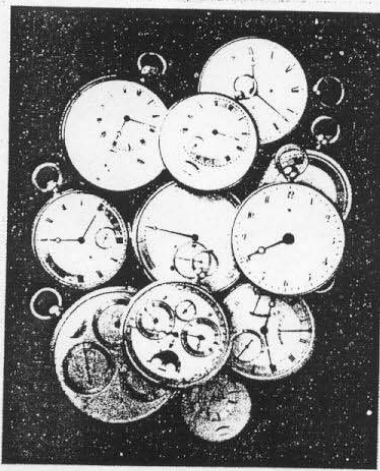


Texto reproduzido de RESNICK & HALLIDAY. *Fundamentos de Física*.

Medidas Físicas



Os relógios são da marca Breguet, relojoeiro desde Maria Antonieta até Napoleão. Apesar de estes serem mais bonitos, os atuais relógios-de-pulso, mais baratos, marcam o tempo melhor. Se você desejar uma hora mais precisa, ligue para o "National Bureau of Standards" (303) - 499-7111. Os masers de hidrogênio, que levam 30.000.000 de anos para adiantar ou atrasar 1 segundo, são ainda mais precisos. As técnicas de medida melhoram de ano para ano.

1-1 Como Medir Grandezas Físicas

A Física baseia-se na medida. Qual é o tempo decorrido entre dois cliques deste contador? Qual é a temperatura do hélio líquido neste recipiente? Qual é o comprimento de onda deste *laser*? Qual é a corrente elétrica neste fio? A lista cresce indefinidamente.

Começamos, então, por aprender como medir as grandezas físicas, em termos das quais as leis físicas são expressas. Entre estas quantidades estão comprimento, tempo, massa, temperatura, pressão e resistência elétrica. Muitos destes termos são usados na linguagem cotidiana. Você poderia dizer: "Eu irei até onde for possível, para ajudá-lo, desde que você não me *pressiona*." Na física, palavras como *pressão* e outras não devem ser confundidas com suas acepções na linguagem coloquial. Neste exemplo, o significado científico de *pressionar* não tem qualquer relação com o significado na frase citada. Conforme escreveu Robert Oppenheimer: "Freqüentemente, o fato de usarmos em Ciência as mesmas palavras usadas na vida cotidiana e na linguagem coloquial pode dar mais motivo para confusão do que para o esclarecimento."

Define-se uma grandeza física, como comprimento, pelo estabelecimento de um *padrão* e pela atribuição de uma *unidade* — o metro. Temos total liberdade de definir o padrão, porém é importante que, ao fazê-

lo, toda a comunidade científica concorde que esta definição seja ao mesmo tempo razoável e prática.

Tendo sido definido um padrão, por exemplo, para o comprimento, devem ser estabelecidos procedimentos para que qualquer comprimento, seja ele o raio do átomo de hidrogênio, o eixo de um carro ou a distância até uma estrela, possa ser expresso em termos deste padrão. Muitas das comparações com o padrão serão indiretas. Não se poderia usar uma régua, por exemplo, para medir o raio de um átomo ou a distância até uma estrela.

O número de grandezas físicas é tão grande que se torna problemática a organização delas, pois nem todas são independentes. Tomemos, por exemplo, a velocidade. Ela é a razão entre um comprimento e o tempo. O que se faz consiste em escolher — por um acordo internacional — um número reduzido de quantidades e atribuir padrões apenas a estas. As demais grandezas físicas são definidas nos termos destas *grandezas fundamentais*.

As grandezas fundamentais devem ser não somente acessíveis como também invariáveis. Se for considerada como padrão de comprimento a distância entre a ponta do nariz de uma determinada pessoa e a extremidade do seu dedo indicador, este padrão é acessível, porém variável. As exigências da Ciência e da Engenharia têm impulsionado no sentido contrário, isto é,

busca-se a invariabilidade e investe-se considerável esforço nos laboratórios de padrões do mundo inteiro, no sentido de criar padrões secundários e padrões auxiliares acessíveis a todos que deles tenham necessidade.

1-2 O Sistema Internacional de Unidades*

Em 1971, a 14ª Conferência de Pesos e Medidas escolheu sete quantidades como *grandezas fundamentais*, formando a base do Sistema Internacional de Unidades (SI), popularmente conhecido como *sistema métrico*. As unidades fundamentais do SI, em particular aquelas relativas ao comprimento, massa e tempo, estão todas em uma "escala humana". Se as bactérias tivessem um sistema de unidades, sem dúvida alguma, elas usariam unidades fundamentais menores. A Tabela 1 mostra as quatro unidades fundamentais que serão utilizadas nos próximos capítulos deste livro.

Tabela 1 Unidades Fundamentais Usadas em Mecânica

Quantidade	Nome	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Quantidade de substância	mol	mol

Muitas *unidades derivadas do SI* são definidas em termos destas grandezas fundamentais. Por exemplo, a unidade SI de potência, chamada watt (abreviatura W) é definida em termos das unidades fundamentais de massa, comprimento e tempo. Deste modo, conforme veremos na Seção 7-6,

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ W} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3. \quad (1)$$

Para expressar números muito grandes ou muito pequenos, freqüentemente utilizados na Física, usamos a chamada notação científica. Por exemplo,

$$3\,560\,000\,000 \text{ m} = 3,56 \times 10^9 \text{ m} \quad (2)$$

e

$$0,000\,000\,492 \text{ s} = 4,92 \times 10^{-7} \text{ s}. \quad (3)$$

Recomendamos que você faça uma revisão desta notação de modo que possa usá-la sem dificuldades, tanto em cálculos manuais como por meio de calculadoras.

Outra conveniência, quando da utilização de pequenos ou grandes números, é o uso dos prefixos relacionados na Tabela 2. Assim, podemos expressar uma certa potência elétrica de saída como

$$1,27 \times 10^9 \text{ watts} = 1,27 \text{ gigawatts} = 1,27 \text{ GW}. \quad (4)$$

e um determinado intervalo de tempo

$$2,35 \times 10^{-9} \text{ segundos} = 2,35 \text{ nanossegundos} \\ = 2,35 \text{ ns}. \quad (5)$$

Alguns destes prefixos que surgem, por exemplo, em milímetros, centímetros, quilogramas e megabytes, já são de seu conhecimento.

O Apêndice F mostra os fatores de conversão para sistemas diferentes do SI. O Sistema Internacional de Unidades foi adotado pela maioria dos países. O único entre os grandes países (praticamente o único no mundo) que ainda não adotou oficialmente o SI são os EUA.

