ONDA NO VÁCUO, $\lambda$ , DE TRANSIÇÕES DO $^{86}\text{Kr}$	
Transição	$\lambda/\mu\text{m}$
$2 p_9 - 5d'_4$	645 807,20
$2 p_8 - 5d_4$	642 280,06
$1 s_3 - 3p_{10}$	565 112,86
$1 s_4 - 3p_8$	450 361,62

Para o  $^{86}\text{Kr}$ , os valores acima se aplicam com uma incerteza de  $2 \times 10^{-8}$ , em valor relativo, às radiações emitidas por uma lâmpada operando em condições similares às aquelas mencionadas no subitem 2.1.

\* As incertezas citadas no subitem 2.2 correspondem às incertezas relativas expandidas  $U = K u_c$  ( $K = 3$ ), igual a três vezes a incerteza global relativa composta.

COMPRIMENTOS DE ONDA NO VÁCUO, $\lambda$ , DE TRANSIÇÕES DO $^{198}\text{Hg}$	
Transição	$\lambda/\mu\text{m}$
$6^1P_1 - 6^1D_2$	579 226,83
$6^1P_1 - 6^3D_2$	577 119,83
$6^3P_2 - 7^3S_1$	546 227,05
$6^3P_1 - 7^3S_1$	435 956,24

Para o  $^{198}\text{Hg}$ , os valores acima se aplicam, com uma incerteza de  $5 \times 10^{-8}$ , em valor relativo, às radiações emitidas por uma lâmpada de descarga, quando são observadas as seguintes condições:

- as radiações são produzidas por meio de uma lâmpada de descarga, sem eletrodos, contendo mercúrio 198, de pureza não inferior a 98% e de argônio a uma pressão compreendida entre 0,5 mm Hg e 1,0 mm Hg (66 Pa a 133 Pa);
- o diâmetro interno do capilar da lâmpada é de, aproximadamente, 5 mm, e as radiações são observadas transversalmente;
- a lâmpada é excitada por um campo de alta frequência de potência moderada; ela é mantida a uma temperatura inferior a  $10^\circ\text{C}$ ;
- o volume da lâmpada é, de preferência, superior a  $20 \text{ cm}^3$ .

COMPRIMENTOS DE ONDA NO VÁCUO, $\lambda$ , DE TRANSIÇÕES DO $^{114}\text{Cd}$	
Transição	$\lambda/\mu\text{m}$
$5^1P_1 - 5^1D_2$	644 024,80
$5^3P_2 - 6^3S_1$	508 723,79
$5^3P_1 - 6^3S_1$	480 125,21
$5^3P_0 - 6^3S_1$	467 945,81

Para o  $^{114}\text{Cd}$ , os valores acima se aplicam, com uma incerteza de  $7 \times 10^{-8}$ , em valor relativo, às radiações emitidas por uma lâmpada de descarga, quando são observadas as seguintes condições:

- as radiações são produzidas por uma lâmpada de descarga sem eletrodos, contendo cádmio 114, de uma pureza não inferior a 95%, e de argônio a uma pressão de 1 mm Hg (133 Pa), aproximadamente, à temperatura ambiente;
- o diâmetro interno do capilar da lâmpada é de, aproximadamente, 5 mm, e as radiações são observadas transversalmente;
- a lâmpada é excitada por um campo de alta frequência de potência moderada; ela é mantida a uma temperatura tal que a linha verde não seja revertida.

2.3 MOLÉCULA ABSORVENTE  $^{127}_{53}\text{I}$ , TRANSIÇÃO 17-1, P (62), COMPONENTE A<sub>1</sub>, RECOMENDADO PELO BIPM E PELO CIPM, EM 1992 (BIPM COM. CONS. DEF. METRO, 1992, 8, M18 E M137 E REALIZAÇÃO PRÁTICA DA DEFINIÇÃO DO METRO (1992), METROLOGIA, 1993/94, 30, 523-541)

Os valores  $f = 520\,206\,808,4$  MHz  
 $\lambda = 576\,294\,760,4$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $4 \times 10^{-10}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser de corante (ou por um laser de He-Ne associado a um duplador de frequência) estabilizado com o auxílio de uma célula de iodo, situada no interior ou no exterior do laser, tendo um ponto frio a temperatura de  $(6 \pm 2)^\circ\text{C}$ .



## 2 Massa

A unidade de massa, o quilograma, é a massa do protótipo internacional do quilograma confiado ao BIPM. É um cilindro, constituído de uma liga de 90% em massa de platina e 10% em massa de irídio. A massa dos padrões secundários do quilograma, em platina iridiada ou em aço inoxidável, é comparada à massa do protótipo internacional por meio de balanças, cuja incerteza relativa pode alcançar  $1 \times 10^{-9}$ .

