

Manual Compacto de  
**Física**  
ENSINO MÉDIO

# EXPEDIENTE

PRESIDENTE E EDITOR	<b>Italo Amadio</b>
DIRETORA EDITORIAL	<b>Katia F. Amadio</b>
EDITORA-ASSISTENTE	<b>Nina Schipper</b>
ASSISTENTE EDITORIAL	<b>Renata Aoto</b>
REVISÃO TÉCNICA	<b>Tarcísio Carvalho</b>
PREPARAÇÃO	<b>Fátima Cezare</b>
REVISÃO	<b>Geisa Mathias Oliveira</b>
PROJETO GRÁFICO	<b>Larissa Wostog Ono</b>
ICONOGRAFIA	<b>Breno Henrique</b>
DIAGRAMAÇÃO	<b>Luiz Fernando Botter</b>
PRODUÇÃO GRÁFICA	<b>Resolvo Ponto Com</b>
	<b>Helio Ramos</b>

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Scarpellini, Carminella

Manual compacto de física : ensino médio / Carminella Scarpellini, Vinícius Barbosa Andreatta. -- 1. ed. -- São Paulo: Rideel, 2012.

1. Física (Ensino médio) I. Andreatta, Vinícius Barbosa. II. Título..

12-03905

CDD-530.07

## Índices para catálogo sistemático:

1. Física: Ensino médio 530.07

**ISBN 978-85-339-2078-1**

Todos os esforços foram feitos para identificar e confirmar a origem e autoria das imagens utilizadas nesta obra, bem como local, datas de nascimento e de morte de cada personalidade abordada. Os editores corrigirão e atualizarão em edições futuras informações e créditos incompletos ou involuntariamente omitidos. Solicitamos que entre em contato conosco caso algo de seu conhecimento possa complementar ou contestar informações apresentadas nesta obra.

© Copyright - Todos os direitos reservados à

 **EDITORAR  
RIDEEL**



Av. Casa Verde, 455 – Casa Verde  
CEP 02519-000 – São Paulo – SP  
e-mail: [sac@rideel.com.br](mailto:sac@rideel.com.br)  
[www.editorarideel.com.br](http://www.editorarideel.com.br)

Proibida qualquer reprodução, seja mecânica ou eletrônica,  
total ou parcial, sem prévia permissão por escrito do editor.

1 3 5 7 9 8 6 4 2  
0 4 1 2

# SUMÁRIO

<b>Introdução</b> .....	15
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Grandezas físicas</b> .....	17
Unidades de medida e Sistema Internacional	
de Unidades (SI) .....	17
Grandezas escalares e grandezas vetoriais.....	18
Soma vetorial .....	19
Decomposição de um vetor .....	21
Análise dimensional .....	23
Teste seu saber .....	25
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Cinemática</b> .....	27
Conceptos fundamentais .....	27
Movimento e repouso .....	27
Ponto material, corpo extenso e referencial .....	27
Espaço percorrido e deslocamento escalar. Velocidade	
escalar média e velocidade média.....	29
Velocidade instantânea.....	30
Teste seu saber .....	33
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Movimento uniforme (MU)</b> .....	37
Função horária do movimento uniforme.....	37
Representação gráfica do movimento uniforme .....	40
Teste seu saber .....	45
<b>Capítulo 4</b>	
<b>Movimento variado</b> .....	49
Movimento uniformemente variado (MUV).....	51
Função horária dos espaços no MUV .....	52
Representação gráfica do movimento uniformemente	
variado .....	53
Equação de Torricelli no MUV.....	56
Velocidade média no MUV .....	56
Teste seu saber .....	57

<b>Capítulo 5</b>	
<b>Aceleração da gravidade – Queda livre</b>	61
Teste seu saber	65
<b>Capítulo 6</b>	
<b>Lançamento de projéteis</b>	71
Movimento sob a ação da gravidade – Balística	71
Teste seu saber	78
<b>Capítulo 7</b>	
<b>Dinâmica</b>	83
Primeira Lei de Newton: Princípio da Inércia	83
Segunda Lei de Newton: Princípio Fundamental da Dinâmica	84
Intensidade de forças (em newton)	86
Terceira Lei de Newton: Princípio da Ação e Reação	87
Descrição de forças – Peso ou força-peso	88
Força de tração em um fio	90
Força normal e força de atrito	91
Atrito estático ou dinâmico?	94
Força de resistência do ar	95
Força elástica. Lei de Hooke	96
Referenciais inerciais e não inerciais	97
Teste seu saber	98
<b>Capítulo 8</b>	
<b>Movimento circular</b>	104
Movimento circular uniforme	105
Transmissão de movimento	108
Aceleração centrípeta e força centrípeta	109
Teste seu saber	110
<b>Capítulo 9</b>	
<b>Gravitação</b>	113
Leis de Kepler	115
Lei da Gravitação Universal	118
Um pouco de História	120
Teste seu saber	123
<b>Capítulo 10</b>	
<b>Trabalho e energia</b>	128

Trabalho de uma força constante.....	128
Trabalho de uma força (F) durante um deslocamento (d).....	128
Trabalho de uma força variável.....	129
Trabalho da força elástica .....	131
Potência.....	131
Potência e velocidade .....	132
Energia.....	133
Energia cinética .....	133
Energia potencial gravitacional.....	134
Energia potencial elástica.....	135
Forças conservativas e forças dissipativas .....	136
Conservação de energia mecânica – Sistemas conservativos.....	137
Rendimento.....	139
Teste seu saber .....	141

## **Capítulo 11**

<b>Quantidade de movimento.....</b>	146
Impulso de uma força constante .....	146
Impulso de uma força variável.....	147
Teorema do impulso.....	148
Quantidade de movimento de um sistema .....	149
Conservação da quantidade de movimento.....	150
Quantidade de movimento e colisões – Colisões elásticas e inelásticas .....	151
Teste seu saber .....	152

## **Capítulo 12**

<b>Equilíbrio de corpos rígidos.....</b>	157
Equilíbrio de um ponto material .....	157
Momento de uma força (torque).....	157
Equilíbrio de um corpo extenso.....	158
Teste seu saber .....	162

## **Capítulo 13**

<b>Estática dos fluidos.....</b>	169
Pressão .....	170
Densidade .....	171
Pressão no interior de um fluido .....	173

Princípio de Pascal.....	174
Princípio de Arquimedes .....	175
Peso aparente de um corpo e empuxo.....	175
Teste seu saber .....	176
<b>Capítulo 14</b>	
<b>Introdução à termodinâmica.....</b>	181
Calor .....	181
Temperatura.....	181
Escalas termométricas.....	181
Lei Zero da Termodinâmica .....	183
Calor, energia e temperatura: três conceitos, uma confusão ...	183
Transferência de energia térmica.....	183
Teste seu saber .....	186
<b>Capítulo 15</b>	
<b>Dilatação térmica .....</b>	190
Dilatação linear .....	190
Dilatação superficial .....	192
Comportamento anômalo da água .....	194
Teste seu saber .....	194
<b>Capítulo 16</b>	
<b>Transformações gasosas .....</b>	197
Transformação isobárica .....	199
Transformação isotérmica .....	200
Transformação isocórica .....	200
Equação geral dos gases.....	202
Teoria cinética dos gases .....	203
Alteração da pressão de um gás.....	205
CNTP, TPN ou CN .....	206
Volume molar.....	206
Equação de Clapeyron .....	206
Teste seu saber .....	207
<b>Capítulo 17</b>	
<b>Calorimetria .....</b>	211
Unidades de calor.....	211
Capacidade térmica de um corpo .....	212
Variação de energia térmica e de temperatura –	
Calor sensível .....	212

Variação da energia térmica e mudança de estado físico –	
Calor latente .....	216
Trocas de calor em sistemas isolados .....	219
Teste seu saber .....	219

## **Capítulo 18**

<b>Termodinâmica</b> .....	223
Trabalho de uma transformação termodinâmica .....	223
Energia interna .....	224
Primeiro Princípio da Termodinâmica .....	225
Segundo Princípio da Termodinâmica –	
Máquinas térmicas .....	227
Rendimento de uma máquina térmica .....	227
Entropia .....	229
Transformações termodinâmicas de um gás .....	231
Moto-perpétuo .....	231
Teste seu saber .....	233

## **Capítulo 19**

<b>Oscilações</b> .....	236
Oscilador massa-mola .....	236
Movimento harmônico simples .....	237
A velocidade e a aceleração no MHS .....	239
Período de sistemas oscilantes .....	241
Teste seu saber .....	242

## **Capítulo 20**

<b>Ondas</b> .....	246
Movimento ondulatório .....	246
Tipos de ondas .....	247
Quanto à natureza da onda .....	247
Quanto à direção de propagação .....	248
Velocidade de propagação de uma onda .....	249
Reflexão de ondas .....	253
Refração das ondas .....	256
Interferência .....	259
Ondas estacionárias .....	261
Difração .....	264
O som .....	265
Efeito Doppler .....	266
Teste seu saber .....	269

## **Capítulo 21**

<b>Princípios da óptica geométrica</b> .....	275
Diferença entre luz e visão.....	275
Fontes e velocidade da luz .....	275
Princípios da óptica geométrica .....	278
Ângulo visual.....	281
Reflexão.....	282
Espelho plano .....	283
Associação de espelhos planos .....	288
Teste seu saber .....	289

## **Capítulo 22**

<b>Espelhos esféricos</b> .....	291
Estudo das imagens nos espelhos esféricos.....	293
Relações algébricas para imagens nos espelhos esféricos.....	295
Teste seu saber .....	298

## **Capítulo 23**

<b>Refração da luz</b> .....	302
Índice de refração.....	302
Lei de Snell-Descartes.....	304
Reflexão total .....	306
Prisma .....	307
Dispersão da luz .....	307
A cor de um objeto .....	309
Teste seu saber .....	310

## **Capítulo 24**

<b>Lentes</b> .....	314
Lentes esféricas.....	314
Tipos de lentes esféricas.....	315
Focos de uma lente esférica.....	317
Vergência de uma lente .....	318
Determinação geométrica de imagens em lentes .....	319
Relações algébricas de imagens em lentes .....	321
Teste seu saber .....	326

## **Capítulo 25**

<b>Eletricidade</b> .....	329
Carga elétrica.....	329

Carga elétrica elementar .....	330
Tipos de eletrização .....	331
Por atrito.....	331
Por contato.....	331
Por indução .....	332
Lei de Du Fay .....	333
Lei de Coulomb .....	334
Teste seu saber .....	335

## **Capítulo 26**

<b>Campo elétrico</b> .....	340
Linhas de força do campo elétrico .....	342
Campo elétrico de um condutor esférico carregado.....	343
Potencial elétrico .....	343
Energia potencial elétrica .....	343
Determinação do potencial elétrico .....	345
Diferença de potencial (ddp).....	346
Corrente elétrica.....	348
Intensidade da corrente elétrica .....	349
Resistência elétrica – Leis de Ohm .....	350
Potência elétrica .....	353
Energia elétrica .....	354
Teste seu saber .....	356

## **Capítulo 27**

<b>Associação de resistores e circuitos elétricos</b> .....	365
Associação de resistores .....	365
Gerador elétrico .....	367
Receptor elétrico .....	368
Círculo elétrico de corrente contínua .....	368
Instrumentos elétricos de medida .....	370
Amperímetro.....	370
Voltímetro .....	371
Teste seu saber .....	371

## **Capítulo 28**

<b>Magnetismo</b> .....	378
Propriedade de inseparabilidade dos polos .....	379
Natureza da propriedade magnética .....	380
Campo magnético.....	382

Força sobre condutores elétricos.....	385
Campo magnético e corrente elétrica.....	386
Espiras e solenoides.....	387
Teste seu saber .....	389
<b>Capítulo 29</b>	
<b>Ondas eletromagnéticas.....</b>	<b>394</b>
Leis de Maxwell .....	395
Efeito fotoelétrico.....	396
Teste seu saber .....	398
<b>Capítulo 30</b>	
<b>Desenvolvimento tecnológico .....</b>	<b>400</b>
Alavancas.....	400
Relógio de pulso .....	400
Lâmpada incandescente .....	400
O origem da radioatividade .....	401
Radar.....	401
Copiadora xerográfica .....	402
Lentes gravitacionais.....	402
Origem da mecânica quântica .....	402
Raios <i>laser</i> .....	403
Os relâmpagos e os para-raios .....	404
Como se formam as miragens?.....	406
A exploração espacial .....	406
Qual a importância do telescópio espacial, como o Hubble? .....	409
<b>Respostas das atividades.....</b>	<b>412</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>430</b>

# INTRODUÇÃO

Classicamente, a Física é definida como uma das ciências que investigam os fenômenos da natureza, os movimentos e suas causas, os fenômenos mecânicos, os térmicos, os elétricos, os magnéticos, entre outros.

Contribuições à Física, como, por exemplo, as observações acerca do Sol e da Lua e seus movimentos, remontam à pré-história, mas talvez tenham sido os filósofos gregos, entre 650 e 250 a.C., os primeiros a tentar explicar alguns dos fenômenos da natureza.

A Física, como ciência, começou a se desenvolver a partir de estudos baseados essencialmente na Astronomia, realizados por Giordano Bruno, Copérnico, Tycho Brahe, Kepler e Galileu.

A partir do final do século XIX, com a descoberta da radioatividade e do desenvolvimento da Física moderna, a definição original de Física perde um pouco do seu sentido.

Frequentemente, a Física está associada a outras ciências como a Química, a Biologia, a Astronomia e a Geografia.



# 1

# Grandezas físicas

Sentimentos como tristeza, amor, felicidade, cansaço não podem ser traduzidos em número, portanto, não se constituem em grandezas. *Grandeza* é um caráter daquilo que pode ser medido. Parâmetros como massa, tempo, velocidade, força, energia são considerados grandezas porque podem ser medidos, pode-se estabelecer uma intensidade, isto é, quantificá-los.