Tabela 2 Prefixos para o SI^a

Fator	Prefixo	Símbolo	Fator	Prefixo	Símbolo
10 ¹⁸	exa-	E	10 ⁻¹⁸	atto-	a
10 ¹⁵	peta-	P	10 ⁻¹⁵	femto-	f
10 ¹²	tera-	T	10 ⁻¹²	pico-	p
10 ⁹	giga-	G	10 ⁻⁹	nano-	n
10 ⁶	mega-	M	10 ⁻⁶	micro-	μ
10 ³	quilo-	k	10 ⁻³	milli-	m
10 ²	hecto-	h	10 ⁻²	centi-	c
10 ¹	deca-	da	10 ⁻¹	deci-	d

^a Os prefixos comumente usados neste livro estão impressos em negrito.

1-3 Transformações de Unidades

Com bastante freqüência precisamos mudar as unidades nas quais uma grandeza física acha-se expressa. Isto é feito por meio da chamada *conversão em cadeia*. Neste método, um fator de conversão é escrito como uma razão igual à unidade. Assim, 1 min e 60 s são quantidades físicas idênticas e deste modo podemos escrever

$$\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1 \quad \text{e} \quad \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 1.$$

Isto não é equivalente a escrever $1/60 = 1$ ou $60 = 1$; o número e a *unidade* devem ser considerados em conjunto.

Como uma grandeza qualquer não se altera ao ser multiplicada pela unidade, estes fatores de conversão podem ser introduzidos sempre que forem úteis. Tais fatores são usados de modo que as unidades indesejadas cancelem-se. Por exemplo,

$$2 \text{ min} = (2 \text{ min})(1) = (2 \text{ min}) \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 120 \text{ s}. \quad (6)$$

* Ver "Foundations of International System of Units (SI)", por Robert A. Nelson *The Physics Teacher*, dez., 1981.

Quando forem introduzidos fatores de conversão em que as unidades *não* se cancelam, simplesmente invertemos o fator e tentamos de novo. Observe que as unidades seguem as mesmas regras aplicadas a números e variáveis algébricas.

Exemplo 1. O submarino de pesquisas ALVIN desloca-se a uma velocidade de 36,5 braças por minuto (em inglês, fathom/minute). (a) Expresse esta velocidade em metros por segundo. Uma barra corresponde a 6 pés, aproximadamente 1,8m.

Para achar o resultado em metros por segundo, temos

$$36,5 \frac{\text{fath}}{\text{min}} = \left(36,5 \frac{\text{fath}}{\text{min}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{6 \text{ ft}}{1 \text{ fath}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}}{3,28 \text{ ft}} \right)$$

$$= 1,11 \text{ m/s.} \quad (\text{Resposta})$$

(b) Quanto vale esta velocidade em milhas por hora?

$$36,5 \frac{\text{fath}}{\text{min}} = \left(36,5 \frac{\text{fath}}{\text{min}} \right) \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right) \left(\frac{6 \text{ ft}}{1 \text{ fath}} \right) \left(\frac{1 \text{ mi}}{5280 \text{ ft}} \right)$$

$$= 2,49 \text{ mi/h.} \quad (\text{Resposta})$$

(c) Quanto vale esta velocidade em anos-luz por ano? O ano-luz (a.l.) é definido como a distância percorrida pela luz em 1 ano, valendo $9,46 \times 10^{12}$ km.

Partindo do resultado do item a

$$1,11 \frac{\text{m}}{\text{s}} = \left(1,11 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \left(\frac{1 \text{ a.l.}}{9,46 \times 10^{12} \text{ km}} \right)$$

$$\times \left(\frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \right) \left(\frac{3,16 \times 10^7 \text{ s}}{1 \text{ a}} \right)$$

$$= 3,71 \times 10^{-9} \text{ a.l./a.} \quad (\text{Resposta})$$

Podemos escrever este resultado, ainda, sob outra forma, usando os prefixos da Tabela 2, como 3,71 na.l. (= 10^{-9} a.l.).

Se no cálculo da resposta do item a, fosse utilizada uma calculadora eletrônica, apresentando todos os dígitos, teria sido obtido o resultado 1,112804878 m/s cuja precisão subjacente não teria significado. O número foi arredondado para 1,11 m/s, que tem a precisão correta, levando-se em consideração os dados de entrada. As calculadoras devem ser ajustadas para que o arredondamento seja feito corretamente. Você poderá causar uma boa impressão ao seu professor se souber manipular os algarismos significativos* com segurança.

1-4 Comprimento

Em 1792, a nascente República Francesa estabeleceu um sistema de pesos e medidas. No seu fundamento estava o metro, definido como a décima milionésima parte da distância do Pólo Norte até o Equador. Em seguida, esta definição foi abandonada por questões práticas, sendo então o metro definido como a distância entre as duas marcas próximas às extremidades de uma barra feita de liga de platina-irídio.

Esta barra, o *metro padrão*, foi mantida no Bureau de Pesos e Medidas, localizado nas proximidades de Paris. Cópias exatas deste padrão foram enviadas para outras instituições semelhantes em diversos países do mundo. Estes padrões secundários foram usados pa-

* Uma discussão mais ampla sobre *algarismos significativos* na solução de problemas pode ser encontrada no Cap. 4. Ver as Sugestões 1, 2 e 7 do referido capítulo.

ra calibrar outros padrões, ainda mais acessíveis, de modo que, em última análise, todo instrumento de medida tem a sua autoridade derivada do metro padrão através de uma complicada cadeia de comparações. Em 1959, o mesmo aconteceu com a jarda, nos EUA, quando foi adotada a definição oficial, segundo a qual

$$1 \text{ jarda} = 0,9144 \text{ metro (exatamente).} \quad (7)$$

que é equivalente a

$$1 \text{ polegada} = 2,54 \text{ centímetros (exatamente)} \quad (8)$$

A Tabela 3 mostra a medida de alguns comprimentos.