O aumento relativo da massa do protótipo internacional é de, aproximadamente,  $1 \times 10^{-9}$ , em razão do acúmulo inevitável de poluentes na superfície. Por esse motivo, o Comitê Internacional declarou que, até uma mais completa informação, a massa do protótipo internacional é aquela que segue imediatamente à limpeza-lavagem segundo um método específico (PV, 1989, 57, 15-16 e PV, 1990, 58, 10-12). A massa de referência assim definida é utilizada para calibrar os padrões nacionais de platina iridiada (Metrologia, 1994, 31, 317-336).

No caso dos padrões de aço inoxidável, a incerteza relativa da comparação dos padrões do quilograma é limitada a  $1 \times 10^{-8}$ , devido à incerteza relativa da correção do empuxo do ar. Os resultados das comparações no vácuo devem ser submetidos a outras correções, para levar em conta variações da massa dos padrões quando da passagem do vácuo para a pressão atmosférica.

A calibração de uma série de massas é uma operação simples que permite passar aos múltiplos e submúltiplos do quilograma.





# 3 Tempo

**3.1 UNIDADE DE TEMPO** Um pequeno número de laboratórios nacionais de metrologia do tempo realizam a unidade de tempo com uma altíssima exatidão. Para isto, esses laboratórios concebem e constroem padrões primários de frequência que produzem oscilações elétricas, cuja frequência está numa relação conhecida com a frequência de transição do átomo de césio 133 que define o segundo. Em 1997, os melhores desses padrões realizaram o segundo do SI com uma incerteza-padrão relativa de  $2 \times 10^{-15}$ . É importante observar que a definição do segundo deve ser entendida como a própria definição do tempo: ela se aplica em um pequeno domínio espacial que acompanha o átomo de césio em seu movimento. Em um laboratório, suficientemente pequeno para permitir que efeitos da não-uniformidade do campo gravitacional sejam desprezíveis quando comparados a incertezas da realização do segundo, o próprio segundo é obtido aplicando-se uma correção para a velocidade do átomo no laboratório, conforme a relatividade restrita. Não cabe se fazer uma correção para o campo gravitacional ambiente.

Os padrões primários de frequência permitem, também, calibrar a frequência dos padrões secundários de Tempo utilizados nos centros horários nacionais. Esses são, geralmente, relógios comerciais de césio que se distinguem por uma estabilidade a longo termo: capazes de manter uma frequência com estabilidade relativa melhor que  $10^{-14}$  em períodos de vários meses, constituindo-se em excelentes “guarda-tempos”. A incerteza relativa da frequência é da ordem de  $10^{-12}$ .

Os laboratórios de metrologia do tempo dispõem, também, de maser de hidrogênio comerciais, com grande estabilidade a curto prazo. Esses dispositivos são indispensáveis em todas as aplicações que necessitam de uma referência muito estável em intervalos médios inferiores a um dia (estabilidade relativa de  $1 \times 10^{-15}$  a 10 000s). Em sua configuração básica, os masers de hidrogênio estão sujeitos a derivas de frequência que se tornam aparentes quando se compara com um relógio de césio que determina sua frequência média em vários dias. Essa deriva é bastante reduzida quando os masers funcionam em modo ativo e com uma cavidade de auto-serviço. Os relógios de césio e os masers de

hidrogênio devem ser conservados em condições ambientais cuidadosamente controladas.

### 3.2 COMPARAÇÃO DE RELÓGIOS, ESCALAS DE TEMPOS

Os laboratórios nacionais possuem, geralmente, vários relógios em funcionamento no mesmo momento, e combinam seus dados, a fim de construir uma escala de tempo perene. Essa escala é então mais estável e mais exata que a maioria dos relógios que a constituem. Essa escala se baseia nos resultados de comparações locais de relógios, no laboratório, com uma incerteza freqüentemente inferior a 100 ps. Essas escalas de tempo são, geralmente, designadas por TA (k), para o laboratório k.