## Unidades de medida e Sistema Internacional de Unidades (SI)

Toda grandeza possui uma intensidade, isto é, pode ser traduzida por um valor numérico acompanhado de uma unidade. A distância entre dois corpos, por exemplo, pode ser explicitada em metros, centímetros, quilômetros, milhas, pés, polegadas, entre outras unidades. Com a finalidade de se eliminar essa pluralidade de unidades, em 1960, durante 11<sup>a</sup> Conferência de Pesos e Medidas, foi formulado um novo sistema, denominado Sistema Internacional de Unidades (SI).

Com base no SI, sete são as unidades básicas, a saber:

Grandeza	Unidade	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

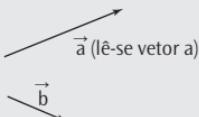
O SI também sugere os seguintes prefixos, com seus respectivos símbolos e a potência de dez correspondente, a serem utilizados quando necessário:

to	femto	pico	nano	micro	mili	centi	deci
a	f	p	n	$\mu$	m	c	d
$10^{-18}$	$10^{-15}$	$10^{-12}$	$10^{-9}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
deca	hecto	quilo	mega	giga	tera	peta	exa
da	h	k	M	G	T	P	E
$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$	$10^{15}$	$10^{18}$

## Vetor

Vetor é um operador matemático que possui módulo (ou intensidade), direção e sentido. Podemos representar um vetor:

Quando uma grandeza é representada por meio de seu vetor,  $\vec{a}$ , estamos nos reportando à intensidade, à direção e ao sentido. O módulo de um vetor, no entanto, pode ser representado do seguinte modo:  $|\vec{a}| = a$ .



## Grandezas escalares e grandezas vetoriais

Grandezas escalares são aquelas que ficam perfeitamente definidas apenas por sua intensidade, tais como: tempo (5 h; 920 s), massa (4,2 kg; 380 g), temperatura (20°C; 48 K) e potência (750 W; 55 hp), entre outras.

Grandezas vetoriais são aquelas que para ficarem perfeitamente definidas necessitam de uma intensidade, uma direção e um

sentido. Como exemplo, temos: força, velocidade, deslocamento, campo elétrico, quantidade de movimento etc.

## **Soma vetorial: uma soma em que $2 + 2$ pode não ser igual a $4$**

Uma soma vetorial implica a análise da intensidade, da direção e do sentido de cada um dos vetores que constituem a soma em questão. A soma de vetores sempre resulta em um outro vetor, frequentemente denominado *vetor soma*, *vetor resultante* ou simplesmente *resultante*. Uma soma vetorial pode ser tratada a partir dos casos particulares, que são três.

Como exemplo, tomemos dois vetores  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  de módulos respectivamente iguais a 80 e 30 unidades, cuja soma resulta em um vetor  $\vec{s}$ . Qualquer que seja a soma, podemos escrever:  $\vec{s} = \vec{a} + \vec{b}$

1<sup>a</sup> possibilidade – os vetores possuem a mesma direção e o mesmo sentido.

Neste caso, a soma vetorial se assemelha a uma soma aritmética e podemos então escrever:

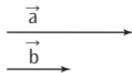
$$|\vec{s}| = s$$

$$s = |\vec{a}| + |\vec{b}|$$

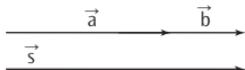
$$s = 80 + 30$$

$$s = 110 \text{ unidades}$$

Admitindo-se que os vetores possam ser representados como



a soma vetorial pode ser indicada:



2<sup>a</sup> possibilidade – os vetores possuem a mesma direção e sentidos contrários.

Neste caso, a soma vetorial se assemelha a uma subtração aritmética e podemos então escrever:

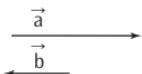
$$|\vec{s}| = s$$

$$s = |\vec{a}| + |\vec{b}|$$

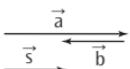
$$s = 80 - 30$$

$$s = 50 \text{ unidades}$$

Admitindo que os vetores possam ser representados como



a soma vetorial pode ser indicada:



3<sup>a</sup> possibilidade – os vetores são perpendiculares.

Neste caso,

$$|\vec{s}| = s$$

$$s = |\vec{a}| + |\vec{b}|$$

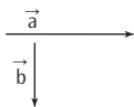
e o cálculo do módulo do vetor soma é feito por meio do Teorema de Pitágoras:

$$s^2 = 80^2 + 30^2$$

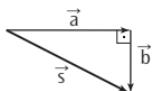
$$s^2 = 6400 + 900$$

$$s = \sqrt{7300} \text{ unidades}$$

Admitindo-se que os vetores possam ser representados como



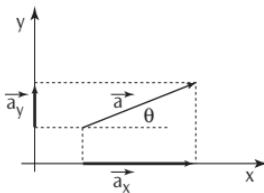
a soma vetorial pode ser indicada:



Qualquer outra situação de soma vetorial pode ser reduzida a um desses três casos particulares. Para tanto, por vezes é necessário promover a decomposição de pelo menos um dos vetores.

## Decomposição de um vetor

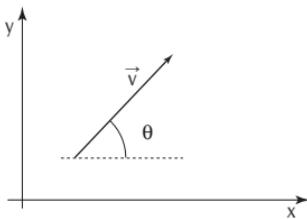
A decomposição de um vetor consiste em determinar as suas projeções em um par de eixos cartesianos:



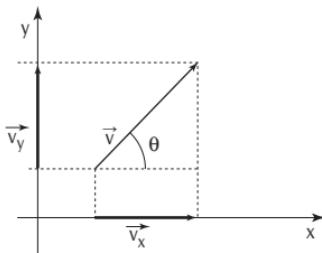
Onde:  $a_x = a \cdot \cos\theta$  e  $a_y = a \cdot \sin\theta$

## Exemplo

Decomponha o vetor  $\vec{v}$ , representado a seguir, cujo módulo vale 1000 unidades. Calcule o valor de suas projeções, considerando  $\theta = 60^\circ$ .



## Resolução



$$v_x = v \cdot \cos\theta$$

$$v_x = 1000 \cdot \cos 60^\circ \quad (\cos 60^\circ = 0,5)$$

$$v_x = 1000 \cdot 0,5$$

$$v_x = 500 \text{ unidades}$$

e

$$v_y = v \cdot \sin\theta$$

$$v_y = 1000 \cdot \sin 60^\circ \quad (\sin 60^\circ = 0,866)$$

$$v_y = 1000 \cdot 0,866$$

$$v_y = 866 \text{ unidades}$$

## Análise dimensional

A análise dimensional é um poderoso instrumento para se interpretar o sentido físico de uma grandeza e, através de dados experimentais, determinar a fórmula que expressa essa grandeza física.

Denomina-se *Equação Dimensional* ou *Fórmula Dimensional* toda expressão que relaciona símbolos dimensionais. Do ponto de vista dimensional, toda equação que representa um fato físico está de acordo com o *Princípio da Homogeneidade*: “Uma equação física não pode ser verdadeira se não for dimensionalmente homogênea”.

Pelo que foi exposto, deve-se entender que as dimensões dos dois membros de uma equação devem ser rigorosamente iguais.

### Exemplo

Admita-se que a expressão  $F = A + B \cdot X$  represente um fato físico e que o parâmetro  $F$  seja expresso em quilômetros. O que se pode dizer acerca das unidades de  $A$ ,  $B$  e  $X$ ?

### Resolução

Para que a expressão seja dimensionalmente homogênea, necessariamente  $A$  tem de ser expresso em quilômetros. As unidades de  $B$  e  $X$  podem ser outras grandezas quaisquer, desde que o produto  $B \cdot X$  seja expresso também em quilômetros. Do modo como o problema está proposto, não se pode estabelecer precisamente quais as unidades de  $B$  e  $X$ , individualmente.

### Teorema de Bridgman

Toda grandeza ( $G$ ) pode ser escrita na forma de um produto de grandezas independentes obtidas experimentalmente, a menos de uma constante ( $k$ ), também obtida experimentalmente, e escrita geralmente da seguinte forma:

$$G = k \cdot A^a \cdot B^b \cdot C^c \cdots \cdot W^w.$$

Grandeza	Unidade	Símbolo	Fórmula Dimensional
Comprimento	metro	m	$[l] = L$
Massa	quilograma	kg	$[m] = M$
Tempo	segundo	s	$[t] = T$
Corrente elétrica	ampère	A	$[i] = A$
Temperatura termodinâmica	kelvin	K	$[\theta] = \theta$
Quantidade de matéria	mol	mol	$[n] = mol$
Intensidade luminosa	candela	cd	$[fôtons] = I_L$
Velocidade	metro por segundo	m/s	$[v] = L \cdot T^{-1}$
Força	newton	N	$[F] = M \cdot L \cdot T^{-2}$
Constante universal dos gases (R)	Joule por mol e por kelvin	$J/(mol \cdot K)$	$[R] = M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot mol^{-1} \cdot \theta^{-1}$

## Exemplo

Considere uma partícula de massa  $m$  que descreve um movimento curvo de raio  $R$  mantendo uma velocidade constante  $v$ . Deduzir a expressão da força  $F$  que é responsável por tal movimento. A constante  $k$  é adimensional.

## Resolução

Pelo que foi exposto, a força é uma função da massa, da velocidade e do raio da trajetória da partícula, isto é,  $F = f(m, v, R)$ .

Aplicando o Teorema de Bridgman:

$$F = k \cdot m^a \cdot R^b \cdot v^c$$

$$[F] = [k] \cdot [m]^a \cdot [R]^b \cdot [v]^c \quad ([F] \text{ lê-se: dimensão de } F)$$

Como  $k$  é adimensional,  $[k] = 1$ , isto é, a dimensão de  $k$  é 1 ( $[k]$ ), lê-se: dimensão de  $k$ ):

$$MLT^{-2} = 1 \cdot M^a \cdot L^b \cdot (L \cdot T^{-1})^c$$

Pelo princípio da homogeneidade:

$$a = 1$$

$$(b + c) = 1$$

$$-c = -2$$

Resolvendo, tem-se:  $a = 1$

$$b = -1$$

$$c = 2$$

Substituindo na expressão geral:  $F = k \cdot m \cdot R^{-1} \cdot v^2$

$$F = k \cdot (mv^2)/R$$

## TESTE SEU SABER

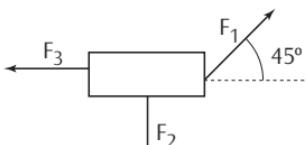
1. Calcule a força resultante:

$$F_1 = 10 \text{ N}$$

$$F_2 = 16 \text{ N}$$

$$F_3 = 19 \text{ N}$$

$$\sqrt{2} = 1,4$$



2. (UEL-PR) Duas forças, uma de módulo 30 N e outra de módulo 50 N, são aplicadas simultaneamente num corpo. A força resultante  $R$  vetorial certamente tem módulo  $R$  tal que:

- a)  $R > 30 \text{ N}$
- b)  $R > 50 \text{ N}$
- c)  $R = 80 \text{ N}$
- d)  $50 \text{ N} \geq R \geq 30 \text{ N}$
- e)  $80 \text{ N} \geq R \geq 20 \text{ N}$

3. Um barco descendo um rio cuja correnteza se desloca a 10 km/h gasta 6 h para viajar de uma cidade a outra, situadas na mesma margem e distanciadas de 180 km. Quanto tempo o barco gastaria para fazer a mesma viagem se não existisse correnteza?
- a) 6 h      b) 9 h      c) 12 h      d) 18 h      e) 20 h
4. Um avião, cujo nariz está voltado para oeste, mantém velocidade de 120 km/h em relação ao ar. Sopra um vento do Norte para o Sul com velocidade de 90 km/h. Qual a velocidade do avião em relação à Terra?
5. Em relação às grandezas comprimento, massa e tempo, determine as fórmulas dimensionais:
- a) Da área de um corpo.  
b) Do volume de um corpo.  
c) Da densidade de um corpo.  
d) Da pressão exercida por uma força sobre uma superfície.
6. (Mack-SP) No estudo de um fenômeno da natureza foram envolvidas as grandezas A, B, C e D, diferentes entre si. A relação entre essas grandezas é  $A = BC^2 D^{-2}$ . Se B tem dimensão de massa, C tem dimensão de comprimento e D dimensão de tempo, a unidade de medida de A, no sistema internacional, pode ser:
- a) m/s      b) m/s<sup>2</sup>      c) N · s      d) N      e) J
7. A lei da gravitação universal é dada pela expressão:  $F = G \cdot Mm/r^2$ , onde M e m são massas de dois corpos que se atraem segundo uma força F e r é a distância entre os corpos. Qual a equação dimensional de G denominada constante de gravitação?

## Conceitos fundamentais

Cinemática é o ramo da Física que estuda os diversos tipos de movimento, sem, no entanto, preocupar-se com suas causas. As grandezas básicas da Cinemática são o comprimento e o tempo, e as demais derivam dessas duas.

### Movimento e repouso

Uma criança pequena que esteja sentada sobre o banco de um carro que se desloca a 80 km/h em uma via, muito provavelmente, se indagada, vai dizer que se encontra parada sobre o banco do veículo. Outra criança que observa o evento enquanto descansa sob a sombra de uma árvore poderá muito bem afirmar que a primeira é que está em movimento, por acompanhar o movimento do carro.

Este simples exemplo nos mostra que a noção de movimento é relativa. Um mesmo evento pode ser observado de maneiras distintas por diferentes observadores. Portanto, para a análise de um movimento, a primeira providência é definir claramente o referencial a ser adotado.



Eduardo Borges

### Ponto material, corpo extenso e referencial

É muito comum as pessoas adotarem a si mesmas ou o planeta Terra como referencial. Podemos também tomar como elemento de

referência um poste, uma árvore, um cesto de lixo, um automóvel ou outro corpo qualquer. Tais corpos, no entanto, rigorosamente, não podem ser considerados referenciais, dada a impossibilidade de se definir e descrever precisamente a posição e o movimento de algo em relação a um desses elementos. Tome como exemplo um beija-flor que se encontra momentaneamente à distância de 2 metros de um poste – o elemento de referência. Quantas são as possíveis representações desse evento? Para resolver o problema dessa imprecisão, surgem dois conceitos: *ponto material* e *referencial*.