Tabela 3 Alguns Comprimentos

Comprimento	Metros
Distância até o mais longínquo quasar (1987)	2×10^{26}
Distância até a Galáxia de Andrômeda	2×10^{22}
Distância até a estrela mais próxima (Proxima Centauri)	4×10^{16}
Distância até o planeta mais afastado (Plutão)	6×10^{12}
Raio da Terra	6×10^6
Altura do Monte Everest	9×10^3
Espessura desta folha de papel	1×10^{-4}
Comprimento de onda da luz	5×10^{-7}
Tamanho de um vírus típico	1×10^{-8}
Raio do átomo de hidrogênio	5×10^{-11}
Raio do próton	$\sim 10^{-15}$

O processo de comparação dos alinhamentos das marcas do metro padrão com as marcas correspondentes nos padrões secundários tomou-se de precisão insuficiente para as exigências da ciência e da técnica modernas. Em 1960, foi adotado um novo padrão para o metro, desta vez com base no comprimento de onda da luz emitida por um átomo. Mais precisamente, foi adotado como sendo o padrão para o 1.650.763,73 comprimentos de onda da luz emitida por átomos de criptônio-86 em um tubo de descarga de gás. Este embaraçoso número de comprimentos de onda foi escolhido de modo que o novo padrão fosse o mais consistente possível com o antigo metro padrão.

Os átomos de criptônio-86, de comprimento de onda padrão, estão disponíveis em qualquer parte, são idênticos e emitem luz precisamente no mesmo comprimento de onda. Como assinalou Philip Morrison, todo átomo é um depósito de unidades naturais, mais seguras que o Bureau Internacional de Pesos e Medidas.

A Fig. 1 mostra como o comprimento de um modelo calibrador usado por tomeiros mecânicos, adotado na indústria como padrão secundário de comprimento, é comparado com o padrão de referência localizado no National Bureau of Standards. As franjas formadas nesta figura são formadas por interferência de ondas luminosas. Se os padrões das franjas de interferência nos dois blocos retangulares coincidirem, os blocos são de mesmo comprimento. Se não coincidirem, digamos, que haja uma diferença de um décimo de franja, os blocos diferem de um vigésimo de comprimento de onda, ou seja, aproximadamente 30 nm.

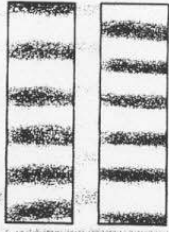


Fig. 1 Um moderno calibrador usado em usinagem (esquerda), comparado com um padrão de referência (direita) por intermédio de ondas luminosas. Se as franjas de interferência coincidirem, os blocos possuem o mesmo tamanho, a diferença de comprimento destes dois blocos é aproximadamente igual a 25 nm.

Por volta de 1983, as exigências de maior precisão atingiram tal ponto que não podiam mais ser satisfeitas pelo padrão do criptônio-86. O metro foi novamente redefinido como a distância percorrida pela luz em um intervalo de tempo especificado. Citando a 17ª Conferência Geral de Pesos e Medidas:

O metro é a distância percorrida pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo igual a 1/299 792 458 do segundo.

Esta definição implica, então, em dizer que a velocidade da luz é considerada atualmente como

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s (exatamente).}$$

Esta nova definição do metro era necessária porque as medidas da velocidade da luz tomaram-se tão precisas que a reprodutibilidade do metro padrão, com base no criptônio-86, tomou-se um fator de limitação. Devido a este fato, passou a fazer sentido a adoção da velocidade da luz como uma quantidade definida e usá-la para redefinição do metro.

Exemplo 2. Em provas de velocidade, tanto 100yd como 100m são utilizadas como distâncias para corridas. (a) Qual é a maior?

Da Eq. 7, 100yd é igual a 91,44m, de modo que 100m é maior do que 100yd.

(b) Qual é a diferença entre estas distâncias?

Representamos a diferença por ΔL , onde Δ é a letra grega delta maiúscula. Então,

$$\Delta L = (8,56 \text{ m}) \left(\frac{3,28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right) = 28,1 \text{ ft.} \quad (\text{Resposta})$$

1-5 Tempo

O tempo tem dois aspectos. Para propósitos civis e científicos desejamos saber a hora do dia (Ver Fig. 2) de modo a podermos ordenar os acontecimentos em seqüência. Em muitos trabalhos científicos, desejamos saber qual é a duração de um evento. Deste modo,

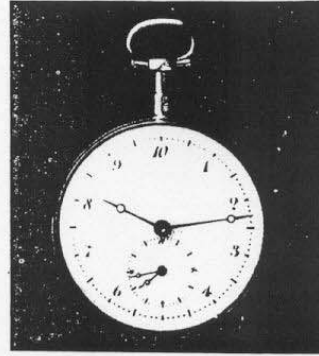


Fig. 2 Quando o sistema métrico foi proposto em 1792, a hora foi definida de modo a possibilitar um dia de 10 horas. A proposta não foi adiante. O fabricante deste relógio de 10 horas sabiamente colocou um pequeno mostrador que indicava a convenção habitual de 12 horas. Os mostradores indicam a mesma hora?

qualquer padrão de tempo deve possibilitar a resposta a duas perguntas: "Em que momento algo ocorreu?" e "Durante quanto tempo durou?" A Tabela 4 mostra alguns intervalos de tempo medidos.

Tabela 4 Alguns Intervalos de Tempo

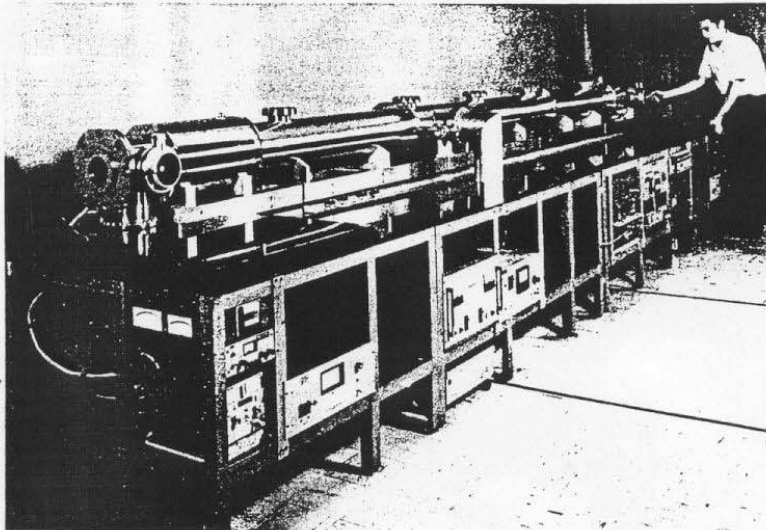
Intervalo de tempo	Segundos
Tempo de vida do próton (previsto teoricamente)	$\sim 10^{39}$
Idade do Universo	5×10^{17}
Idade da Pirâmide de Queops	1×10^{11}
Expectativa de vida média (nos EUA)	2×10^9
Duração de um dia	9×10^4
Intervalo entre duas batidas do coração humano	8×10^{-1}
Período do diapásão afinado em lá	2×10^{-3}
Vida do múon	2×10^{-6}
Duração do mais curto pulso de luz (obtido em laboratório, em 1987)	1×10^{-23}
Tempo de vida da partícula mais instável	$\sim 10^{-23}$
Tempo de Planck ^a	$\sim 10^{-43}$

^a Este é o tempo mais remoto, após o "Big Bang", para o qual as leis da Física, tais como conhecemos hoje, ainda têm aplicabilidade.