O sincronismo dos relógios que funcionam em laboratórios distantes é também uma preocupação da metrologia do tempo. Isto necessita de métodos de comparação horária exatos e que possam ser operados em toda a Terra, em qualquer tempo. O sistema de satélite do Global Positioning System (GPS) fornece uma solução satisfatória para esse problema: composto de 24 satélites não-geoestacionários, esse sistema é designado para o posicionamento, porém possui a particularidade de que os satélites são equipados com relógios de césio que difundem sinais horários, utilizados da seguinte maneira: os relógios de dois laboratórios distantes são comparados com um relógio do satélite visível simultaneamente em ambos os laboratórios e é calculada a diferença. Para uma comparação que se estende a, aproximadamente, dez minutos, a incerteza então obtida pode ser de poucos nanossegundos, mesmo para relógios que estão separados por milhares de quilômetros. Para reduzir essas incertezas, convém tratar os dados brutos com muita precaução: resultados obtidos que são estritamente simultâneos devem ser sistematicamente rejeitados e deve ser aplicada uma correção levando em conta a posição exata do satélite, que só é conhecida poucos dias antes.

O GPS é utilizado de maneira regular para ligar os laboratórios nacionais de um grande número de países e será complementado por um sistema russo similar: o Global Navigation Satellit System (GLONASS). Dentre outros métodos, existem as técnicas bidirecionais, baseadas na emissão de um sinal, óptico ou de radiofrequência, de um laboratório de tempo em direção a outro laboratório e, reciprocamente, com retorno via satélite. O conjunto desses métodos deverá permitir se atingir uma exatidão inferior a nanossegundo, antes do final do século. É importante registrar que, em todos os casos, os efeitos relativistas podem exigir correções superiores a 100ns, que devem ser levadas em conta.

A combinação perfeita do conjunto desses dados de comparações de relógios, conservados nos laboratórios de metrologia do tempo, permite estabelecer uma escala de tempo de referência mundial, o Tempo

Atômico Internacional (TAI), escala que foi aprovada pela 14<sup>a</sup> CGPM, em 1971 (Resolução 1; CR, 77 e Metrologia, 1972, 8, 35).

A primeira definição do TAI foi proposta ao Comitê Internacional pelo CCDS, em 1970 (Recomendação 52; PV, 38, 110 e Metrologia, 1971, 1, 43):

“O tempo atômico internacional é a coordenada de referência de tempo, estabelecida pelo Bureau Internacional da Hora, com base nas indicações de relógios atômicos que funcionam em diversos estabelecimentos, conforme a definição do segundo, unidade de tempo do Sistema Internacional de Unidades.”

No quadro da relatividade geral, o TAI deve ser visto como uma coordenada temporal (ou coordenada de tempo), cuja definição foi complementada, como se segue (Declaração do CCDS, BIPM Com. Cons. Def. segundo, 1980, 9, 515 e Metrologia, 1981, 17, 70):

“O TAI é uma escala de tempo coordenada, definida por um sinal de referência geocêntrica como a unidade da escala de segundo do SI, tal que ela é realizada pelo geóide em rotação.”

A União Astronômica Internacional ampliou essa definição, na Resolução A4, de 1991:\*

“O TAI é uma escala de tempo realizada, cuja forma ideal, desprezando-se um deslocamento constante de 32,184s, é o Tempo terrestre (TT), ele próprio ligado à coordenada tempo do referencial geocêntrico, o Tempo coordenado geocêntrico (TCG), por uma marcha constante.”

Em 1<sup>o</sup> de janeiro de 1988, o Comitê Internacional aceitou a responsabilidade de estabelecer o TAI, atividade antes desenvolvida pelo Bureau Internacional da Hora. O TAI é obtido em duas etapas. Calcula-se, a princípio, uma média ponderada de 200 relógios, mantidos em condições metrológicas, em 50 laboratórios. O algoritmo utilizado é otimizado para a estabilidade a longo termo, o que requer observar o comportamento dos relógios em períodos suficientemente longos. Uma das conseqüências é que o TAI só é acessível em tempos, com algumas semanas de atraso. Em 1997, a estabilidade relativa de freqüência do TAI foi estimada em  $2 \times 10^{-15}$  para períodos médios de dois meses. A exatidão da freqüência do TAI é apreciada por comparação de sua unidade de escala às diversas realizações do segundo do SI, produzidas pelos padrões primários de freqüência. Isto necessita a aplicação de correção para compensar o deslocamento relativista da freqüência entre o local de

---

\* Para mais detalhes, ver os procedimentos da 21<sup>a</sup> Assembléia Geral da TAU, Buenos Aires, TAI, Trans., 1991, vol. XXIB (Kluwer).

funcionamento do padrão primário e um ponto fixo do geóide em rotação. A amplitude relativa dessa correção é, entre pontos fixos na superfície da Terra, da ordem de  $10^{-16}$  por metro de altitude. Em 1997, o desvio entre a unidade da escala do TAI e o segundo do SI, sobre o geóide em rotação é de  $+ 2,0 \times 10^{-14}$  s, e é conhecido com uma incerteza de  $5 \times 10^{-15}$  s. Essa diferença é reduzida, direcionando-se a frequência do TAI com a aplicação de correções de amplitude relativa igual a  $1 \times 10^{-15}$ , de dois em dois meses. Esse procedimento não degrada a estabilidade do TAI a meio termo e melhora sua exatidão.