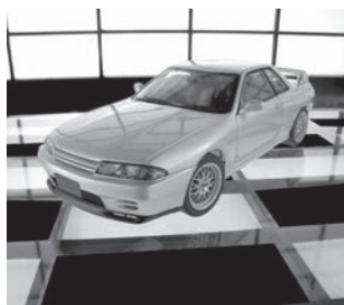
*Referencial ou sistema de referência* é um sistema de coordenadas rígido em relação ao qual se pode especificar as coordenadas do *ponto material*.

*Ponto material* é um corpo cujas dimensões podem ser consideradas desprezíveis em relação a um determinado referencial.

Como exemplo, considere um automóvel colocado na garagem de uma residência. Se imaginarmos o chão da garagem como representante de um sistema cartesiano, cada ponto do automóvel vai ter um conjunto de coordenadas distintas. Neste caso, o automóvel não pode ser considerado um ponto material.

É designado *corpo extenso*. Observe que o piso quadriculado da garagem se assemelha a um plano cartesiano com suas linhas de grade. As rodas, por exemplo, possuem coordenadas distintas, o que denota, neste caso, que o veículo não pode ser considerado um ponto material.

O mesmo veículo, no entanto, fruto de um roubo, sendo rastreado por um satélite via GPS, numa cidade como o Cairo, pode ser



Peter Albrechtsen/Dreamstime

Um automóvel é um corpo extenso em relação à garagem

considerado ponto material, já que não é possível distinguir dois pontos distintos do automóvel.

Numa grande cidade, cada um dos veículos pode ser considerado um ponto material. Projetando um plano cartesiano sobre a foto, verifica-se que a posição de cada veículo (como um todo) pode ser dada por um único conjunto de coordenadas.

Do que foi exposto, podemos dizer que um corpo está em movimento quando sua posição varia em relação a um referencial.

## Espaço percorrido e deslocamento. Velocidade escalar média e velocidade média

Vamos analisar o seguinte problema: uma pessoa, considerada ponto material, caminha, inicialmente, 3 km para o Norte, em seguida, 4 km para o Leste e, finalmente, 6 km para o Sul. Qual o deslocamento sofrido pela pessoa? Qual o módulo da velocidade média, se foram gastos 2 horas para realizar todo o percurso?

Observe que a pessoa em questão, efetivamente, percorreu 13 km em um intervalo de tempo de 2 horas. Um estudante, intuitivamente, é capaz de responder: deslocamento de 13 km, velocidade média de 6,5 km/h. Uma ilustração do problema serve para mostrar que essas respostas não estão corretas.

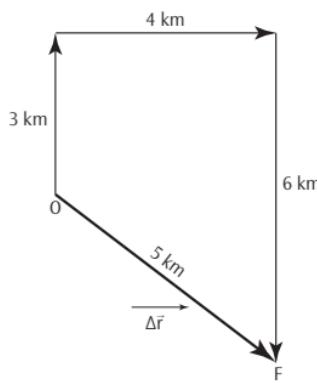


Staeiou/Creative Commons

Vista panorâmica da cidade do Cairo, Egito.



Maps World



Imaginando que a pessoa parta do ponto O, o percurso executado está representado ao lado. O espaço percorrido é, realmente, 13 km; no entanto, seu deslocamento é de 5 km. A velocidade escalar média, que é de fato 6,5 km/h, está relacionada com o espaço efetivamente percorrido. O conceito de velocidade média está relacionado ao deslocamento: ela é de 2,5 km/h. O problema reside no fato de que deslocamento e velocidade média são grandezas vetoriais.

Se o ponto material não sofrer inversão no sentido do seu movimento, o espaço percorrido ( $\Delta S$ ) é definido como a medida do caminho descrito pelo corpo para ir de um lugar a outro. A velocidade escalar média ( $V_m$ ) é, por definição, a razão entre o espaço percorrido ( $\Delta S$ ) e o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) gasto para percorrê-lo.

$$V_m = \Delta s / \Delta t$$

O deslocamento ( $\vec{r}$ ), por outro lado, representa uma mudança de posição e é definido como o vetor que tem origem no ponto de partida (O) e extremidade no ponto final (F). A velocidade média ( $\vec{V}_m$ ) é definida como a relação entre o deslocamento e o intervalo de tempo gasto para isso.

$$\vec{V}_m = \Delta \vec{r} / \Delta t$$

Note que as grandezas velocidade escalar média e velocidade média de um corpo não constituem necessariamente uma velocidade que o corpo desenvolva, mas sim uma média ponderada de todas as velocidades executadas num dado intervalo de tempo. Note também que numa trajetória retilínea, as grandezas velocidade média e velocidade escalar média coincidem em módulo.

## Velocidade instantânea

À medida que o intervalo de tempo torna-se muito pequeno, tendendo a zero, a velocidade média ( $\vec{V}_m$ ) e velocidade escalar média ( $V_m$ ) coincidem em módulo. Elas podem ser reescritas como:

$$V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta s}{\Delta t} \right)$$

definindo-se, assim, a *velocidade instantânea*.

A velocidade indicada no velocímetro de um veículo pode ser tomada como a própria velocidade instantânea, uma vez que marca a velocidade do veículo naquele exato instante.

### Exemplos

1. Um carro de Fórmula 1 executa uma volta completa em um circuito cuja pista possui 4800 m de extensão. Para tanto, gastou exatamente 120 s. Calcule:
  - a) Sua velocidade escalar média;
  - b) Sua velocidade média.

### Resolução

- a) o espaço percorrido foi de 4800 m e, portanto:

$$v_m = \Delta e / \Delta t$$

$$v_m = 4800 / 120$$

$$v_m = 40 \text{ m/s} = 144 \text{ km/h}$$

- b) Por ter executado uma volta completa, podemos considerar que a posição final do carro é igual à posição inicial, isto é:

$$\Delta \vec{r} = \vec{0}$$

$$| \vec{v}_m | = 0 / 120$$

$$| \vec{v}_m | = 0 \text{ m/s}$$

### Nota

$$1 \text{ km/h} = 1000 \text{ m} / 3600 \text{ s} = 1 \text{ m} / 3,6 \text{ s}$$

Do ponto de vista prático, para se converter km/h em m/s, basta dividir a velocidade pelo fator 3,6. Para a conversão inversa, basta multiplicar a velocidade em m/s por 3,6.

2. Um automóvel passa pelo marco 87 km de uma via às 14 horas e atinge o marco 213 km exatamente às 16 horas do mesmo dia. Calcule a velocidade escalar média do veículo nesse percurso.

### Resolução

$$\Delta s = s - s_0$$

$$\Delta s = 213 - 87 = 126 \text{ km}$$

$$v_m = \Delta s / \Delta t$$

$$v_m = 126/2 = 63 \text{ km/h}$$

Observe que o espaço percorrido e a velocidade escalar média, neste caso, são parâmetros positivos, indicando que à medida que o veículo se desloca pela via a numeração dos marcos quilométricos é crescente. Diz-se, em tais situações, que o movimento é progressivo.

3. Um automóvel passa pelo marco 213 km de uma via às 14 horas e atinge o marco 87 km exatamente às 16 horas do mesmo dia. Calcule a velocidade escalar média do veículo nesse percurso.

### Resolução

$$\Delta s = s - s_0$$

$$\Delta s = 87 - 213 = -126 \text{ km}$$

$$v_m = \Delta s / \Delta t$$

$$v_m = -126/2 = -63 \text{ km/h}$$

Observe que o espaço percorrido e a velocidade escalar média, neste caso, são parâmetros negativos, indicando que à medida que o veículo se desloca pela via a numeração dos marcos quilométricos é decrescente. Diz-se, em tais situações, que o movimento é retrógrado.

### Atenção

$\Delta t > 0$ , sempre; intervalo de tempo negativo não tem significado físico.

### TESTE SEU SABER

- (Vunesp-SP) Ao passar pelo marco 200 km de uma rodovia, um motorista vê um anúncio com a inscrição: "Abastecimento e restaurante a 30 minutos". Considerando que o posto de serviço se encontra junto ao marco 245 km dessa rodovia, pode-se concluir que o anúncio prevê, para os carros que trafegam nesse trecho, uma velocidade média em km/h de:  
a) 80 .      b) 90 .      c) 100 .      d) 110 .      e) 120 .
- (Unitau) O "tira-teima" da Rede Globo de Televisão calculou a velocidade da bola que bateu na trave do gol como sendo de  $1,1 \cdot 10^2$  km/h. Se o tempo necessário para a bola atingir a trave, desde quando foi chutada, é de 0,5 s, e sendo a velocidade constante nesse tempo, pode-se afirmar que a distância que a bola estava do gol, imediatamente antes do chute, era de:  
a) 25 m      b) 15 m      c) 5 m      d) 40 m      e) 30 m
- (Unimep-SP) A Embraer (Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.) está testando seu novo avião, o EMB-145. Na opinião dos engenheiros da empresa, esse avião é ideal para linhas aéreas ligando cidades de porte médio e para pequenas distâncias. Conforme anunciado pelos técnicos, a velocidade média do avião é de, aproximadamente, 800 km/h (no ar). Assim sendo, o tempo gasto num percurso de 1480 km será:  
a) 1 h 51 min      b) 1 h 45 min      c) 2 h 25 min      d) 185 min      e) 1 h 48 min

4. (Vunesp) Numa corrida de automóveis, a vantagem do primeiro para o segundo colocado é de 10 segundos. Se nessa corrida a velocidade média dos automóveis é de cerca de 270 km/h, pode-se avaliar a distância entre esses automóveis em:
- a) 250 m      b) 380 m      c) 550 m      d) 750 m      e) 1250 m
5. (Cefet) Um barco descendo um rio cuja correnteza se desloca a 10 km/h gasta 6 horas para viajar de uma cidade a outra, situadas na mesma margem e distanciadas em 180 km. Quanto tempo o barco gastará para fazer a viagem de volta estando sujeito à mesma correnteza?
- a) 6 h      b) 9 h      c) 12 h      d) 18 h      e) 20 h
6. (Fuvest-SP) Uma escada rolante de 6 metros de altura e 8 metros de base transporta uma pessoa da base até o topo da escada num intervalo de tempo de 20 s. A velocidade média desta pessoa, em m/s, é:
- a) 0,3      b) 0,5      c) 0,7      d) 0,8      e) 1
7. Se um motorista deseja medir o consumo de combustível de seu automóvel, em qual dos conceitos ele deve se basear: deslocamento ou espaço percorrido? Justifique.
8. Um trem de carga de 240 metros de comprimento, que tem velocidade constante de 20 m/s, gasta 0,5 minuto para atravessar completamente um túnel. Qual o comprimento do túnel?
9. Um automóvel percorre um trecho retilíneo de estrada, indo da cidade A até a cidade B, distante 150 km da primeira. Saindo às 10 horas de A, para às 11 horas em um restaurante situado no ponto médio do trecho AB, onde o motorista gasta exatamente 1 hora para almoçar. A seguir, prossegue viagem e gasta mais 1 hora para chegar à cidade B. Qual a velocidade escalar média do automóvel no trecho AB?
10. Para que os nossos ouvidos possam distinguir o eco de um som, deve haver um intervalo mínimo de 0,1 segundo entre a emissão e a recepção do som. Supondo que a velocidade do som no ar numa determinada temperatura seja de 300 m/s, qual deve ser a distância mínima de uma pessoa a um obstáculo para que possa ouvir o eco de suas palavras?

11. (Fuvest-SP) Um barco é erguido 24 metros no interior de uma eclusa, num intervalo de tempo de 40 minutos. Sua velocidade média de ascensão é:
- a) 18 m/s
  - b)  $2,5 \times 10^{-3}$  m/s
  - c)  $5 \times 10^{-3}$  m/s
  - d)  $10^{-2}$  m/s
  - e)  $7,2 \times 10^{-3}$  m/s

## Descomplicando a Física

Leia atentamente o diálogo a seguir, supostamente ocorrido entre um guarda rodoviário e um motorista, durante uma *blitz*, na rodovia Presidente Dutra.



Guilherme Santos/PMSP

*Guarda* – Bom dia! O senhor sabe por que está sendo multado?

*Motorista* – Acho que não.

*Guarda* – O senhor sabe que o limite de velocidade nesta rodovia é de 100 km/h, não sabe?

*Motorista* – Sim, mas se o senhor levar em consideração que eu saí em viagem às 10 horas da manhã, andei 300 km e, no momento são exatamente 2 horas da tarde, verá que esta multa não se aplica à minha conduta.

*Guarda* – O senhor está me parecendo com um pouco de sono. Está descansado. Já almoçou?

*Motorista* – Sim, no restaurante “Três Garças”, próximo à região de São José dos Campos. O serviço foi um pouco demorado. Aproveitei para dar um cochilo também. Perdi 1,5 horas.

*Guarda* – A velocidade apurada pelo radar indica que o senhor trafegava acima de 100 km/h e, portanto, devo aplicar a multa.

Continua...

Admitindo-se que o radar esteja devidamente calibrado, cabe a você, como juiz da questão, esclarecer, por meio dos conceitos físicos, as argumentações do guarda rodoviário e do motorista e decidir quem tem razão.

### **Resolução**

O argumento do motorista se baseia no conceito de velocidade escalar média. O argumento do guarda se baseia na velocidade instantânea. A autoridade de trânsito deve apurar a velocidade do veículo em questão em um breve espaço de tempo e autuar o motorista caso ele venha a cometer uma infração por ultrapassar o limite de velocidade a qualquer instante. Não é possível, do ponto de vista prático, um policial observar um veículo por um tempo relativamente prolongado para poder autuá-lo. A multa, portanto, deve ser dada baseada no conceito de velocidade instantânea. Está correto, pois, o policial.

# 3

# Movimento uniforme (MU)

O *movimento uniforme* (MU) pode ser definido como aquele em que a velocidade se mantém constante em relação a um dado referencial.

A velocidade instantânea, neste caso, é igual à velocidade escalar média para qualquer intervalo de tempo e, consequentemente, para quaisquer dois intervalos de tempo considerados, um móvel deverá percorrer distâncias iguais. Caso a trajetória seja retilínea, o movimento é denominado *movimento retilíneo e uniforme* (MRU).