Qualquer fenômeno repetitivo é um possível padrão de tempo. A rotação da Terra, que determina a duração do dia, tem sido usada com este objetivo durante séculos. Um relógio de quartzo pode ser calibrado tomando-se como base a rotação da Terra, determinada a partir de observações astronômicas, e usado como padrão para medir intervalos de tempo no laboratório. Entretanto, este ajuste não pode ser feito com a precisão exigida pela Ciência e pela Tecnologia modernas.

Com propósito de satisfazer às necessidades de um padrão de tempo melhor, foram desenvolvidos em vários países os relógios atômicos. A Fig. 3 mostra um desses relógios, baseado na frequência característica do isótopo do césio-133, localizado no National Bureau of Standards. Este relógio é usado nos EUA como

Fig. 3 Relógio atômico de césio-133, padrão de frequência N° NBS-6, localizado no Bureau of Standards, em Boulder, Colorado. Ele é o padrão primário para a unidade de tempo nos EUA. Ligue para (303) 499-7111 e ajuste o seu relógio por ele. Ligue para (900) 410-8463, para obter sinais de tempo emitidos pelo Naval Observatory.



base para o Tempo Universal Coordenado (UTC), para o qual os sinais sincronizados estão disponíveis por meio de ondas curtas de rádio (estações WWV e WWHV) e por meio de telefone.

A Fig. 4 mostra a variação da rotação da Terra, para um período de quatro anos, comparada com um relógio de césio.* A relativa simplicidade dos átomos leva-nos a observar a Terra e verificar diferenças entre ela e os relógios atômicos. As variações registradas na Fig. 4 podem ser atribuídas às marés provocadas pela Lua e às variações sazonais dos regimes de ventos.

*Ver "The Earth's Inconstant Rotation", por John Wahr, *Sky and Telescope*, junho de 1986. Ver "Studying the Earth by Very-Long-Baseline Interferometry", por William E. Carter e Douglas S. Robertson, *Scientific American*, novembro de 1986.

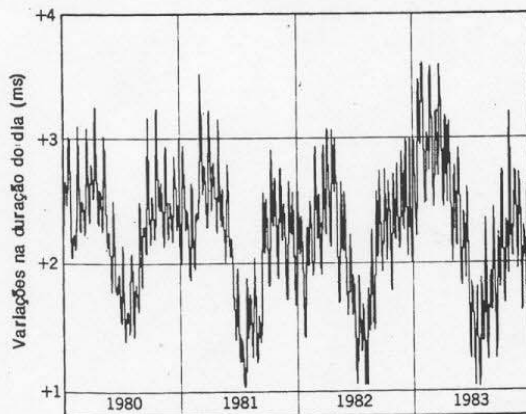


Fig. 4 A variação da duração do dia, durante um período de 4 anos. Observe que a escala vertical inteira soma apenas 4 ms (= 0,004s).

O segundo com base no relógio atômico de césio foi adotado como padrão internacional pela 13ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, em 1967. A definição então adotada é a seguinte:

Um segundo é o tempo decorrido entre 9 192 631 770 vibrações da luz (de comprimento de onda especificado) emitido pelo átomo de césio-133.

Dois relógios de césio podem funcionar durante 6 000 anos sem que as suas indicações difiram por mais de 1 segundo. Os relógios a masers de hidrogênio (ainda não adotados como padrões de tempo) têm apresentado a incrível precisão de 1 s em 30 000 000 de anos, o que

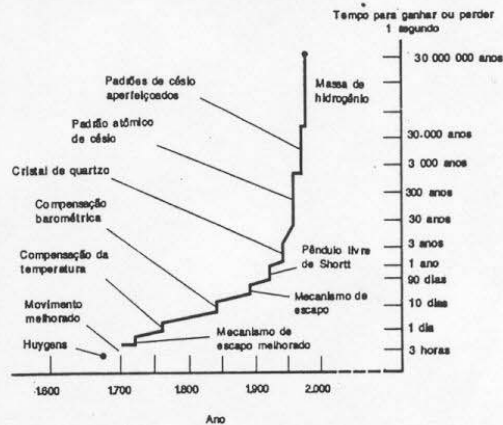


Fig. 5 Os relógios tornam-se cada vez melhores. O antigo relógio a pêndulo adiantava ou atrasava um segundo em poucas horas. Os relógios a masers de hidrogênio fariam isto somente ao cabo de 30 000 000 anos

equivale a uma diferença de 3s por século de funcionamento. A Fig. 5 mostra o impressionante elenco das melhorias no registro do tempo que têm acontecido durante os últimos 300 anos; iniciando com o relógio a pêndulo, inventado por Cristian Huygens, em 1656, e terminando com o atual maser de hidrogênio.

Exemplo 3. Isaac Asimov propôs uma unidade de tempo, baseada na mais alta velocidade e a menor distância mensurável, chamada de *fermiluz* — o tempo gasto pela luz para percorrer uma distância de 1 fermi ($= 10^{-15}m = 1$ femtômetro $= 1$ fm). (a) Quantos segundos há em um fermiluz?

Encontramos este tempo dividindo a distância por c , a velocidade da luz no vácuo ($= 3,00 \times 10^8m/s$). Assim,

$$1 \text{ fermiluz} = \frac{1 \text{ femtômetro}}{\text{velocidade da luz}} = \frac{10^{-15}m}{3,00 \times 10^8m/s} = 3,33 \times 10^{-24}s. \quad (\text{Resposta})$$

A Tabela 4 diz-nos que a partícula mais instável até hoje conhecida tem uma vida média aproximadamente igual a $10^{-23}s$, antes de desintegrar-se. Podemos dizer que esta vida média é da ordem de 3 fermiluz.