### 3.3 OS TEMPOS LEGAIS

O TAI não é difundido de maneira direta na vida cotidiana. Os tempos legais (difundidos pelo rádio, televisão, telefone, etc.) são fornecidos numa escala de tempos chamada Tempo Universal Coordenado (UTC), como recomendado pela 15ª CGPM, na Resolução 5, em 1975 (CR, 104 e Metrologia, 1975, 11, 80). O UTC é definido de tal maneira que difere do TAI em um número inteiro de segundos; a diferença entre o UTC e o TAI é igual a -31s, em 1º de julho de 1997. Essa diferença pode ser modificada em 1s, pelo uso de um segundo intercalado, positivo ou negativo, a fim de que o UTC permaneça de acordo com o tempo definido pela rotação da terra tal que o sol cruza o meridiano de Greenwich ao meio-dia do UTC, a menos de 0,9s, aproximadamente, em média, durante um período de um ano. Além disso, os tempos legais da maioria dos países são defasados de um número inteiro de horas (fusos horários e horário de verão) em relação ao UTC. Os laboratórios nacionais mantêm uma aproximação do UTC designada por UTC (k) para o laboratório k. Os desvios entre UTC (k) e UTC são, em geral, reduzidos a poucas centenas de nanossegundos.

## 4 Grandezas elétricas

A realização do ampère (unidade de base do SI), do ohm ou do volt (unidades derivadas do SI), diretamente, segundo sua definição e com uma exatidão elevada, exige um trabalho longo e difícil. As melhores realizações do ampère se obtêm, atualmente, através de combinações de realizações do watt, do ohm e do volt. O watt, realizado de maneira elétrica, é comparado, com a ajuda de uma balança, com o watt realizado de maneira mecânica. A experiência utiliza uma bobina num campo de indução magnética de tal maneira que não é necessário conhecer nem as dimensões da bobina nem o valor da indução magnética. O ohm é realizado utilizando-se a variação da capacidade de um condensador de Thompson-Lampard, variação que é unicamente função do deslocamento linear de um eletrodo-guarda. O volt é realizado por meio de uma balança na qual uma força eletrostática é medida em função de uma força mecânica. Pode-se deduzir o ampère, combinando-se duas das três unidades anteriores. A incerteza relativa do valor do ampère assim obtido é estimada em  $10^{-7}$ . O ampère, o ohm e o volt podem também ser determinados a partir de medições de diversas combinações de constantes físicas. Os laboratórios utilizam, atualmente, padrões de referência do volt ou do ohm baseados, respectivamente, no efeito Josephson ou no efeito Hall quântico, padrões que são nitidamente mais reprodutíveis e mais estáveis que  $10^{-7}$ . A fim de aproveitar a vantagem que esses métodos mais estáveis oferecem para conservar os padrões de referência dos laboratórios que representam as unidades elétricas e tomando cuidado, ao mesmo tempo, para não modificar as definições do SI, a 18ª Conferência Geral adotou em 1987 a Resolução 6, que solicita que as representações do volt e do ohm sejam baseadas em valores, admitidos por convenção, da constante de Josephson,  $k_J$ , e da constante de von Klitzing,  $R_K$ .

• 18ª CGPM, 1987, RESOLUÇÃO 6 (CR, 100 E METROLOGIA, 1988, 25, 115):  
AJUSTE PREVISTO DAS REPRESENTAÇÕES DO VOLT E DO OHM

A Décima Oitava Conferência Geral de Pesos e Medidas,

considerando

– que a uniformidade mundial e a estabilidade a longo termo das representações nacionais das unidades elétricas são de uma importância maior para a ciência, o comércio e a indústria, tanto pelo aspecto técnico quanto pelo aspecto econômico,

– que diversos laboratórios nacionais utilizam o efeito Josephson e começam a utilizar o efeito Hall quântico para conservar, respectivamente, representações do volt e do ohm, que fornecem melhores garantias de estabilidade a longo termo,

– que, devido à importância da coerência entre as unidades de medida de diversas grandezas físicas, os valores adotados para essas representações devem estar, na medida do possível, de acordo com o SI,

– que o conjunto dos resultados das experiências recentes e em andamento permitirão o estabelecimento de um valor aceitável, suficientemente compatível com o SI, para o coeficiente que relaciona cada um desses efeitos à unidade elétrica correspondente,