Como exemplo de MRU, podemos citar a luz quando atravessa uma porção de atmosfera não poluída.



Pelvidge/PhotoXpress

## Função horária do movimento uniforme

A equação matemática do MU que relaciona a posição do móvel em função do tempo é chamada de *função horária*.

$$s = s_0 + v t$$

Onde:  $s$  = espaço (ou posição) do móvel no instante  $t$ ;

$s_0$  = espaço inicial do móvel;

$v$  = velocidade do móvel;

$t$  = tempo de movimento;

Quando o móvel está se deslocando no sentido crescente da numeração de uma via, seu movimento é denominado *progressivo*;

quando ele está se deslocando em sentido contrário, o seu movimento é denominado *retrógrado*. Assim, por exemplo, quando um móvel se desloca do marco 42 km de uma rodovia em direção ao marco 13 km, da mesma via, dizemos que seu movimento é do tipo retrógrado.

### Exemplos

1. A posição de um móvel em MU varia conforme a equação  $s = 80 - 20t$  (unidades do SI). Determine o espaço inicial e a velocidade do móvel.

### Resolução

O espaço inicial correspondente a  $t_0 = 0$  s é  $s_0 = 80$  m.

A velocidade é o coeficiente do tempo  $t$  na equação, portanto:

$$v = -20 \text{ m/s},$$

onde o sinal negativo da velocidade indica movimento retrógrado.

2. A posição de um móvel em MU varia conforme a equação  $s = -240 + 20t$  (unidades do SI). Determine:
  - a) o espaço inicial, a velocidade do móvel e o tipo de movimento;
  - b) a posição do móvel após 18 s de movimento;
  - c) o instante em que o móvel passa pela origem dos espaços.

### Resolução

- a) O espaço inicial correspondente a  $t_0 = 0$  s é  $s_0 = -240$  m.

A velocidade é o coeficiente do tempo  $t$  na equação, portanto:

$v = 20 \text{ m/s}$ , movimento progressivo (já que  $v > 0$ ).

- b) Para  $t = 18 \text{ s}$ , temos:

$$s = -240 + 20 \cdot 18$$

$$s = -240 + 360$$

$$s = 120 \text{ m}$$

Note que, no intervalo de tempo considerado, o espaço percorrido pelo móvel foi de 360 m, dado pela parcela  $v \cdot t$ .

- c) A origem dos espaços, muitas vezes, também designada *origem das posições*, é o marco zero da via. Basta fazer  $s = 0 \text{ m}$  e temos:

$$s = -240 + 20 t$$

$$0 = -240 + 20 t$$

$$20 t = 240$$

$$t = 12 \text{ s}$$

3. A posição de um móvel em MU varia conforme a equação  $s = -240 - 20t$  (unidades do SI). Determine o instante em que o móvel passa pela origem dos espaços.

### Resolução

Note que, neste caso, sutilmente diferente do exemplo anterior, a velocidade do móvel é negativa, indicando um movimento retrógrado.

Fazendo  $s = 0 \text{ m}$ , temos:

$$s = -240 - 20 t$$

$$0 = -240 - 20 t$$

$$- 20 t = 240$$

$$t = - 12 \text{ s}$$

resultando em uma resposta matemática, mas não em uma resposta física do problema, já que, na equação proposta, não há significado para valor de tempo negativo. A resposta física é que o móvel não passa pela origem dos espaços.

## Representação gráfica do movimento uniforme

A função horária do movimento uniforme é uma função de  $1^{\circ}$  grau e, como tal, tem como gráfico das posições ocupadas por um móvel em função do tempo,  $s = f(t)$ , um segmento de reta em que o parâmetro velocidade representa o coeficiente angular do segmento.

### Exemplos

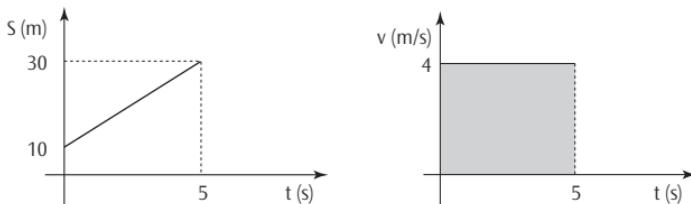
- a) O gráfico representa o movimento de um móvel em MU que tem por equação horária

$$s = 10 + 4 t \text{ (unidades do SI).}$$

Matematicamente, a função é crescente; portanto,  $v > 0$ , e o movimento é progressivo.

O coeficiente angular ( $\alpha$ ) do segmento é numericamente igual à velocidade e pode ser calculado:

$$\alpha = (30 - 10)/(5 - 0) = 4$$



Neste caso, o gráfico que descreve o comportamento da velocidade do móvel em função do tempo é um segmento de reta paralelo ao eixo das abscissas (eixo dos tempos). A área compreendida entre a curva do gráfico e a abscissa (área hachurada) determina o deslocamento escalar ( $\Delta s$ ) no intervalo de tempo considerado.

$$\Delta s = v \cdot t = 4 \cdot 5 = 20 \text{ m}$$

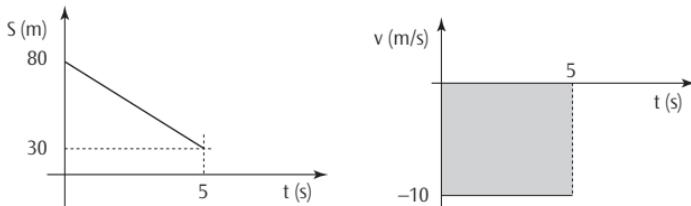
- b) O gráfico representa o movimento de um móvel em MU que tem por equação horária

$$s = 80 - 10t \text{ (unidades do SI).}$$

Matematicamente, a função é decrescente; portanto,  $v < 0$ , e o movimento é retrógrado.

O coeficiente angular ( $\alpha$ ) do segmento é numericamente igual à velocidade e pode ser calculado:

$$\alpha = (30 - 80)/(5 - 0) = -10$$



Nesse gráfico, a área compreendida entre a curva do gráfico e a abscissa (área hachurada) determina o deslocamento escalar ( $\Delta s$ ) no intervalo de tempo considerado, que pode ser calculado:

$$\Delta s = v \cdot t = (-10) \cdot 5 = -50 \text{ m}$$

- c) Neste caso, a posição do móvel não se altera ao longo do tempo considerado, indicando que o móvel está em repouso. A função horária toma a forma

$$s = 30 + 0 \cdot t$$

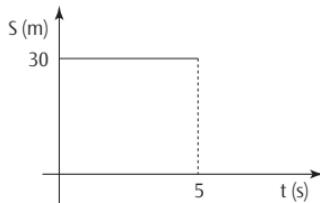
ou

$$s = 30 \text{ (unidades do SI).}$$

O coeficiente angular ( $\alpha$ ) do segmento é numericamente igual à velocidade e pode ser calculado:

$$\alpha = (30 - 30)/(5 - 0) = 0$$

$$\alpha = (30 - 30)/(5 - 0) = 0$$





## Paradoxo de Zeno – Aquiles e a tartaruga

Aquiles, o herói grego, e a tartaruga decidem apostar uma corrida de 100 m. Como a velocidade de Aquiles é 10 vezes a da tartaruga, esta recebe a vantagem de começar a corrida 80 m na frente da linha de largada.

No intervalo de tempo em que Aquiles percorre os 80 m que o separam da tartaruga, esta percorre 8 m e continua na frente de Aquiles. No intervalo de tempo em que ele percorre mais 8 m, a tartaruga já anda mais 0,8 m; ele anda esses 0,8 m, e a tartaruga terá andando mais 0,08 m. Esse raciocínio segue assim sucessivamente, levando à conclusão de que Aquiles jamais poderá ultrapassar a tartaruga, uma vez que sempre que ele se aproximar dela, ela já terá andado mais um pouco. Em termos matemáticos, seria dizer que o limite, com o espaço entre a tartaruga e Aquiles tendendo a 0, do espaço de Aquiles, é a tartaruga. Ou seja, ele virtualmente alcança a tartaruga, mas nessa linha de raciocínio, não importa quanto tempo se passe, Aquiles nunca alcançará a tartaruga nem, portanto, poderá ultrapassá-la.

Esse paradoxo vale-se fortemente do conceito de referencial. Dada uma corrida somente de Aquiles, sem estar contra ninguém, seu movimento é ilimitado. Ao se colocar, porém, a tartaruga, cria-se um referencial para o movimento de Aquiles, que é o que causa o paradoxo. De fato, o movimento dele é independente do movimento da tartaruga; se adotamos a tartaruga como um padrão para determinar o movimento dele, criamos uma situação artificial em que Aquiles é regido pelo espaço da tartaruga.

A conclusão de que a tartaruga sempre estará à frente se sustenta sobre o argumento de infinitos deslocamentos simultâneos, de Aquiles



Eduardo Borges

Continua...

e da tartaruga, mas que representam sempre um décimo em relação ao deslocamento anterior. Analogamente, o tempo transcorrido para cada deslocamento será de um décimo do tempo do deslocamento anterior. Logo, tem-se que o tempo transcorrido é uma progressão geométrica de razão inferior a "um", o que significa que somando-se os infinitos intervalos de tempo dessa progressão, haverá um valor limite ao qual a somatória converge. Encontra-se, então, uma incoerência no paradoxo, porque ele define que a tartaruga nunca será alcançada, porém a análise temporal demonstra que isso acontecerá apenas nesse intervalo de tempo fixo.

O paradoxo surge ao supor intuitivamente que a soma de infinitos intervalos de tempo é infinita, de tal forma que seria necessário passar um tempo infinito para Aquiles alcançar a tartaruga. No entanto, os infinitos intervalos de tempo descritos no paradoxo formam uma progressão geométrica e sua soma converge para um valor finito, em que Aquiles encontra a tartaruga.

Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Paradoxos\\_de\\_Zeno](http://pt.wikipedia.org/wiki/Paradoxos_de_Zeno)

Saiba



### *Mas, afinal, o que executa um MU?*

Na natureza, são poucos os eventos que ocorrem segundo um movimento retilíneo e uniforme.

A luz é um caso clássico. A luz viaja a aproximadamente 300.000 km/s no vácuo. Quando se acende uma lanterna, a luz não parte do repouso ( $v = 0$  m/s) e gradativamente vai aumentando sua velocidade, ela simplesmente parte a 300.000 km/s (no vácuo).

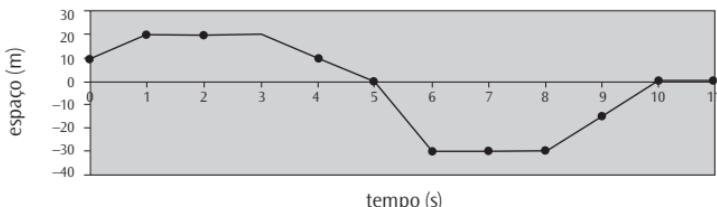
A luz também se desloca em linha reta nos meios homogêneos e transparentes. Nesta situação, podemos então dizer que um raio de luz executa um movimento retilíneo e uniforme.



Stepanov/PhotoXpress

## TESTE SEU SABER

- A função da posição de um móvel, no SI, é  $x = 60 - 12t$ . Determine:
  - A posição inicial e a velocidade desse móvel.
  - O gráfico posição x tempo.
  - O instante em que ele passa pela origem.
  - A posição do móvel após 40 s de movimento.
- Dois móveis A e B percorrem a mesma reta, ambos em movimento progressivo, com velocidades  $v_A = 8 \text{ m/s}$  e  $v_B = 2 \text{ m/s}$ . Em determinado instante  $t = 0 \text{ s}$ , o móvel A está na posição 30 m, ou seja, 120 m atrás de B. Determine a posição e o instante em que A alcança B.
- Dois móveis A e B percorrem a mesma reta em sentidos opostos com velocidade  $v_A = 20 \text{ m/s}$  e  $v_B = 30 \text{ m/s}$ . Em determinado instante  $t = 0 \text{ s}$ , o móvel A está na posição 180 m e o móvel B está no marco 1680 m. Determine a posição e o instante em que eles se cruzam.
- O gráfico abaixo representa o movimento de um corpo. Determine:
  - Os intervalos de tempo em que o movimento é progressivo.
  - Os intervalos de tempo em que o movimento é retrógrado.
  - A velocidade em cada intervalo de tempo determinado em (a) e (b).
  - A velocidade média do corpo decorrido 10 s de movimento.

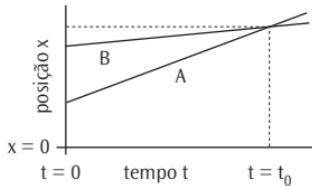


- (PUC-MG) Um homem, caminhando na praia, deseja calcular sua velocidade. Para isso, ele conta o número de passadas que dá em um minuto, contando uma unidade a cada vez que o pé direito toca o solo, e conclui que são 50 passadas por minuto. A seguir, ele mede a distância entre duas posições sucessivas do seu pé direito e encontra o equivalente a seis

pés. Sabendo que três pés correspondem a um metro, sua velocidade, supostamente constante, é:

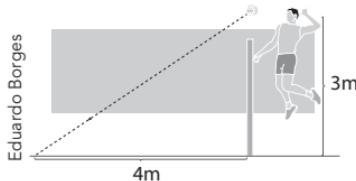
- a) 3 km/h    b) 4,5 km/h    c) 6 km/h    d) 9 km/h    e) 10 km/h

6. (UFCE) Dois veículos, A e B, se movem ao longo de uma estrada horizontal e reta, e suas posições variam com o tempo conforme o gráfico mostrado a seguir.