(b) A proposta de Asimov é uma contrapartida do seu simétrico *ano-luz*, que não é uma unidade de tempo, mas sim uma unidade de comprimento; correspondendo à distância percorrida pela luz em um ano. Quantos metros há em um ano-luz?

Esta distância é

$$1 \text{ ano-luz} = ct \quad (3,00 \times 10^8m/s)(3,16 \times 10^7s) = 9,48 \times 10^{15}m \quad (= 9,48 \text{ Pm}). \quad (\text{Resposta})$$

A Tabela 3 mostra-nos que a estrela mais próxima da Terra (Proxima Centauri) está a uma distância aproximadamente igual a $4 \times 10^{16}m$. Ela está afastada de nós aproximadamente 4,2 anos-luz. A luz desta estrela que chega até aos seus olhos foi emitida da estrela quando você era 4,2 anos mais jovem.

1-6 Massa

O padrão de massa do SI é um cilindro feito com uma liga de platina-irídio, guardado no Bureau Internacional de Pesos e Medidas, nas vizinhanças de Paris,

Tabela 5 Algumas Massas

Objeto	Quilogramas
Universo conhecido	$\sim 10^{53}$
Nossa Galáxia	2×10^{41}
Sol	2×10^{30}
Lua	7×10^{22}
Asteróide Eros	5×10^{15}
Pequena montanha	1×10^{12}
Navio oceânico	7×10^7
Elefante	5×10^3
Uva	3×10^{-3}
Partícula de poeira	7×10^{-10}
Molécula de penicilina	5×10^{-17}
Átomo de urânio	4×10^{-26}
Próton	2×10^{-27}
Elétron	9×10^{-31}

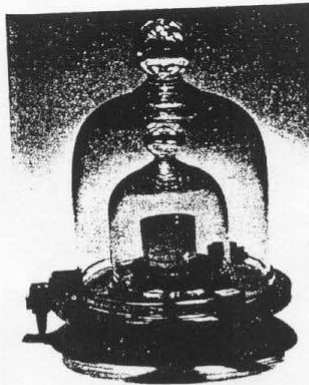


Fig. 6 O quilograma padrão, Padrão Nacional nº 20, visto no interior do seu receptáculo formado por duas campânulas de vidro.

sendo por acordo internacional a sua massa igual a um quilograma. Cópias perfeitas deste padrão foram enviadas para laboratórios de padrões em outros países e a massa dos outros corpos foram determinadas pelo método da balança de braços iguais, com precisão de uma parte em um milhão. A Tabela 5 mostra a medida de algumas massas expressas em quilogramas.

A cópia americana do quilograma padrão, conhecida como Protótipo nº 20 (ver Fig. 6), está guardado em uma urna no National Bureau of Standards. Ele é retirado de lá uma vez por ano com o objetivo de verificação dos padrões terciários. Desde 1899, ele foi levado duas vezes até a França para ser conferido com o padrão primário.

Um Padrão Secundário de Massa. As massas dos átomos podem ser comparadas entre si, com precisão maior do que se fossem comparadas com o quilograma padrão. Por este motivo, temos um padrão secundário de massa. Este padrão é o isótopo de carbono-12, ao qual, por acordo internacional, foi atribuída a massa de 12 unidades de massa atômica (abreviatura, u.m.a., ou simplesmente u). A relação entre os dois padrões é

$$1 \text{ u} = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (9)$$

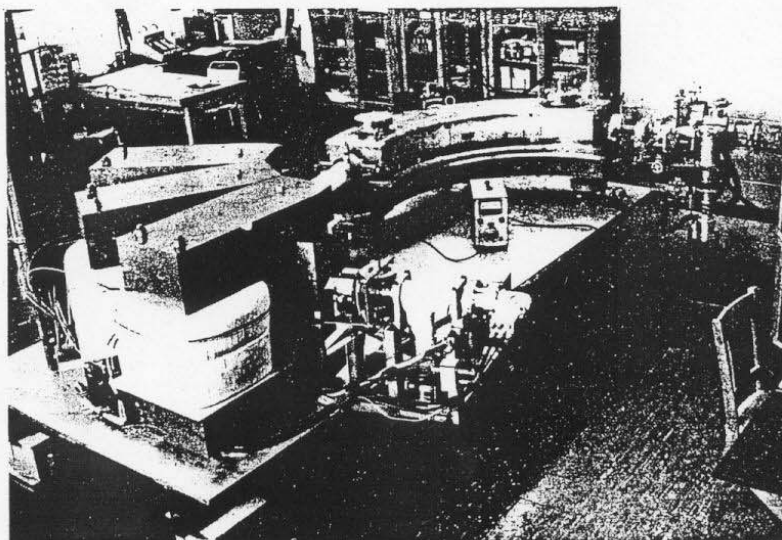
Tabela 6 Algumas Massas Atômicas

Átomo	Massa (u)	Incerteza (u)
Hidrogênio-1	1,00782504	0,00000001
Carbono-12	12,00000000	(exato)
Cobre-64	63,9297656	0,0000017
Prata-102	101,91195	0,00012
Césio-137	136,907073	0,000006
Platina-190	189,959917	0,000007
Plutônio-238	238,0495546	0,0000024

Como todas as quantidades medidas, este resultado traz consigo alguma incerteza em relação à medida. Neste caso, a incerteza fica em torno de ± 10 unidades nas últimas duas casas decimais.

Podemos determinar as massas dos outros átomos com bastante precisão, usando um espectrômetro de massa (veja a Fig. 7). A Tabela 6 mostra algumas massas atômicas.

Fig. 7 Um espectrômetro de massa de alta resolução, localizado na Universidade de Manitoba. Ele é usado para se efetuar medições precisas das massas atômicas, tais como as relacionadas na Tabela 6. O trabalho neste laboratório é apoiado pelo Conselho Nacional de Pesquisas do Canadá.



RESUMO

Medidas Físicas.

A Física está baseada na medição de grandezas utilizadas para descrever as mudanças que ocorrem no Universo. Cada quantidade é medida com base em uma unidade, sendo expressa como múltiplo desta unidade (por exemplo, metros, segundos e quilômetros por hora). Todas as unidades usadas podem ser expressas como combinações de algumas poucas unidades *fundamentais*, que são selecionadas de forma a tornar o seu uso o mais conveniente possível.

Unidades do SI.