Convida os laboratórios, cujos trabalhos possam contribuir para estabelecer o valor do quociente da tensão pela frequência no efeito Josephson, e da tensão pela corrente, no efeito Hall quântico, a participarem ativamente desses trabalhos e a comunicarem, com urgência, seus resultados ao Comitê Internacional de Pesos e Medidas, e habilita o Comitê Internacional de Pesos e Medidas para recomendar, desde que este considere possível, um valor de cada um desses quocientes e uma data na qual esse valor será colocado em prática, simultaneamente, em todos os países; esse valor deverá ser anunciado, no mínimo, um ano antes, e poderá ser adotado em 1º de janeiro de 1990.

Em 1988, o Comitê Internacional adotou as Recomendações 1 (CI - 1988) e 2 (CI-1988) que fixam, por convenção, valores exatos para aos constantes de Josephson e de von Klitzing, e que solicitam aos laboratórios que baseiem seus padrões nesses valores a partir de 1º de janeiro de 1990.

• CIPM, 1988, RECOMENDAÇÃO 1 (PV, 56, 19 E METROLOGIA, 1989, 26, 69): REPRESENTAÇÕES DO VOLT PELO EFEITO JOSEPHSON

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas, agindo conforme as instruções baixadas pela Resolução 6 da 18ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, relativas ao ajuste previsto para as representações do volt e do ohm,

considerando,

– que um estudo aprofundado dos resultados de determinações mais recentes conduz a um valor de 483 597,9 GHz/V para a constante de Josephson,  $K_j$ , isto é, para o quociente da frequência pela tensão correspondente ao estágio  $n = 1$ , no efeito Josephson,

– que o efeito Josephson, junto com esse valor de  $K_j$ , pode ser utilizado para estabelecer um padrão de referência de força eletromotriz cuja incerteza (desvio-padrão), em relação ao volt, é estimada em  $4 \times 10^{-7}$ , em valor relativo, e cuja reprodutibilidade é nitidamente melhor,

recomenda

– que se adote, por convenção, para a constante de Josephson,  $K_j$ , o valor  $K_{j-90} = 483\,579,9$  GHz/V, exatamente,

– que esse novo valor seja utilizado a partir de 1º de janeiro de 1990, e não antes, para substituir os valores atualmente em uso,

– que esse novo valor seja utilizado, a partir dessa mesma data, por todos os laboratórios que baseiam suas medições de força eletromotriz no efeito Josephson,

– que a partir dessa mesma data todos os outros laboratórios ajustem o valor de seus padrões de referência de acordo com o novo valor adotado,

Estima que nenhuma variação desse valor recomendado da constante de Josephson será necessária num futuro previsto, e chama a atenção dos laboratórios para o fato que o novo valor é superior em 3,9 GHz/V, ou seja, aproximadamente  $8 \times 10^{-6}$ , em valor relativo, ao valor dado, em 1972, pelo Comitê Consultivo de Eletricidade, na Declaração E-72.

• CIPM, 1988, RECOMENDAÇÃO 2 (PV, 56, 20 E METROLOGIA, 1989, 26, 70): REPRESENTAÇÃO DO OHM PELO EFEITO HALL QUÂNTICO.

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas, agindo conforme as instruções da Resolução 6 da 18ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, relativas ao ajuste previsto das representações do volt e do ohm,



considerando,

– que a maior parte dos padrões atuais de referência de resistência elétrica apresentam ao longo do tempo variações significativas,

– que um padrão de referência de resistência elétrica, baseado no efeito Hall quântico, seria estável e reproduzível,

– que um estudo aprofundado dos resultados das determinações mais recentes conduza um valor de  $25\,812,807\ \Omega$ , para a constante de von Klitzing,  $R_K$ , isto é, para o quociente da tensão de Hall pela corrente correspondente ao estágio  $i = 1$ , no efeito Hall quântico,

– que o efeito Hall quântico, com esse valor de  $R_K$ , pode ser utilizado para estabelecer um padrão de frequência de resistência cuja incerteza (desvio-padrão), em relação ao ohm, é estimada em  $2 \times 10^{-7}$ , em valor relativo, e cuja reprodutibilidade é nitidamente melhor,

recomenda,

– que se adote, por convenção, para a constante de von Klitzing,  $R_K$ , o valor  $R_{K-90} = 25\,812,807\ \Omega$ , exatamente,

– que esse valor seja utilizado a partir de 1º de janeiro de 1990, e não antes, por todos os laboratórios que baseiam suas medições de resistência elétrica no efeito Hall quântico,

– que a partir dessa mesma data todos os outros laboratórios ajustem o valor de seus padrões de referência de acordo com  $R_{K-90}$ ,

– que, para estabelecer um padrão de referência de resistência elétrica baseado no efeito Hall quântico, os laboratórios sigam os conselhos para implementação da resistência de Hall quântico, elaborados pelo Comitê Consultivo de Eletricidade e publicados pelo Bureau Internacional de Pesos e Medidas, em sua edição mais recente, e estima que nenhuma alteração desse valor recomendado da constante de von Klitzing será necessária, num futuro previsível.