Sobre o movimento de A e B, podemos afirmar:

- a) No instante de tempo  $t = t_0$  as velocidades dos dois veículos são iguais.  
b) A e B percorrem uma mesma distância entre os instantes  $t = 0$  e  $t = t_0$ .  
c) No instante de tempo  $t = t_0$  A e B encontram-se igualmente afastados da posição  $x = 0$ .  
d) No instante de tempo  $t = t_0$  a aceleração de A é maior que a aceleração de B.  
e) Em qualquer instante de tempo a velocidade de B é que a velocidade de A.
7. (UFMG) Marcelo Negrão, numa partida de vôlei, deu uma cortada na qual a bola partiu com uma velocidade escalar de 126 km/h. Sua mão golpeou a bola a 3 m de altura, sobre a rede, e ela tocou o chão do adversário a 4 m da base da rede, como mostra a figura. Nessa situação, pode-se considerar, com boa aproximação, que o movimento da bola foi retilíneo e uniforme.



- Considerando-se essa aproximação, pode-se afirmar que o tempo decorrido, em segundos, entre o golpe do jogador e o toque da bola no chão é de:  
a)  $2/63$       b)  $5/126$       c)  $7/35$       d)  $4/35$       e)  $1/7$
8. (Fuvest-SP) No mês de agosto de 1988, o planeta Marte teve a máxima aproximação da Terra. Nesse dia, as pessoas, ao observarem o planeta, estavam vendo a luz emitida pelo Sol algum tempo antes. Aproximadamente quanto tempo antes? Considere as órbitas da Terra e de Marte circulares e coplanares, com raios de  $150.000.000$  e  $231.000.000$  km, respectivamente, e seja  $300.000$  km/s a velocidade de propagação da luz.  
a) 81 anos-luz  
b) 2 h  
c) 30 s  
d) 8 min  
e) 17 min
9. (UFBA) Dois barcos, A e B, desenvolvem em águas paradas velocidades  $V_A = 6$  m/s e  $V_B = 5$  m/s. Eles partem no mesmo instante de uma plataforma, subindo um rio cuja correnteza tem velocidade constante  $V = 3$  m/s. O barco A passa sob uma ponte e 8 min e 20 s depois passa o barco B. Determine, em km, a distância entre a ponte e a plataforma.
10. Um atirador ouve o ruído da bala atingindo um alvo, 3 s após dispará-la com velocidade de 680 m/s. Sabendo que a velocidade do som no ar é 340 m/s, determine a distância entre o atirador e o alvo.  
a) 680 m      b) 580 m      c) 800 m      d) 780 m      e) 860 m

### Descomplicando a Física

(ITA-2009) Um barco leva 10 horas para subir e 4 horas para descer um mesmo trecho do rio Amazonas, mantendo constante o módulo de sua velocidade em relação à água. Quanto tempo o barco leva para descer esse trecho com os motores desligados?

- a) 14 horas e 30 minutos.
- b) 13 horas e 20 minutos.
- c) 7 horas e 20 minutos.

Continua...

- d) 10 horas.
- e) Não é possível resolver porque não foi dada a distância percorrida pelo barco.

Resposta correta: Alternativa **B**.

### Resolução

Para descer o rio de comprimento  $x$ , o barco desenvolve velocidade  $V_B$  contra a correnteza, que tem velocidade  $V_C$ :

$$\begin{aligned}x &= (V_B + V_C) \cdot 4 \\(V_B + V_C) &= x/4\end{aligned}\quad (\text{I})$$

Para descer o rio:

$$\begin{aligned}x &= (V_B - V_C) \cdot 10 \\(V_B - V_C) &= x/10\end{aligned}\quad (\text{II})$$

Fazendo (I) - (II), temos:

$$2V_C = \frac{x}{4} - \frac{x}{10} = \frac{3x}{20} \rightarrow V_C = \frac{3x}{40}$$

Com o motor desligado, há apenas a velocidade da correnteza:  $x = V_C \cdot t$

Fazendo a devida substituição:

$$x = V_C \cdot t \rightarrow x = \frac{3x}{40} \cdot t \rightarrow 40 = 3 \cdot t$$

$$t = 40/3 = 13,333 \text{ h} = 13 \text{ h e } 20 \text{ min}$$

## 4

# Movimento variado

Em regra, são comuns eventos em que a velocidade de um corpo varia ao longo do tempo, caracterizando um movimento variado. A grandeza física relacionada à mudança da velocidade de um corpo é denominada aceleração. Assim, define-se aceleração média de um corpo como sendo a relação entre a variação da velocidade do corpo e o intervalo de tempo correspondente a essa variação:

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Onde:  $\Delta v = v_2 - v_1$  e  $\Delta t = t_2 - t_1$ ,

para dois instantes considerados, sendo  $t_2 > t_1$ .

A unidade de aceleração, no SI, é o  $\text{m/s}^2$ .

Na medida em que o intervalo de tempo torna-se muito pequeno, tendendo a zero, a expressão anterior pode ser reescrita:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Os sinais matemáticos da velocidade e da aceleração, combinados, traduzem um conceito físico em relação ao tipo de movimento, podendo este ser acelerado ou retardado. O quadro a seguir ilustra as possibilidades:

Movimento	Velocidade	Aceleração
Acelerado	Positiva	Positiva
Acelerado	Negativa	Negativa
Retardado	Positiva	Negativa
Retardado	Negativa	Positiva

## Exemplos

1. Um móvel passa por um ponto A no instante  $t_1 = 0$  s, com a velocidade de 20 m/s. Ao passar por B, no instante  $t_2 = 5$  s, sua velocidade é de 40 m/s. Calcule a aceleração média e classifique o movimento.

## Resolução

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{40 - 20}{5 - 0}$$

$a_m = 4$  m/s<sup>2</sup>, e o movimento é dito acelerado, uma vez que a velocidade e a aceleração possuem mesmo sinal. Observe que velocidade e aceleração têm o mesmo sentido.

2. Um móvel passa por um ponto A no instante  $t_1 = 0$  s, com a velocidade de 40 m/s. Ao passar por B, no instante  $t_2 = 5$  s, sua velocidade é de 20 m/s. Calcule a aceleração média e classifique o movimento.

## Resolução

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{20 - 40}{5 - 0}$$

$a_m = -4$  m/s<sup>2</sup>, e o movimento é dito retardado, uma vez que a velocidade e a aceleração possuem sinais contrários no intervalo de tempo considerado, o que indica que velocidade e aceleração têm sentidos opostos.

## Movimento uniformemente variado (MUV)

Um movimento variado é denominado *movimento uniformemente variado (MUV)* quando a velocidade varia segundo uma taxa constante, isto é, as variações de velocidades são iguais em intervalos de tempos iguais, o que indica que a aceleração é constante e diferente de zero.

Em particular, caso a trajetória seja retilínea, o movimento é denominado *movimento retilíneo e uniformemente variado (MRUV)*.

A função horária da velocidade para o MUV é:

$$v = v_0 + at$$

Onde:  $v$  é a velocidade no instante  $t$ ;

$v_0$  é a velocidade no instante  $t = 0$  s;

$a$  é a aceleração.

### Exemplo

Um móvel está se deslocando com uma velocidade de 5 m/s. Em um determinado instante, passa a acelerar 2 m/s<sup>2</sup>. Qual a equação horária da velocidade e sua velocidade após 6 s?

### Resolução

Sua velocidade inicial é  $v_0 = 5$  m/s. Após  $t = 0$ , sua aceleração passa a ser  $a = 2$  m/s<sup>2</sup>.

A equação horária pode ser escrita como:

$$v = 5 + 2t$$

A velocidade do móvel após 6 s do instante inicial vale:

$$v = 5 + 2 \cdot 6 = 17 \text{ m/s}$$

## Função horária dos espaços no MUV

Em um MUV, a posição de um móvel varia segundo sua velocidade inicial, a aceleração a que está sujeito e o tempo decorrido de movimento. Para um móvel que parte de uma posição  $s_0$  com uma velocidade inicial  $v_0$ , sujeito a uma aceleração constante  $a$ , a posição ocupada pelo móvel num instante  $t$  qualquer pode ser expressa conforme a função:

$$s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{at^2}{2}$$

### Exemplo

Um móvel descreve um MUV. No instante  $t = 0$  s, ele está na posição 300 m, a uma velocidade de 10 m/s, com uma aceleração de  $-4$  m/s $^2$ . Qual é a equação horária do espaço (SI) e em que instante o móvel atingirá o repouso?

### Resolução

O espaço inicial vale  $s_0 = 300$  m, a velocidade inicial,  $v_0 = 10$  m/s, e a aceleração,  $a = -4$  m/s $^2$ . A equação horária do espaço neste movimento pode ser escrita como:

$$s = 300 + 10t - 2t^2 \text{ (SI)}$$

O móvel atingirá o repouso quando a velocidade for nula.

Da equação acima, temos que  $v = 10 - 4t$ .

Logo:

$$0 = 10 - 4t$$

$$t = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ s}$$

## Representação gráfica do movimento uniformemente variado

A função horária da velocidade do movimento uniforme é uma função de  $1^{\circ}$  grau e, como tal, tem como gráfico das velocidades desenvolvidas por um móvel em função do tempo,  $v = f(t)$ , um segmento de reta onde o parâmetro aceleração é dado pelo coeficiente angular do segmento.

### Exemplos

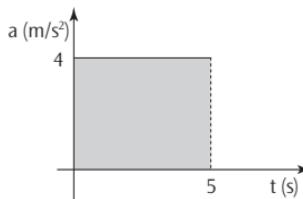
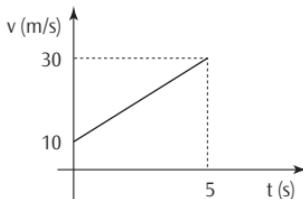
- a) O gráfico representa o movimento de um móvel em MUV que tem por equação horária da velocidade

$$v = 10 + 4 \text{ (unidades do SI).}$$

Matematicamente, a função é crescente e, portanto, a aceleração ( $a$ ), bem como as velocidades, são positivas ( $a > 0$  e  $v > 0$ ) e o movimento é progressivo acelerado.

O coeficiente angular ( $\alpha$ ) do segmento é numericamente igual à aceleração e pode ser calculado:

$$\alpha = (30 - 10)/(5 - 0) = 4$$



Neste caso, o gráfico que descreve o comportamento da aceleração do móvel em função do tempo é um segmento de reta paralelo ao eixo das abscissas (eixo dos tempos). A área compreendida entre a curva do gráfico e a abscissa (área ha-

churada) determina a variação de velocidade ( $\Delta v$ ) no intervalo de tempo considerado.

$$\Delta v = a \cdot t = 4 \cdot 5 = 20 \text{ m/s}$$

O gráfico representa o movimento de um móvel em MUV que tem por equação horária das velocidades

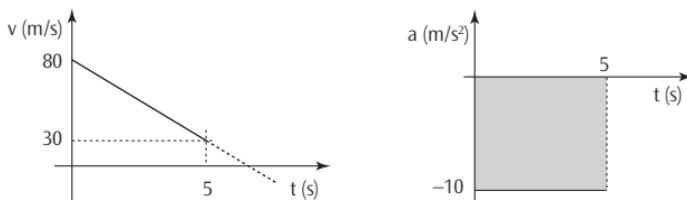
$$v = 80 - 10t \text{ (unidades do SI).}$$

Matematicamente, a função é decrescente e, portanto, a aceleração é negativa ( $a < 0$ ), apesar de as velocidades serem positivas. O movimento é dito retrógrado retardado.

O coeficiente angular ( $\alpha$ ) do segmento é numericamente igual à aceleração e pode ser calculado:

$$\alpha = a = (30 - 80)/(5 - 0) = -10$$

- b) Observe que no exemplo dado, se o movimento se projeta além dos 5 s considerados, a curva do gráfico cruza o eixo das abscissas e, a partir daí, a velocidade se torna negativa e o movimento será retrógrado acelerado. O ponto determinado pelo cruzamento da curva do gráfico e o eixo dos tempos indica o exato instante em que o móvel inverte o sentido de movimento ( $v = 0 \text{ m/s}$ )

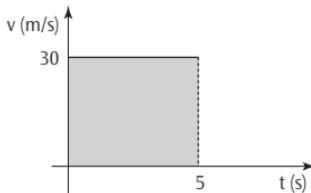


$$\Delta v = a \cdot t = (-10) \cdot 5 = -50 \text{ m.}$$

Neste gráfico, a área compreendida entre a curva do gráfico e a abscissa (área hachurada) determina o deslocamento escalar ( $\Delta s$ ) no intervalo de tempo considerado, que pode ser calculado:

$$\Delta s = \Delta v \cdot \Delta t$$

$$\Delta s = 30 \cdot 5 = 150 \text{ m}$$



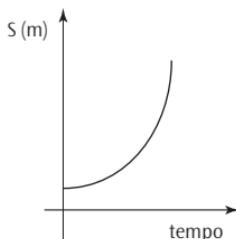
- c) Neste caso, a velocidade do móvel não se altera ao longo do tempo considerado, indicando que o móvel está em MU, e não em MUV. A função horária da velocidade toma a forma

$$v = 30 + 0 \cdot t \text{ ou } v = 30 \text{ (unidades do SI)}$$

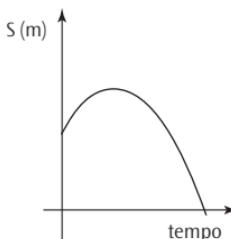
e a aceleração é zero ( $a = 0 \text{ m/s}^2$ ).

A função horária das posições de um MUV é uma função do segundo grau em  $t$ . Como consequência, o gráfico será um arco de parábola. A concavidade da parábola será para cima, quando a aceleração for positiva, com a concavidade voltada para baixo, quando a aceleração for negativa.

Gráfico da posição de um móvel em MUV em função do tempo.



Neste caso, a aceleração é positiva.  
Arco de parábola com a concavidade voltada para cima.



Neste caso, a aceleração é negativa.  
Arco de parábola com a concavidade voltada para baixo.

## Equação de Torricelli no MUV

Pode-se combinar as funções horárias da velocidade e do tempo, de forma a relacionar a velocidade de um corpo com a sua posição ou deslocamento. A grande vantagem da expressão de Torricelli é a independência em relação ao tempo.

Assim:

$$v^2 = v_0^2 + 2a(s - s_0)$$

Onde:  $v_0$  = velocidade inicial;

$a$  = aceleração;

$s$  = espaço final;

$s_0$  = espaço inicial.