O sistema de unidades usado neste livro é o Sistema Internacional de Unidades (SI). As quatro unidades fundamentais apresentadas na Tabela 1 servem como base nos capítulos iniciais deste livro. *Padrões* que devem ser acessíveis e invariáveis, definem unidades para estas grandezas fundamentais e são definidos mediante acordos internacionais. Os padrões estão na base de toda a medida física, tanto no que se refere às grandezas fundamentais quanto às grandezas derivadas, tais como, força ou resistência elétrica. Os prefixos usados na Tabela 2 simplificam a notação em muitos casos.

Transformações de Unidades.

A conversão de unidades de um sistema para outro (por exemplo, de milhas por hora para quilômetros por segundo) podem ser realizadas pela utilização de *conversões em cadeia*, nas quais as unidades são tratadas como grandezas algébricas, enquanto os dados originais são multiplicados sucessivamente por fatores de conversão, escritos como unidades, até que as unidades desejadas sejam obtidas. Veja a Seção 1-3 e o Exemplo 1.

O Metro.

A unidade de comprimento — o metro — é definida como a distância percorrida pela luz durante um intervalo de tempo precisamente determinado. Outras unidades, bem como os seus múltiplos e submúltiplos podem ser legalmente definidas, como é o caso da jarda, nos EUA.

O Segundo.

A unidade de tempo — o segundo — foi primeiramente definida em termos da rotação da Terra. Atualmente o segundo é definido nos termos da frequência da luz emitida por uma fonte atômica (césio-137). Sinais de tempo precisos são difundidos para todo o mundo por meio de emissões radiofônicas ajustadas por relógios atômicos em vários laboratórios de padronização.

O Quilograma.

A unidade de massa — o quilograma — é definida nos termos de um protótipo feito com uma liga de platina-irídio, guardada em Paris, França. Para problemas atômicos, a unidade de massa atômica, definida em termos de carbono-12, também é usada.

QUESTIONÁRIO

1. Como você criticaria a afirmação: "Uma vez que um padrão foi escolhido, pela própria definição de padrão, ele é invariável"?
2. Relacione as características, além da acessibilidade e da invariabilidade, que você consideraria desejáveis para um padrão físico.
3. Você pode imaginar um sistema de unidades fundamentais (Tabela 1) no qual o tempo não fosse incluído?
4. Das quatro unidades relacionadas na Tabela 1, apenas uma — o quilograma — tem um prefixo (veja a Tabela 2). Não seria mais conveniente definir a massa do cilindro de liga de platina-irídio, localizado no Bureau Internacional de Pesos e Medidas, como 1g ao invés de 1kg?
5. Por que não existem no SI unidades fundamentais para área e volume?
6. Pretendeu-se originalmente que o metro fosse um décimo milionésimo da linha meridiana que se estende do Pólo Norte até o Equador e que passa por Paris. Esta definição não coincide com o metro padrão em cerca de 0,023%. Isto significa que no metro padrão há uma faixa de incerteza?
7. Ao se definir, como padrão de comprimento, a barra de um metro padrão também foi especificada a temperatura. Como pode este comprimento ser considerado fundamental se outra grandeza física, a temperatura, deve ser especificada na escolha do padrão?
8. Ao redefinirem o metro em termos da velocidade da luz, por que os delegados à Conferência Geral sobre Pesos e Medidas não simplificaram o assunto definindo a velocidade da luz como sendo 3×10^8 m/s exatamente? Então, por que não definir a velocidade da luz como sendo 1m/s exatamente? Estas duas hipóteses foram examinadas por eles? Se for o caso, por que as rejeitaram?
9. O que significa o prefixo "micro" na expressão forno a microondas? Foi proposto que os alimentos irradiados por raios gama, para aumentar a sua duração, fossem chamados "pico-irradiados" (em inglês: pico waved). O que você supõe que esta expressão poderia significar?
10. Sugira algum modo de medir: (a) o raio da Terra; (b) a distância entre o Sol e a Terra e (c) o raio do Sol.
11. Sugira um modo de medir: (a) a espessura de uma folha de papel; (b) a espessura de uma película de sabão e (c) o diâmetro de um átomo.
12. Enumere vários fenômenos repetitivos que ocorrem na natureza que poderiam servir como padrões razoáveis de tempo.
13. Poder-se-ia definir "1 segundo" como sendo igual à pulsação do atual presidente da Sociedade Americana de Física. Galileu usou o seu próprio pulso como um cronômetro em alguns dos seus trabalhos. Por que a definição baseada em um relógio atômico é melhor?
14. Que critérios um bom relógio deve satisfazer?
15. De acordo com o que você sabe sobre pêndulos, cite os inconvenientes de se usar o período de um pêndulo como padrão de tempo.
16. Em 30 de junho de 1981, o "minuto" compreendido entre 10h59 min e 11 horas foi arbitrariamente aumentado de modo a conter 61 segundos. Este avanço de um segundo foi introduzido para compensar o fato de que a rotação da Terra havia diminuído quando comparada com os relógios atômicos. Por que é desejável que se reajustem os nossos relógios dessa maneira?
17. Uma emissora de rádio anuncia "sintonize 89,5 no seu rádio FM". O que isto significa?
18. Por que é útil se ter dois padrões para massa: o quilograma e o átomo de carbono-12?
19. O padrão atual do quilograma é acessível, invariável e indestrutível? Tem simplicidade para fins de comparação? Sob este aspecto, o padrão atômico é melhor? Por que não adotar um padrão atômico como se faz para o comprimento e o tempo?
20. Sugira métodos práticos por meio dos quais se possa determinar a massa dos vários objetos relacionados na Tabela 5.
21. Dê exemplos de objetos cujas massas estejam no amplo limite mostrado na Tabela 5, entre a de um navio oceânico e uma pequena montanha e faça uma estimativa dessas massas.
22. Os críticos do sistema métrico frequentemente objetam que, ao invés de se pedir "uma libra de manteiga", pede-se "0,454 kg de manteiga". A consequência disto então é que o sistema métrico torna a vida mais complicada. Como você refutaria esta objeção?