Na sessão de 1988, o CCE, cuidadosamente, considerou a maneira que os valores recomendados  $K_{J-90}$  e  $R_{K-90}$ , admitidos por convenção, devem ser utilizados. Essas considerações podem ser resumidas, como se segue:

1. As Recomendações 1 (CI-1988) e 2 (CI-1988) não constituem uma redefinição das unidades SI. Os valores de  $K_{J-90}$  e  $R_{K-90}$ , admitidos por convenção, não podem ser utilizados para a definição do volt e do ohm, isto é, as unidades de força eletromotriz e de resistência elétrica do Sistema Internacional de Unidades. Se não, a constante  $\mu_0$  não seria

um valor definido exatamente, o que revogaria a definição do ampère, e as unidades elétricas seriam incompatíveis com a definição do quilograma e suas unidades derivadas.

2. Com relação ao uso de índices associados aos símbolos de grandezas ou unidades, o CCE considera que os símbolos das grandezas força eletromotriz (potencial elétrico, diferença de potencial elétrico) ou resistência elétrica, bem como aqueles do volt ou do ohm, não deverão ser modificados com a adição de índices que designam laboratórios ou datas particulares.

Essas declarações foram posteriormente aprovadas pelo Comitê Internacional. A 19<sup>a</sup> Conferência Geral (1991, Resolução 2) recomendou a continuidade das pesquisas relativas à teoria fundamental do efeito Josephson e do efeito Hall quântico.



# 5 Temperatura

Só podemos efetuar medições diretas da temperatura termodinâmica utilizando-se um dos raros termômetros chamados de primários. Estes são termômetros cuja equação de estado pode ser escrita de maneira explícita sem se ter que introduzir constantes desconhecidas que dependem da temperatura. Vários termômetros primários foram utilizados para obter valores exatos da temperatura termodinâmica, dentre esses, o termômetro a gás de volume constante, o termômetro acústico a gás, os termômetros de radiação espectral ou total e o termômetro eletrônico a ruído. Com esses termômetros foram obtidas incertezas de poucos milikelvins até, aproximadamente, 373 K; acima, as incertezas aumentam progressivamente. Para se obter uma grande exatidão desses termômetros, é necessário realizar um trabalho longo e difícil. Porém, existem termômetros secundários, como os termômetros de resistência de platina, com os quais a reprodutibilidade das medições pode ser da ordem de dez vezes superior àquela das medições efetivadas com qualquer um dos termômetros primários. A fim de aproveitar ao máximo esses termômetros secundários, a Conferência Geral vem adotando, ao longo do tempo, versões sucessivas de uma escala internacional de temperatura. A primeira dessas escalas foi a Escala Internacional de Temperatura de 1927 (EIT-27), que foi substituída pela Escala Internacional Prática de Temperatura de 1948 (EIPT-48) e que, por sua vez, deu lugar à Escala Internacional Prática de Temperatura de 1968 (EIPT-68). Em 1976, o CIPM adotou, para as baixas temperaturas, a Escala Provisória de Temperatura de 0,5K a 30K de 1976 (EPT-76). Em 1º de janeiro de 1990, a EIPT-68 e a EPT-76 foram substituídas pela Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90), adotada pelo CIPM em 1989, pela Recomendação 5 (CI-1989).

A 19ª Conferência Geral (1991, Resolução 3) recomendou aos laboratórios nacionais a empreenderem esforços a fim de aprimorar a informidade mundial e a estabilidade a longo termo das medições de temperatura, implementando rapidamente a EIT-90.

• CIPM, 1989, RECOMENDAÇÃO 5 (PV, 57, 26 E METROLOGIA, 27, 13): ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1990

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), conforme indicação formulada pela 18ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, em 1987 (Resolução 7), adotou a Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90), em substituição à Escala Internacional Prática de Temperatura de 1968 (EIPT-68).