### Exemplo

Um corpo tem velocidade inicial de 8 m/s, variando uniformemente para 10 m/s após um percurso de 6 m. Determine a aceleração desse corpo.

### Resolução

$$v_0 = 8 \text{ m/s}, v = 10 \text{ m/s}, \Delta s = 6 \text{ m}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(\Delta s)$$

$$10^2 = 8^2 + 2a(6 - 0)$$

$$a = 3 \text{ m/s}^2$$

### Velocidade média no MUV

No movimento uniformemente variado, MUV, a velocidade média de um móvel, num determinado intervalo de tempo, pode

ser dada pela média aritmética das velocidades, inicial e final, no referido intervalo.

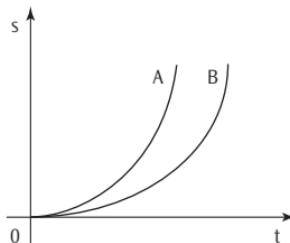
$$v_m = \frac{v + v_0}{2}$$

## TESTE SEU SABER

1. (Fatec-SP) Em um teste para uma revista especializada, um automóvel acelera de 0 km/h a 90 km/h em 10 s. Nesses 10 s o automóvel percorre:  
a) 250 m      b) 900 km      c) 450 km      d) 450 m      e) 125 m
2. Um carro está viajando numa estrada retilínea com a velocidade de 72 km/h. Vendo adiante um congestionamento no trânsito, o motorista aplica os freios durante 2,5 s e reduz a velocidade para 54 km/h. Supondo que a aceleração é constante durante o período de aplicação dos freios, o seu módulo, em  $\text{m/s}^2$ , será:  
a) 1      b) 1,5      c) 2      d) 2,5      e) 3
3. (FEI-SP) No movimento retilíneo uniformemente variado, com velocidade inicial nula, a distância percorrida é:  
a) Diretamente proporcional ao tempo de percurso.  
b) Inversamente proporcional ao tempo de percurso.  
c) Diretamente proporcional ao quadrado do tempo de percurso.  
d) Inversamente proporcional ao quadrado do tempo de percurso.  
e) Diretamente proporcional à velocidade.
4. Um veículo parte do repouso em movimento retilíneo e acelera a  $2 \text{ m/s}^2$ . Pode-se dizer que a sua velocidade e a distância percorrida, após 3 s, valem, respectivamente:  
a) 6 m/s e 9 m  
b) 6 m/s e 18 m  
c) 3 m/s e 12 m  
d) 12 m/s e 36 m  
e) 2 m/s e 12 m
5. (UEPB-adaptada) Um corpo de massa  $m = 40 \text{ kg}$  descreve uma trajetória retilínea que obedece à seguinte função horária  $x = 2 + 2t + 4t^2$ , em que  $x$  é medido em metros e  $t$  em segundos.

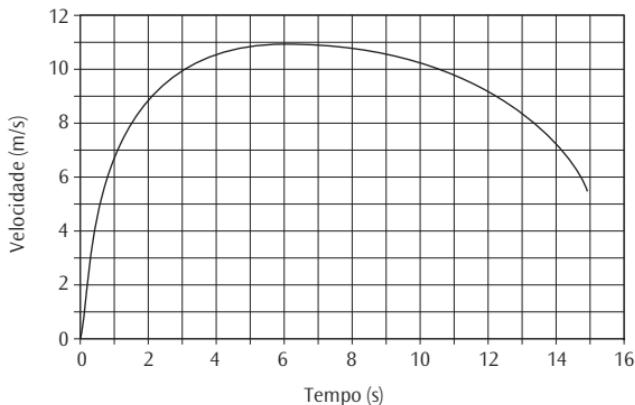
Sabe-se que a aceleração ( $a$ ) está associada à ação de uma força ( $F$ ) através da relação:  $F = m \cdot a$ . Conclui-se que a intensidade da força resultante do corpo em newtons vale:

- a) 16      b) 64      c) 4      d) 8      e) 32
6. No MRUV, quando a velocidade de um corpo atinge o valor zero, o movimento acaba? Justifique.
7. Se você tivesse de projetar um aeroporto, que dados necessitaria para calcular o comprimento da pista?
8. Segundo uma revista especializada, um automóvel de determinada marca percorre 400 m em 20 s a partir do repouso. Admitindo que a aceleração seja constante, determine:
- A velocidade média.
  - A velocidade ao final dos 20 s.
  - A aceleração.
9. Um carro tem velocidade de 20 m/s quando, a 30 m de distância, um sinal vermelho é observado. Qual deve ser o valor da desaceleração produzida pelos freios para que o carro pare a 5 m do sinal?
10. (UFPA) Dados os dois gráficos espaço-tempo para dois carros que se movem segundo trajetórias retilíneas, podemos concluir que:



- O carro B possui maior aceleração.
- O carro A possui maior aceleração.
- Os carros andam sempre juntos.
- Os dois carros possuem velocidades iguais em cada instante.
- A velocidade do carro A é sempre menor que a do B, em cada instante.

11. (Enem) Em uma prova de 100 m rasos, o desempenho típico de um corredor padrão é representado pelo gráfico a seguir:



- Em que intervalo de tempo o corredor apresenta velocidade constante?
- a) Entre 0 e 1 segundo.
  - b) Entre 1 e 5 segundos.
  - c) Entre 5 e 8 segundos.
  - d) Entre 8 e 11 segundos.
  - e) Entre 9 e 15 segundos.
12. Ainda com relação ao gráfico anterior, em que intervalo de tempo o corredor apresenta aceleração máxima?
- a) Entre 0 e 1 segundo.
  - b) Entre 1 e 5 segundos.
  - c) Entre 5 e 8 segundos.
  - d) Entre 8 e 11 segundos.
  - e) Entre 9 e 15 segundos.

## Descomplicando a Física

(ITA-2002) Billy sonha que embarcou em uma nave espacial para viajar até o distante planeta Gama, situado a 10 anos-luz da Terra. Metade do percurso é percorrido com aceleração de  $15 \text{ m/s}^2$  e o restante com desaceleração de mesma magnitude. Desprezando a atração gravitacional e efeitos relativistas, estime o tempo total em meses de ida e volta da viagem do sonho de Billy. Justifique detalhadamente. É dada a velocidade de propagação da luz no vácuo:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Considere  $1 \text{ ano} \approx 3,2 \cdot 10^7 \text{ s}$ .

### Resolução

$$10 \text{ anos-luz} = 10 \cdot (3 \times 10^8) \cdot (3 \cdot 2 \times 10^7) = 9,6 \times 10^{16} \text{ m}$$

Durante o percurso de ida, a primeira metade pode ser tomada como um MUV, então:

$$\frac{9,6 \cdot 10^{16}}{2} = \frac{15 \cdot t^2}{2} \rightarrow t^2 = \frac{9,6 \cdot 10^{16}}{15} = 0,64 \cdot 10^{16}$$

$$t = 0,8 \cdot 10^8 = 8 \cdot 10^7 \text{ s} = \frac{8 \cdot 10^7}{3,2 \cdot 10^7} \text{ anos} = 2,5 \text{ anos}$$

Como a segunda metade da viagem de ida é feita com desaceleração de mesma magnitude, isto é, a (des)aceleração possui mesmo módulo, o tempo é o mesmo da primeira metade.

Portanto, a viagem de ida e volta consiste em 4 períodos de 2,5 anos: 10 anos ou 120 meses.

## 5

# Aceleração da gravidade – Queda livre

Diz-se que um corpo está em *queda livre* quando, abandonado de uma determinada altura, ele cai devido exclusivamente à ação gravitacional. Comumente, a queda dos corpos é afetada pela resistência do ar, que por sua vez depende da forma do corpo e do local em que ele se encontra em relação ao nível do mar. Considerando-se, por boa aproximação, desprezível a resistência do ar, o movimento se comporta como uniformemente variado.

O valor aproximado da aceleração da gravidade terrestre no nível do mar é de  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , próximo à superfície do planeta. O valor da aceleração gravitacional, no entanto, muda conforme a latitude e a altitude.

## Exemplo

Calcule o tempo que uma máquina fotográfica, que caia do alto da Torre Eiffel, leva para atingir o solo. Considere desprezível a resistência do ar. Admita que a máquina não seja lançada e a gravidade local seja  $9,8 \text{ m/s}^2$ . A altura da Torre Eiffel é de 324 m.

## Resolução

$$s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{at^2}{2}$$



Ints Vikmanis/Shutterstock

$$0 = 324 + 0t - \frac{9,8t^2}{2}$$

$$0 = 324 + 0t - 4,9 t^2$$

$$t = 8,13 \text{ s}$$

A velocidade da máquina ao atingir o chão também pode ser determinada:

$$a = 9,8 \text{ m/s}^2, v_0 = 0$$

$$v = v_0 + at$$

$$v = 0 + 9,8 \cdot 8,13$$

$$v = 79,674 \text{ m/s}$$

Em verdade, existe de fato a resistência do ar, e a máquina fotográfica não atinge tal velocidade.

## Nota

Cabe salientar que gravidade ou aceleração da gravidade é uma consequência, não uma causa. Dois grandes físicos interpretaram de formas diferentes o conceito de gravidade, o que nos mostra que dois modelos científicos, para explicar um mesmo conceito, podem coexistir harmonicamente.

Para Newton, a gravidade pode ser entendida como sendo a força com que a Terra atrai os corpos. Para Einstein, ela é uma consequência das concentrações de massa (planetas, estrelas, astros) no espaço, fazendo com que este não seja propriamente homogêneo. Trata-se do conceito de anisotropia – o contrário de isotropia. Um corpo é anisotrópico em relação a uma propriedade quando esta tem valores diferentes segundo a direção considerada.



## Um pouco de história

Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.), filósofo grego, afirmava que todos os corpos terrestres eram compostos de quatro elementos: terra, água, ar e fogo.

Cada elemento tinha o seu “lugar natural”. No nível mais baixo, a terra, logo a seguir a água, o ar e o fogo. Quando esta ordem era perturbada, cada elemento procurava o seu “lugar natural”.

Assim se explicava porque as bolhas de ar sobem quando borbulhadas na água, e porque a pedra afunda na água.

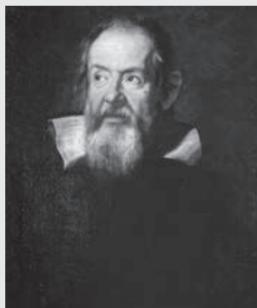
Para Aristóteles, na queda de um corpo, depois de um breve intervalo de tempo, esse corpo cairia com velocidade constante, proporcional ao seu peso. Por exemplo, dois corpos, um com massa m e outro com o dobro dessa massa, sendo soltos de uma mesma altura, chegariam ao solo em tempos diferentes, sendo que o segundo chegaria primeiro ao solo, na metade do tempo do primeiro.

Segundo a história, Galileu Galilei (1564-1642), astrônomo, físico e matemático italiano, por volta do ano de 1590, teria deixado cair do alto da torre de Pisa duas esferas de pesos diferentes, uma de chumbo e outra de madeira, observando que elas caíam quase ao mesmo tempo, levando-o a



Aristóteles

A. Dagli Orti/Biblioteca de Imagens DeA



Galileu Galilei

National Maritime Museum, Greenwich, Londres



Torre de Pisa

Hogar/Shutterstock

Continua...

concluir que os corpos não caíam exatamente ao mesmo tempo devido à resistência do ar.

Galileu teria escolhido a torre de Pisa, não por ela ser inclinada, mas por ser o edifício mais alto da região.

Para descrever matematicamente este problema, Galileu utilizou ensaios com planos inclinados e não propriamente com os experimentos de queda dos corpos.

### *Faça você mesmo*

Tome uma folha de papel e solte-a de uma altura facilmente determinável, por exemplo, da altura de sua cabeça quando você está de pé.

Observe o movimento e o tempo que ela leva para atingir o solo.

Tome novamente a folha de papel e amasse-a. Perceba que esta ação não altera a massa da folha de papel. Solte-a da mesma altura.

Observe que o tempo de queda é menor, indicando que ele não depende da massa do corpo.

Observe também que a resistência que o ar oferece é menor.

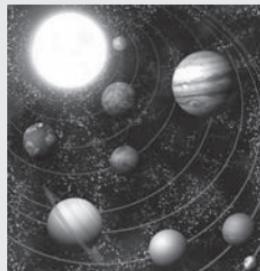
Saiba



### *Comparação da força da gravidade em diferentes planetas*

A aceleração devida à gravidade à superfície da Terra é  $9,80665 \text{ m/s}^2$  (o valor real varia ligeiramente ao longo da superfície da Terra). Esta medida é conhecida simplesmente como  $g$ . A lista que se segue apresenta a força da gravidade (em múltiplos de  $g$ ) na superfície dos planetas do Sistema Solar (valores aproximados e tomados como referência).

Os planetas Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, são gasosos, não possuindo uma superfície sólida observável como a Terra.



Christos Georgiou/Shutterstock

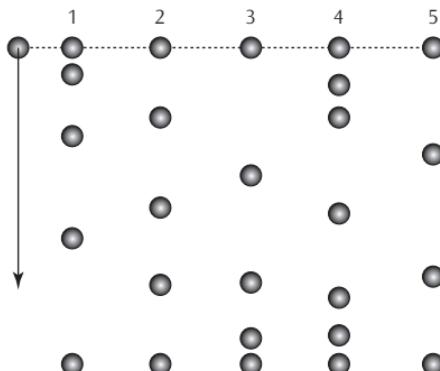
Continua...