EXERCÍCIOS E PROBLEMAS

Seção 1-2. O Sistema Internacional de Unidades

- 1E. Use os prefixos da Tabela 2 e expresse: (a) 10^6 fone; (b) 10^{-6} fone; (c) 10^4 distância; (d) 10^9 antes; (e) 10^{12} pia.
- 2E. Alguns dos prefixos do Sistema Internacional foram assimilados na linguagem coloquial. (a) Qual seria o equivalente semanal de um salário de 36k (=36 "quilobucks"; onde 1 "buck" = 1 dólar). (b) Um prêmio de loteria de 10 "megabucks" será pago ao longo de 20 anos. Quanto seria recebido mensalmente? (c) Um disco rígido de um computador tem capacidade de 30 Mb (30 megabytes). Considerando que uma palavra ocupa 8 bytes, quantas palavras ele pode armazenar? No jargão dos usuários de computadores, um quilo não significa 10^3 , mas sim $2^{10} = 1024$.
- Seção 1-4. Comprimento
- 3E. Um ônibus espacial está em órbita ao redor da Terra, a uma altura de 300km. Calcule esta distância em: (a) milhas e (b) em quilômetros.
- 4E. Qual é a sua altura em pés?
- 5E. O micrômetro (10^{-6} m) é comumente chamado de *micron*. (a) Quantos microns existem em 1km? (b) Que fração do cm é igual a 1μ? Quantos microns existem em 1 jarda?
- 6E. A Terra é aproximadamente uma esfera de raio igual a $6,37 \times 10^6$ m. (a) Qual é o comprimento da linha do equador em quilômetros? (b) Qual é a área de sua superfície em quilômetros quadrados? (c) Qual é o seu volume?
- 7E. Calcule o número de quilômetros que existem em 20 milhas, usando apenas os seguintes fatores de conversão: 1 milha = 5 280

pés, 1 pé = 12 polegadas, 1 polegada = 2,54cm, 1m = 100cm e 1km = 1000m.

8E. Dê a relação entre: (a) uma polegada quadrada e um centímetro quadrado; (b) uma milha quadrada e um quilômetro quadrado; (c) um metro cúbico e um centímetro cúbico e (d) um pé quadrado e uma jarda quadrada.

9P. Uma unidade de área frequentemente utilizada para expressar áreas de terra é o *hectare*, definido como 10^4m^2 . Uma mina de carvão a céu aberto consome 75 hectares de terra, a uma profundidade de 26m por ano. Calcule o volume de terra retirada neste tempo em km^3 .

10P. Uma "cord" (unidade de medida de lenha usada nos EUA) é equivalente a uma pilha com 8 pés de comprimento, 4 pés de largura e 4 pés de altura. Quantas "cords" existem em 1 metro cúbico?

11P. Uma sala mede 20 pés e 2 polegadas de comprimento e 12 pés e 5 polegadas de largura. Qual é a sua área em: (a) pés quadrados e (b) em metros quadrados? Se o teto está a 12 pés e 2,5 polegadas acima do assoalho, qual é o volume desta sala em (c) pés cúbicos e (d) metros cúbicos?

12P. A Antártida, grosseiramente falando, tem a forma semicircular de raio igual a 2 000km. A espessura média do gelo que a cobre é de 3 000m. Quantos centímetros cúbicos de gelo a Antártida contém? (Ignore a curvatura da Terra.)

13P. Um cubo de açúcar típico tem 1cm de aresta. Se você tivesse uma caixa cúbica contendo 1 mol de cubos de açúcar, qual deveria ser o comprimento da aresta da caixa? ($1 \text{ mol} = 6,02 \times 10^{23}$ unidades.)

14P. Os engenheiros hidráulicos frequentemente utilizam, como unidade de medida de água, o *acre-pé*, definido como o volume de água que cobriria 1 acre de terra com a profundidade de 1 pé. Uma tempestade forte despeja 2 polegadas de chuva em 30 minutos, sobre uma cidade de 26km^2 de área. Qual o volume de água em acre-pés caído na cidade?

15P. Uma certa tinta para pintar paredes garante uma cobertura de 460 $\text{pés}^2/\text{gal}$. (a) Expresse esta quantidade em metros quadrados por litro. (b) Expresse esta quantidade em unidades fundamentais do SI (veja o Apêndice A). (c) Qual é o inverso desta quantidade e qual o seu significado físico?

16P. As distâncias astronômicas são tão grandes em comparação com as terrestres que unidades de comprimento maiores são utilizadas para melhor compreensão das distâncias entre os astros. Uma *unidade astronômica* (UA) é igual à distância média entre a Terra e o Sol, aproximadamente igual a $92,9 \times 10^6$ milhas. O *parsec* (pc) é a distância sob a qual 1 UA é subtendida por um ângulo de 1 segundo de arco. O *ano-luz* (a.l.) é a distância que a luz, propagando-se no vácuo, com uma velocidade de 186 000 mi/s, cobriria em um ano. (a) Expresse a distância da Terra ao Sol em parsecs e em anos-luz. (b) Expresse um ano-luz e um parsec em quilômetros. Embora o ano-luz seja muito utilizado, o *parsec* é a unidade usada profissionalmente entre os astrônomos.

17P. Suponha que a distância média do Sol até a Terra seja 400 vezes a distância da Lua até a Terra. Considere agora um eclipse total do Sol e diga que conclusões podem ser tiradas: (a) da relação entre o diâmetro do Sol e o da Lua e (b) dos volumes relativos do Sol e da Lua. (c) Segure uma pequena moeda de modo que ela obscureça a Lua cheia e meça o ângulo com que ela é visualizada pelo olho. A partir deste resultado experimental e sabendo a distância entre a Terra e a Lua ($= 3,8 \times 10^5 \text{ km}$) estime o diâmetro da Lua.

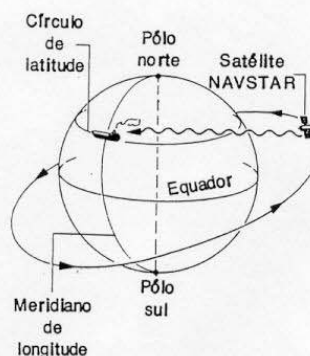


Fig. 8 Problema 19.

18P*. O quilograma padrão (veja Fig. 6) tem a forma de um cilindro circular com a altura igual ao seu diâmetro. Mostre que, para um cilindro circular de volume fixo, esta igualdade fornece a menor área superficial; deste modo são minimizados os efeitos de contaminação superficial e o desgaste.