O CIPM observa que, em relação à EIPT-68, a EIT-90:

– se estende a temperaturas mais baixas, até 0,65K, e substitui, desse modo, também a Escala Provisória de Temperatura de 1976 (EPT-76);

– está mais bem relacionada com as temperaturas termodinâmicas correspondentes;

– possui continuidade, precisão e reprodutibilidade nitidamente aprimoradas, em toda sua extensão;

– comporta subdomínios e fornece, em determinados domínios, definições equivalentes que facilitam enormemente sua utilização.

O CIPM observa, ainda, que o texto da EIT-90 será acompanhado de dois documentos: “ Supplementary Information for the ITS-90” e “Techniques for Approximating the ITS-90”, que serão publicados pelo Bureau Internacional de Pesos e Medidas e atualizados periodicamente.

O CIPM recomenda,

– que a EIT-90 entre em vigor em 1ª de janeiro de 1990;

– e que, nessa mesma data, a EIPT-68 e EPT-76 sejam revogadas.

A EIT-90 se estende de 0,65k até a temperatura mais elevada mensurável por meio de um pirômetro ótico. A escala se baseia em:

1. uma série de pontos fixos de definição; e
2. métodos de interpolação a serem utilizados entre esses pontos.

Os pontos fixos de definição são as temperaturas de um determinado número de estados termodinâmicos, realizáveis de maneira experimental, que se acordou para encontrar um valor conveniente. As interpolações são definidas entre 0,65k e 5k, por meio de equações da pressão de vapor saturante de hélio; entre 3k e 24,5561k, por meio do termômetro de interpolação a gás de volume constante; entre 13,8033k e 961,78 °C, por meio do termômetro de resistência de platina; e, nas temperaturas superiores, por meio da lei de radiação ionizante de Planck. Em várias

faixas de temperatura existem várias definições da temperatura  $T_{90}$  definida pela escala. As diferentes temperaturas são equivalentes.

Conselhos para realização e implementação da EIT-90 são fornecidos em dois documentos: “Supplementary Information for the ITS-90”, e “Techniques simplifiés permettant d’approcher l’Echelle internationale de temperatura de 1990”. Esses documentos foram aprovados pelo BIPM e são revisados periodicamente.



## 6 Quantidade de matéria

Todos os resultados quantitativos de análises químicas ou de dosagens podem ser expressos em unidades de quantidade de matéria de partículas constituintes, cuja unidade é o mol. O princípio das medidas físicas baseadas nessa unidade está explicado a seguir.

O caso mais simples é o da amostra de um corpo puro que se considera como constituído por átomos; chamemos de X o símbolo químico desses átomos: Um mol de átomos X contém por definição tantos átomos dessa substância quantos átomos de  $^{12}\text{C}$  existam em 0,012 kg de carbono 12. Como não se sabe medir com exatidão a massa  $m(^{12}\text{C})$  de um átomo de carbono 12, nem a massa  $m(\text{X})$  de um átomo X, utiliza-se a relação entre essas massas  $m(\text{X})/m(^{12}\text{C})$ , que pode ser determinada com exatidão, por exemplo, por meio de uma armadilha de Penning. A massa correspondente a 1 mol de X é, então

$$[m(\text{X})/m(^{12}\text{C})] \times 0,012 \text{ kg},$$

o que se exprime dizendo que a massa molar  $M(\text{X})$  de X (quociente da massa pela quantidade de matéria) é:

$$M(\text{X}) = [m(\text{X})/m(^{12}\text{C})] \times 0,012 \text{ kg/mol}$$

Por exemplo, o átomo de flúor  $^{19}\text{F}$  e o átomo do carbono  $^{12}\text{C}$  possuem massas que estão na relação 18,9984/12. A massa molar do gás molecular  $\text{F}_2$  é:

$$M(\text{F}_2) = 2 \times \frac{18,9984}{12} \times 0,012 \text{ kg/mol} = 0,037\,996\,8 \text{ kg/mol}$$

e a quantidade de matéria correspondente a uma massa determinada do gás  $\text{F}_2$ , por exemplo, 0,0500 kg, é:

$$\frac{0,0500 \text{ kg}}{0,037\,996\,8 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}} = 1,316 \text{ mol}$$



No caso de um corpo puro considerado como sendo constituído de moléculas B, que são combinações de átomos X, Y, .... conforme a fórmula química:

$B = X\alpha Y\beta, \dots$ , a massa de uma molécula é:

$$m(B) = \alpha m(X) + \beta m(Y) + \dots$$

Essa massa não é conhecida com exatidão, porém a relação  $m(B)/m(^{12}\text{C})$  pode ser determinada exatamente. A massa molar do corpo molecular B é então:

$$M(B) = \frac{m(B)}{m(^{12}\text{C})} \times 0,012 \text{ kg / mol} = \left( \alpha \frac{m(X)}{m(^{12}\text{C})} + \beta \frac{m(Y)}{m(^{12}\text{C})} + \dots \right) \times 0,012 \text{ kg / mol}$$

O procedimento é o mesmo para o caso mais geral, onde a substância considerada B tem a composição especificada  $B = X\alpha, Y\beta, \dots$ , mesmo que  $\alpha$  e  $\beta$  não sejam números inteiros.