Mercúrio	0,38
Vênus	0,90
Terra	1,00
Júpiter	0,38
Saturno	1,16
Urano	1,15
Netuno	1,19

## TESTE SEU SABER

- (Unesp-2008) Segundo se divulga, a *Big Tower* do parque de diversões Beto Carrero World possui uma torre radical com 100 m de altura. Caso o elevador estivesse em queda livre por todo esse trecho, e considerando o valor da aceleração da gravidade como sendo  $10,0 \text{ m/s}^2$ , e que o elevador parte do repouso, conclui-se que sua velocidade ao final dos 100 m seria de:  
a) 33,2 m/s   b) 37,4 m/s   c) 44,7 m/s   d) 49,1 m/s   e) 64 m/s
- Como você poderia determinar a profundidade de um poço dispondendo apenas de um cronômetro? O que você deveria medir? Que dados você deveria conhecer? Explique.
- (UFU) A partir do repouso, gotas de água caem de uma nuvem situada a 500 m do solo (adotado como referência). Considerando a aceleração da gravidade igual a  $10 \text{ m/s}^2$  e desprezando a resistência do ar e possíveis correntes de ar, assinale a alternativa correta da equação horária da posição de uma dessas gotas de água.  
a)  $y(t) = 500 + 5t^2$   
b)  $y(t) = 500 - 10t^2$   
c)  $y(t) = 500 - 5t^2$   
d)  $y(t) = 500 + 10t^2$
- (Unesp) Um corpo A é abandonado de uma altura de 80 m no mesmo instante em que um corpo B é lançado verticalmente para baixo com

- velocidade inicial de 10 m/s, de uma altura de 120 m. Desprezando a resistência do ar e considerando a aceleração da gravidade como sendo  $10 \text{ m/s}^2$ , é correto afirmar, sobre o movimento desses dois corpos, que:
- a) Os dois chegam ao solo no mesmo instante.
  - b) O corpo B chega ao solo 2 s antes que o corpo A.
  - c) O tempo gasto para o corpo A chegar ao solo é 2 s menor que o tempo gasto pelo B.
  - d) O corpo A atinge o solo 4 s antes que o corpo B.
  - e) O corpo B atinge o solo 4 s antes que o corpo A.
5. (Efoa) Um garoto caiu de um muro de 3,2 m de altura. A velocidade com que ele atingiu o solo foi, em m/s, de (adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$  e despreze a existência do ar)
- a) 4
  - b) 5
  - c) 6
  - d) 7
  - e) 8
6. (Uerj) Um corpo em queda livre percorre uma certa distância vertical em 2 s; logo, a distância percorrida em 6 s será:
- a) Dupla.
  - b) Tripla.
  - c) Seis vezes maior.
  - d) Nove vezes maior.
  - e) Doze vezes maior.
7. (UFSCAR) Uma pessoa larga uma bola de tênis da sacada de um prédio. Compare as cinco figuras verticais a seguir, de 1 a 5.



- A figura que melhor reproduz as posições sucessivas da bola em intervalos de tempo sucessivos iguais, antes de atingir o solo, é:  
a) 1                    b) 2                    c) 3                    d) 4                    e) 5

8. (Furg-RS) No instante  $t = 0$  s, um corpo de massa 1 kg é largado, a partir do repouso, 80 m acima da superfície terrestre. Considere desprezíveis as forças de resistência do ar. Para esse movimento, são feitas três afirmativas:

- I. No instante  $t = 3$  s, a velocidade do corpo é 30 m/s e está dirigida para baixo;  
II. Considerando a origem no solo, a equação horária do movimento é:

$$H = 80 - 5 \cdot t^2$$

- III. No instante  $t = 2$  s, a aceleração do movimento vale 20 m/s<sup>2</sup>.

Quais afirmativas estão corretas?

- a) Apenas II.  
b) Apenas III.  
c) Apenas I e II.  
d) Apenas I e III.  
e) I, II e III.

9. (PUC-SP) Em 1969, o astronauta americano Neil Armstrong realizou, na superfície da Lua, a experiência de queda livre de corpos diferentes no vácuo, anteriormente proposta por Galileu. Deixou cair ali uma pena e um martelo, simultaneamente, a partir da mesma posição.

- a) O que observou ao final da queda?  
b) Supondo que ambos os objetos tenham sido soltos de uma altura de 1,6 m em relação à superfície, depois de quanto tempo o martelo alcança o solo?

Adote aceleração da gravidade na Lua: 1,6 m/s<sup>2</sup>.

10. (PUCC-SP) De um ponto a 80 m do solo um pequeno objeto P é abandonado e cai em direção ao solo. Outro corpo Q, um segundo antes, havia sido atirado para baixo, na mesma vertical, de um ponto a 180 m do solo. Adote  $g = 10$  m/s<sup>2</sup> e despreze a ação do ar sobre os corpos. Sabendo que eles chegam juntos ao solo, a velocidade com que o corpo Q foi atirado tem módulo, em m/s, de:

- a) 100                    b) 95                    c) 50                    d) 20                    e) 11

- 11.** (Med. Bragança-SP) Se uma esfera cai livremente, a partir do repouso, em certo planeta, de uma altura de 128 m e leva 8 s para percorrer essa distância, quanto vale a aceleração da gravidade nesse local?
- 12.** (UCS-RS) Um objeto é lançado verticalmente para cima, a partir do solo, com velocidade de 20 m/s. Despreze a resistência do ar sobre o objeto e considere  $g = 10 \text{ m/s}^2$ . A que altura ele inverte o sentido de movimento?
- 13.** (UnB-DF) A famosa cachoeira de Itiquira tem altura de aproximadamente 180 m. Desprezando a resistência do ar, onde  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , determine a velocidade da água na base da cachoeira.
- 14.** (Ufac) Um corpo cai livremente de uma altura de 80 m. O tempo gasto para chegar ao solo é de:
- a) 4 s      b) 6 s      c) 8 s      d) 12 s      e) 16 s
- 15.** (PUC-MG) Dois corpos de pesos diferentes são abandonados no mesmo instante de mesma altura. Desconsiderando-se a resistência do ar, é CORRETO afirmar:
- a) Os dois corpos terão a mesma velocidade a cada instante, mas com acelerações diferentes.
- b) Os corpos cairão com a mesma aceleração e suas velocidades serão iguais entre si a cada instante.
- c) O corpo de menor volume chegará primeiro ao solo.
- d) O corpo de maior peso chegará primeiro ao solo.

### Descomplicando a Física

(ITA-2003) A partir do repouso, uma pedra é deixada cair da borda no alto de um edifício. A figura mostra a disposição das janelas, com as pertinentes alturas  $h$  e distâncias  $L$  que se repetem igualmente para as demais janelas, até o térreo. Se a pedra percorre a altura  $h$  da primeira janela em  $t$  segundos, quanto tempo levará para percorrer, em segundos, a mesma altura  $h$  da quarta janela? Despreze a resistência do ar.

a)  $\left( \frac{\sqrt{L+h} - \sqrt{L}}{\sqrt{2L+2h} - \sqrt{2L+h}} \right) t$

Continua...

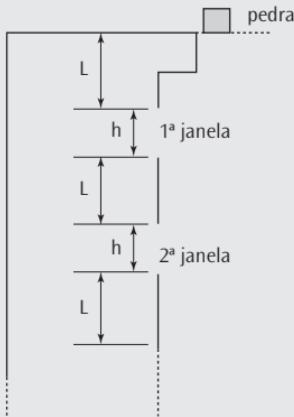
b)  $\left( \frac{\sqrt{2L+2h} - \sqrt{2L+h}}{\sqrt{L+h} - \sqrt{L}} \right) t$

c)  $\left( \frac{\sqrt{4(L+h)} - \sqrt{3(L+h)+L}}{\sqrt{L+h} - \sqrt{L}} \right) t$

d)  $\left( \frac{\sqrt{4(L+h)} - \sqrt{3(L+h)+L}}{\sqrt{2L+2h} - \sqrt{2L+h}} \right) t$

e)  $\left( \frac{\sqrt{3(L+h)} - \sqrt{2(L+h)+L}}{\sqrt{L+h} - \sqrt{L_s}} \right) t$

Resposta correta: Alternativa C.



### Resolução

O tempo de queda pode ser expresso da seguinte forma:

$$H = g \cdot T^2/2$$

$$T = (2H/g)^{1/2} \quad (I)$$

A posição da parte superior da janela em questão (veja figura) pode ser expressa como:  $H = (4L + 3h)$ , e o tempo para atingi-la é:

$$t_{\text{sup}} = [2 \cdot (4L + 3h)/g]^{1/2}.$$

A posição da parte inferior da janela em questão pode ser expressa como:  $H = (4L + 4h) = 4(L+h)$  e o tempo para atingi-la é:

$$t_{\text{inf}} = [2 \cdot 4(L + h)/g]^{1/2} = [8 \cdot (L + h)/g]^{1/2}$$

para percorrer a extensão da quarta janela temos:  $t_4 = t_{\text{inf}} - t_{\text{sup}}$

$$t_4 = [8 \cdot (L + h)/g]^{1/2} - [2 \cdot (4L + 3h)/g]^{1/2}$$

Por analogia, a partir de (I), para percorrer a extensão da primeira janela (de  $H = L$  até  $H = L + h$ ), temos:

$$t_1 = [2 \cdot (L + h)/g]^{1/2} - [2 \cdot (L)/g]^{1/2} = t$$

Continua...

Tomando  $t_4$  comparativamente a  $t_1$  (e simplificando a expressão por  $2/g$ ), surge a resposta:

$$\begin{aligned} \frac{t_4}{t_1} &= \frac{8 \cdot (L+h)/g^{1/2} - 2 \cdot (4L+3h)/g^{1/2}}{2 \cdot (L+h)/g^{1/2} - 2 \cdot (L)/g^{1/2}} - \\ &- \frac{4 \cdot (L+h)/g^{1/2} - (4L+3h)^{1/2}}{(L+h)^{1/2} - (L)^{1/2}} \\ t_4 &= \frac{4 \cdot (L+h)^{1/2} - (4L+3h)^{1/2}}{(L+h)^{1/2} - (L)^{1/2}} \cdot t = \\ &= \frac{\sqrt{4 \cdot (L+h)} - \sqrt{3(L+h)+L}}{\sqrt{(L+h)} - \sqrt{L}} \cdot t \end{aligned}$$

Entende-se por lançamentos de projéteis qualquer movimento não vertical sujeito à ação da gravidade, em que a resistência do ar é desprezível. É um movimento tratado em duas dimensões e, por conta disso, pode ser representado num plano cartesiano.

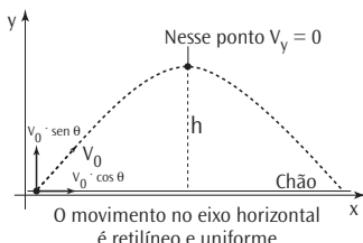


Maszas/Shutterstock

## Movimento sob a ação da gravidade – Balística

O termo movimento balístico é comumente empregado para designar movimento de projéteis. Tais corpos, sendo lançados num ângulo menor que  $90^\circ$ , apresentarão uma trajetória não vertical em relação ao solo, sendo, portanto, também conhecidos como lançamento oblíquo. Eventualmente, se o lançamento ocorre segundo um ângulo de  $0^\circ$ , costuma-se designá-lo como lançamento horizontal. A rigor, não há diferença entre o lançamento horizontal e o lançamento oblíquo; o que muda são apenas as condições iniciais, mais exatamente, o ângulo de lançamento.

Tais lançamentos podem ser entendidos como sendo a associação de dois movimentos conjugados: uma componente horizontal de movimento e uma componente vertical de movimento. A primeira constitui um movimento uniforme, e a segunda, um movimento uniformemente variado sujeito à aceleração gravitacional.



Consideremos, inicialmente, o lançamento oblíquo a seguir:

Na figura, temos a representação de um corpo lançado com velocidade inicial  $v_0$ , que faz com a horizontal um ângulo  $\theta$ . Pode-se decompor o vetor velocidade em suas componentes  $v_x$  e  $v_y$ , segundo suas projeções de movimento nos eixos  $Ox$  e  $Oy$ , em que  $Ox$  representa a evolução da componente horizontal do movimento balístico e  $Oy$  representa a componente vertical:

$$v_x = v_0 \cdot \cos \theta$$

$$v_y = v_0 \cdot \sin \theta$$

A componente vertical do movimento do corpo está sujeita à ação da aceleração da gravidade  $g$ . No eixo das abscissas ( $x$ ), a projeção de  $g$  é nula; logo, a componente do movimento do corpo no eixo  $Ox$  é retilíneo e uniforme (MRU). No eixo das ordenadas ( $y$ ), temos projeção de  $g$  igual a  $-g$ . Assim, a componente do movimento do corpo é retilíneo e uniformemente variado (MRUV).

$$x = v_{0x} \cdot t$$

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{gt^2}{2}$$

A componente vertical da velocidade do corpo varia com o tempo, conforme a expressão abaixo:

$$v_y = v_0 - g \cdot t$$

A equação de Torricelli aplicada à componente vertical do movimento do corpo pode ser expressa:

$$v_y^2 = v_{0y}^2 - 2g \cdot \Delta y$$

Das expressões anteriores, obtém-se a equação da trajetória, que é:

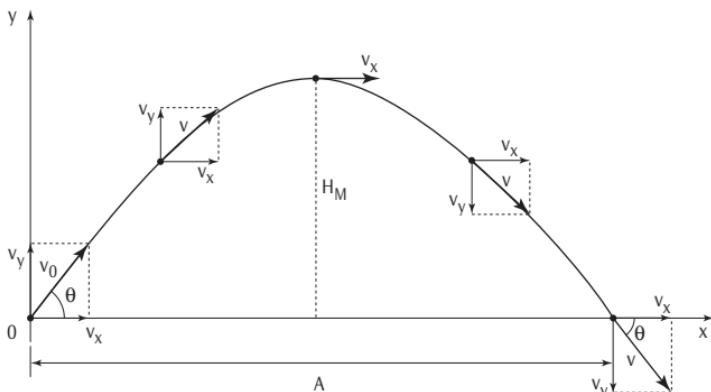
$$y = \tan \theta \cdot x - \frac{g}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \theta} \cdot x^2$$

A equação da trajetória é de segundo grau em relação a x e, portanto, a trajetória é uma parábola.

A velocidade em um ponto qualquer é obtida com a aplicação do teorema de Pitágoras:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2$$

Observe, na figura a seguir, que a componente vertical da velocidade diminui à medida que o projétil sobe e aumenta à medida que o projétil retorna ao solo. A componente horizontal não se altera durante o percurso.



Onde:  $H_m$  = altura máxima alcançada pelo projétil;  
 $A$  = alcance horizontal do projétil.