19P*. O sistema de navegação do petroleiro *Gulf SupernoX* usa os satélites do Sistema Global de Posicionamento (GPS/NAVSTAR) para determinar a latitude e a longitude; veja a Fig. 8. Estas são $43^\circ 36' 25,3'' \text{ N}$ e $77^\circ 31' 48,2'' \text{ W}$. Se a precisão destas determinações é $\pm 0,5''$, calcule a incerteza na medida da posição do petroleiro: (a) ao longo da linha norte-sul e (b) ao longo da linha leste-oeste? (c) Onde está o petroleiro?

Seção 1-5. Tempo

20E. Expresse a velocidade da luz, $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ em (a) pés por nanossegundos e (b) milímetros por picossegundos.

21E. Enrico Fermi afirmou que a duração de uma aula padrão (50 min) é aproximadamente igual a 1 microscéculo. Quanto equivale 1 microscéculo em minutos e qual o erro percentual com relação à estimativa feita por Fermi?

22E. Existem 365,25 dias em um ano. Quantos segundos existem em um ano?

23E. Um certo relógio de pêndulo (com mostrador de 12 horas) adianta um minuto por dia. Após ajustar o relógio, quanto se deve esperar para que ele volte a indicar a hora correta?

24E. Qual é a idade do Universo em dias? (Veja a Tabela 4.)

25E. Uma unidade de tempo utilizada às vezes em Microfísica é o chamado "shake", igual a 10^{-8} s . (a) Existem mais "shakes" em um segundo que segundos em um ano? (b) Os seres humanos existem há aproximadamente 10^6 anos, enquanto o Universo existe há 10^{10} anos. Se tomarmos a idade do Universo como 1 dia, por quantos segundos a espécie humana tem existido?

26E. As velocidades máximas de alguns animais são dadas aproximadamente a seguir, em milhas por hora: (a) um pardal: 3×10^{-2} ; (b) aranha: 1,2; (c) esquilo: 12; (d) um ser humano: 23; (e) coelho: 35; (f) raposa: 42; (g) leão: 50; e (h) leopardo: 70. Converta estes dados em metros por segundo.

27P. Uma unidade astronômica (UA) é a distância média da Terra ao Sol, aproximadamente igual a 150 000 000km. A velocidade da luz vale cerca de $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$. Escreva esta velocidade em termos de unidades astronômicas por minuto.

28P. Até 1883, cada cidade nos EUA mantinha o seu próprio tempo local. Hoje os viajantes ajustam os seus relógios somente quando a variação chega a 1 h. De quanto você deve se deslocar, em graus de longitude, até que o seu relógio precise ser reajustado?

29P. Em duas provas diferentes, os vencedores de uma corrida de 1 milha completaram-nas em 3 min 58,05 s e 3 min 58,20 s. Para que se possa concluir que o corredor de menor tempo tenha sido realmente o vencedor da prova, qual deve ser o erro máximo tolerável, em metros, na medida das distâncias?

30P. Cinco relógios estão sendo testados no laboratório. Exatamente à tarde, conforme determinado pelo sinal WWV, os relógios forneceram as seguintes leituras em dias sucessivos:

Relógio	Dom.	Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sáb.
A	12:36:40	13:36:56	12:37:12	12:37:27	12:37:44	12:37:59	12:38:14
B	11:59:59	12:00:02	11:59:57	12:00:07	12:00:02	11:59:56	12:00:03
C	15:50:45	15:51:43	15:52:41	15:53:39	15:54:37	15:55:35	15:56:33
D	12:03:59	12:02:52	12:01:45	12:00:38	11:59:31	11:58:24	11:57:17
E	12:03:59	12:02:49	12:01:54	12:01:52	12:01:32	12:01:22	12:01:12

Como você ordenaria estes relógios, em ordem crescente do seu valor como bons marcadores de tempo? Justifique a sua escolha.

31P. Supondo que a duração do dia aumente de 0,001s por século, calcule o efeito acumulativo na medida do tempo durante 20 séculos. Esta diminuição da rotação da Terra é indicada pela observação de ocorrências de eclipses solares durante este período.

32P*. O tempo que a Lua gasta para retornar à mesma posição em relação às estrelas fixas é chamado *mês sideral*. O intervalo de tempo entre fases lunares idênticas é chamado *mês lunar*. O mês lunar é maior do que o mês sideral? Por quê? Qual é a diferença entre estes dois valores?

Seção 1-6 Massa

33E. Usando as conversões e dados deste Capítulo, determine o número de átomos de hidrogênio necessários para formar 1kg.

34E. Uma molécula de água (H_2O) contém dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio. Um átomo de hidrogênio tem uma massa de 1 u e um átomo de oxigênio tem massa aproximada de 16 u. (a) Calcule a massa de uma molécula de água em quilogramas. (b) Calcule quantas moléculas de água existem nos oceanos do mundo. Os oceanos possuem uma massa total de $1,4 \times 10^{21}$ kg.

35E. A Terra tem massa de $5,98 \times 10^{24}$ kg. A massa média dos átomos que compõem a Terra vale 40 u. Quantos átomos existem na Terra?

36E. Na Europa Continental uma libra vale meio quilograma. O que é melhor comprar, uma libra alemã de café por três dólares ou uma libra americana por 2,40 dólares?

37E. Que massa de água caiu na cidade do Problema 14 durante a tempestade? Um metro cúbico de água tem massa de 10^3 kg.

38P. (a) Supondo que a densidade (massa/volume) de água seja exatamente igual a 1 g/cm^3 , exprima a densidade da água em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3). (b) Suponha que sejam necessárias 10 horas para esvaziar um recipiente de 5 700 m^3 de água. Qual é a vazão da água do recipiente, em quilogramas por segundo?

39P. Uma pessoa sob dieta perde 2,3 kg por semana. Exprima a perda de massa por unidade de tempo, em miligramas por segundo.

40P. Os grãos de areia fina das praias da Califórnia têm um raio de $50 \mu\text{m}$. Que massa de grãos de areia teria uma área superficial igual à de um cubo de 1 m de aresta? A areia é feita de dióxido de silício e 1 m^3 de areia possui uma massa de 2 600 kg.

41P. A distância entre os átomos ou moléculas, vizinhos, em uma substância sólida pode ser estimada calculando-se o dobro do raio de uma esfera cujo volume seja igual ao volume por átomo do material. Calcule as distâncias entre os átomos vizinhos no (a) ferro; (b) sódio.

As densidades do ferro e do sódio são $7,87 \text{ g/cm}^3$, respectivamente; a massa de um átomo de ferro vale $9,27 \times 10^{-26}$ kg e a do átomo de sódio é igual a $3,82 \times 10^{-26}$ kg.