Se designarmos as relações de massa  $m(X)/m(^{12}\text{C})$ ,  $m(Y)/m(^{12}\text{C})$ , ... por  $r(X)$ ,  $r(Y)$  ..., a massa molar da substância molecular  $\beta$  é dada pela fórmula geral:

$$M(B) = [\alpha r(X) + \beta r(Y) + \dots] \times 0,012 \text{ kg/mol.}$$

Existem outros métodos para medir as quantidades de matéria, baseados nas leis da física e da físico-química. Seguem, aqui, três exemplos:

1. No caso de gases perfeitos, 1 mol de partículas de um gás qualquer ocupa o mesmo volume a temperatura T e à pressão p (aproximadamente  $0,0224 \text{ m}^3$  a  $T = 273, 15 \text{ K}$  e  $p = 101\,325 \text{ Pa}$ ); daí resulta um método para medir a relação das quantidades de matéria para dois gases quaisquer (sabe-se determinar as correções necessárias se os gases não forem perfeitos).
2. No caso das reações eletrolíticas quantitativas pode-se medir a relação entre as quantidades de matéria por medidas de quantidades de eletricidade. Por exemplo: 1 mol de Ag e 1/2 mol de Cu são depositados sobre um catodo pela mesma quantidade de eletricidade (aproximadamente  $96\,487 \text{ C}$ ).
3. A aplicação das leis de Raoult é também um método para medir as relações de quantidade de matéria que se encontra em solução diluída num solvente.

## 7 Grandezas fotométricas

A definição da candela mencionada no subitem 2.1.1.7 é expressa em termos estritamente físicos. O objetivo da fotometria, todavia, é o de medir a luz de uma maneira tal que o resultado da medição expresse exatamente a sensação visual de um observador humano. Com esse objetivo, a Comissão Internacional de Iluminamento (CIE) introduziu duas funções especiais  $V(\lambda)$  e  $V'(\lambda)$ , ou funções de eficácia luminosa relativa espectral, que descrevem, respectivamente, a sensibilidade relativa espectral do olho humano médio em visão fotótica (adaptado à luz) ou escotópica (adaptado à escuridão). A mais importante das duas, a função  $V(\lambda)$ , para a visão adaptada à luz, está relacionada ao seu valor para a radiação monocromática ao qual a retina é a mais sensível para um alto nível de iluminamento, isto é, ao raio de  $540 \times 10^{12}$  Hz que corresponde a um comprimento de onda de 555, 016nm no ar normal.

O Comitê Internacional aprovou o uso dessas funções. Por conseguinte, as grandezas fotométricas correspondentes são definidas em termos estritamente físicos como grandezas proporcionais à integral de divisão espectral de potência, ponderada segundo uma função específica do comprimento de onda.

A candela é uma unidade de base do SI desde o início: ela permaneceu unidade de base, mesmo após ter sido, em 1979, ligada à unidade derivada de potência, o watt. Os primeiros padrões fotométricos eram fontes luminosas; os mais antigos eram as velas (candles), daí o nome de candela para a unidade fotométrica de base. De 1948 a 1979, a radiação de um corpo negro, ou radiação do radiador de Planck, à temperatura de congelamento da platina, era utilizada para definir a candela. Atualmente, a unidade é definida por referência a uma radiação monocromática, de preferência, a uma radiação de faixa larga, como é o caso para o corpo negro. O valor 1/683 watt por esterradiano que figura na definição atual foi escolhido em 1979 para reduzir, ao máximo possível as variações das realizações médias das unidades fotométricas conservadas nos laboratórios nacionais.

A definição não fornece nenhuma indicação da maneira como a candela deve ser realizada, o que apresenta grande vantagem de permitir se adotar novas técnicas para realizar a candela sem se alterar a definição da unidade de base. Atualmente, os laboratórios nacionais de metrologia realizam a candela por meio de métodos radiométricos. Entretanto, as lâmpadas-padrão são sempre utilizadas para conservar as unidades fotométricas: elas fornecem, ou uma intensidade conhecida, numa certa direção, ou um fluxo luminoso conhecido.

---

\* Princípios tratados da fotometria, monografia BIPM, 1983, 31p.