O tempo de subida ( $t_s$ ) equivale ao intervalo de tempo decorrido desde o instante do lançamento até o instante em que o móvel atinge a altura máxima ( $H_m$ ), correspondente ao vértice da parábola. Neste instante, a componente vertical da velocidade é nula; logo, podemos escrever:

$$0 = v_0 \cdot \sin\theta - g \cdot t_s$$

Portanto:

$$t_s = \frac{v_0 \cdot \sin \theta}{g}$$

O tempo de descida é igual ao de subida; assim, o tempo total é:

$$t = 2t_s$$

A altura máxima  $H_m$  pode ser obtida por meio da equação de Torricelli aplicada ao movimento vertical do corpo. Admitindo-se  $v_y = 0$  quando  $\Delta y$  vale  $H_m$ . Assim:

$$0 = v_{0y}^2 - 2g H_m$$
$$v_{0y}^2 \cdot \sin^2 \theta = 2g H_m$$

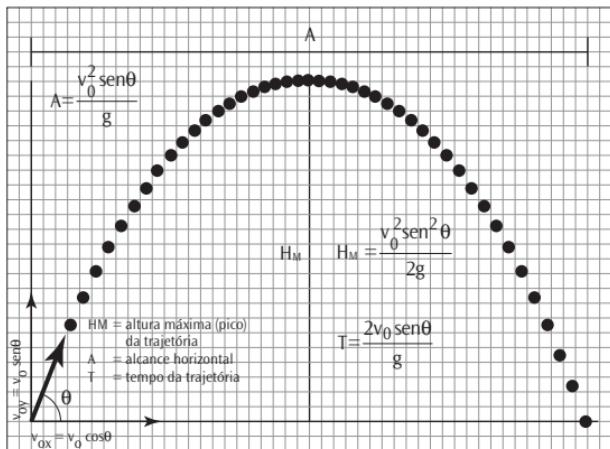
$$H_m = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \theta}{2g}$$

O alcance horizontal  $A$  pode ser calculado a partir da função horária do movimento horizontal do corpo, quando o tempo for igual ao tempo total:

$$A = \frac{2v_0^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{g}$$

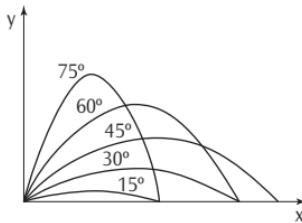
Como  $\sin 2\theta = 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$ , temos:

$$A = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\theta}{g}$$



O alcance máximo pode ser obtido quando o ângulo de lançamento é  $\theta = 45^\circ$ . Então, o alcance máximo é:

$$A_{\max} = \frac{v_0^2}{g}$$

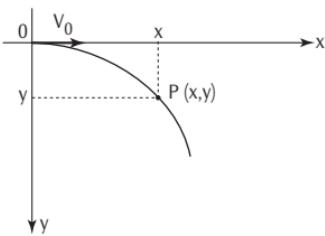


Nessas condições, a altura máxima atingida é:

$$H_m = \frac{A_{\max}}{4}$$

Em se tratando de lançamento horizontal, o ângulo de lançamento é  $0^\circ$  e, portanto,  $v_{0x} = v_0$  e  $v_{0y} = 0$ .

Orientando o eixo Oy para baixo, temos:



$$x = v_0 t$$

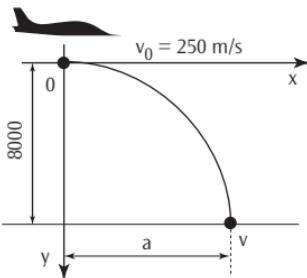
$$y = g \cdot \frac{t^2}{2}$$

$$v_y = g \cdot t$$

### Exemplo

Um avião voa horizontalmente com velocidade de 250 m/s e a 8000 m de altitude. Em um determinado instante, o piloto lança uma bomba. Desprezando-se a resistência do ar e dado  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , determine:

- O instante, a partir do lançamento, em que a bomba atinge o solo.
- A que distância da vertical em que a bomba foi lançada ela atinge o solo.
- A velocidade com que a bomba atinge o solo.



### Resolução

- No instante em que a bomba atinge o solo,  $y = 8000 \text{ m}$

$$y = \frac{1}{2}gt^2$$

$$8000 = 5 t^2$$

$$t = 40 \text{ s}$$

b) O alcance da bomba ao atingir o solo é:

$$x = v_0 \cdot t$$

$$x = 250 \cdot 40$$

$$x = 10000 \text{ m}$$

c) Ao atingir o solo a componente horizontal da velocidade é de  $v_{0x} = v_0 = 250 \text{ m/s}$  e a velocidade vertical  $v_y$  é:

$$v_y = g \cdot t$$

$$v_y = 10 \cdot 40 = 400 \text{ m/s}$$

A velocidade da bomba ao atingir o solo será:

$$v^2 = v_0^2 + v_y^2$$

$$v^2 = 250^2 + 400^2$$

$$v = 471,70 \text{ m/s}$$



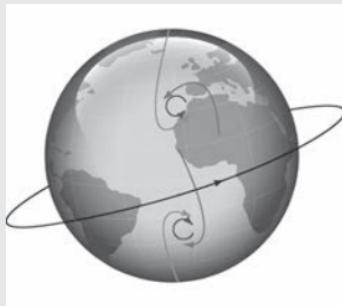
Dominador/PhotoXpress



## Projéteis de longo alcance

Em lançamentos de projéteis de longo alcance, deve-se considerar que:

1. A resistência do ar não é desprezível.
2. A aceleração da gravidade não é constante, variando em módulo e também em direção. A aceleração da gravidade deixa de ser vertical e passa a ser dirigida para o centro da Terra, tendo como consequência que a trajetória do projétil deixa de ser parabólica.
3. Sendo o tempo de percurso muito grande, a rotação da Terra exerce efeito sobre o movimento do projétil, fazendo surgir uma força fictícia denominada força de Coriolis.



Dip/PhotoXpress

Força de Coriolis – influência sobre grandes massas de ar e água. Note que os sentidos de rotação provocados pela força de Coriolis são opostos nos hemisférios Norte e Sul.

### TESTE SEU SABER

1. (Vunesp) Em voo horizontal, a 3000 m de altitude, com velocidade de 540 km/h, um bombardeiro deixa cair uma bomba. Esta explode 15 s antes de atingir o solo. Desprezando a resistência do ar, calcule a velocidade da bomba no momento da explosão. Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .

2. (FEI-SP) Um bombardeiro voa a 3920 m de altura com velocidade de 1440 km/h. De que posição ele deve soltar uma bomba para atingir um alvo no solo? Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .
3. (UFPR) Uma bola rola sobre uma mesa horizontal de 1,225 m de altura e vai cair num ponto do solo situado à distância de 2,5 m, medida horizontalmente a partir da beirada da mesa. Qual a velocidade da bola, em m/s, no instante em que ela abandonou a mesa? (Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .)
4. (PUCC-SP) Calcule o alcance de um projétil lançado por um morteiro com velocidade inicial de 100 m/s, sabendo-se que o ângulo formado entre o morteiro e a horizontal é de  $30^\circ$ . (Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .)
5. (Cesgranrio-RJ) Para bombardear um alvo, um avião em voo horizontal a uma altitude de 2 km solta a bomba quando a sua distância horizontal até o alvo é de 4 km. Admite-se que a resistência do ar seja desprezível. Para atingir o mesmo alvo, se o avião voasse com a mesma velocidade, mas agora a uma altitude de apenas 0,50 km, ele teria de soltar a bomba a que distância horizontal do alvo?
6. (FC Chagas-SP) Um avião precisa soltar um saco com mantimentos a um grupo de sobreviventes que está numa balsa. A velocidade horizontal do avião é constante e igual a 100 m/s em relação à balsa e sua altitude é 2000 m. Qual a distância horizontal que separa o avião dos sobreviventes, no instante do lançamento? (Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ).
7. (Cefet) Uma bola de pingue-pongue rola sobre uma mesa com velocidade constante de 2 m/s. Após sair da mesa, cai, atingindo o chão a uma distância de 0,80 m dos pés da mesa. Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , despreze a resistência do ar e determine:  
a) A altura da mesa.  
b) O tempo gasto para atingir o solo.
8. (UFBA) De um ônibus que trafega numa estrada reta e horizontal com velocidade constante de 20 m/s desprende-se um parafuso, situado a 0,80 m do solo e que se fixa à pista no local em que a atingiu. Tomando-se como referência uma escala cujo zero coincide com a vertical no instante em que se inicia a queda do parafuso e considerando-se  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , determine, em m, a que distância este será encontrado sobre a pista.

9. (Sta Casa-SP) Um canhão, em solo plano e horizontal, dispara uma bala, com ângulo de tiro de  $30^\circ$ . A velocidade inicial da bala é  $500 \text{ m/s}$ . Sendo  $g = 10 \text{ m/s}^2$  o valor da aceleração da gravidade no local, qual a altura máxima da bala em relação ao solo, em km?
10. (FEI-SP) Um objeto voa numa trajetória retilínea, com velocidade  $v = 200 \text{ m/s}$ , numa altura  $H = 1500 \text{ m}$  do solo. Quando o objeto passa exatamente na vertical de uma peça de artilharia, esta dispara um projétil, num ângulo de  $60^\circ$  com a horizontal. O projétil atinge o objeto decorrido o intervalo de tempo  $\Delta t$ . Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$ . Calcule a velocidade de lançamento do projétil.
11. Um projétil é lançado do solo numa direção inclinada em relação à horizontal. Em que instante sua velocidade será mínima? E máxima?
12. Numa prova de tiro ao alvo, o atirador deve dirigir o projétil exatamente para o centro do alvo? Justifique.
13. (UFU-MG) Uma bola é chutada em uma direção que forma um ângulo de  $45^\circ$  com a horizontal. Desprezando-se os atritos com o ar, no ponto mais alto que a bola atinge a intensidade de sua:
- Velocidade é zero.
  - Aceleração é zero.
  - Velocidade é mínima, mas diferente de zero.
  - Aceleração é mínima, mas diferente de zero.
  - Velocidade e sua aceleração têm módulos iguais.
14. (Fuvest-SP) Uma pessoa sentada num trem, que se desloca numa trajetória retilínea e horizontal a  $20 \text{ m/s}$ , lança uma bola verticalmente para cima e a pega de volta no mesmo nível do lançamento. A bola atinge uma altura máxima de  $0,8 \text{ m}$  em relação a este nível. Adotando-se  $g = 10 \text{ m/s}^2$  e desprezando-se o efeito do ar, pede-se:
- Os módulos da velocidade vetorial e da aceleração vetorial da bola, em relação ao solo terrestre, quando ela atinge sua altura máxima.
  - O tempo durante o qual a bola permanece no ar.
15. (Unesp) A escada rolante que liga a plataforma de uma estação subterrânea de metrô ao nível da rua move-se com velocidade constante de  $0,80 \text{ m/s}$ :

- a) Sabendo-se que a escada tem uma inclinação de  $30^\circ$  em relação à horizontal, determine, com o auxílio da tabela adiante, a componente vertical de sua velocidade.

ângulo $\theta$	sen $\theta$	cos $\theta$
$30^\circ$	0,500	0,867
$60^\circ$	0,867	0,500

- b) Sabendo-se que o tempo necessário para um passageiro ser transportado pela escada, do nível da plataforma ao nível da rua, é de 30 segundos, determine a que profundidade se encontra o nível da plataforma em relação ao nível da rua.

### *Descomplicando a Física*

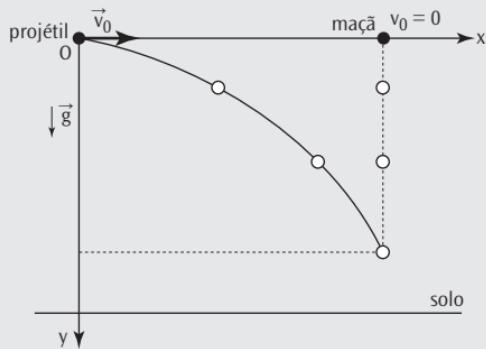
Um fuzil é montado de maneira que seu cano fique na horizontal e apontado diretamente para uma maçã pendurada num galho de árvore. Dispara-se contra a maçã e, no mesmo instante em que o projétil sai do cano, a maçã se desprende da árvore. Sabe-se que o projétil consegue viajar a distância horizontal que o separa da maçã antes de atingir o solo. Desprezando a resistência do ar, o projétil:

- a) Passará acima da maçã.
- b) Atingirá a maçã.
- c) Passará abaixo da maçã.
- d) Os dados fornecidos são insuficientes para responder.

Resposta correta: Alternativa B.

O projétil, após abandonar o cano da arma, e a maçã estão sujeitos à mesma aceleração gravitacional e, portanto, se iniciam a queda juntos, caem juntos. Qualquer que seja a distância entre a arma e a maçã, o projétil sempre a atinge.

Continua...



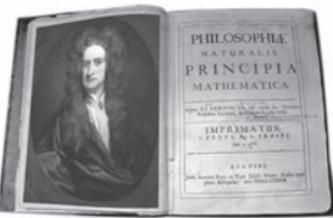
O gráfico acima representa os movimentos do projétil e da queda da maçã (tracejado)

A dinâmica é a parte da mecânica que estuda as causas dos movimentos dos corpos.

Grande parte do estudo do movimento dos corpos, incluindo os movimentos dos corpos celestes, é devida aos trabalhos de Galileu Galilei (1564-1642), introduzindo a observação acompanhada de medição e o estabelecimento de leis físicas que regem os fenômenos. Tais contribuições, somadas aos trabalhos de Johannes Kepler (1571-1630), serviram de base para alicerçar os trabalhos de Isaac Newton (1642-1727), que estabeleceu os três princípios básicos da mecânica. A partir desses princípios, ele desenvolveu uma teoria consistente sobre os movimentos dos corpos, atualmente conhecida como Mecânica Clássica. Esses princípios são chamados de "Leis de Newton" ou "Leis da Dinâmica".

## Primeira Lei de Newton: Princípio da Inércia

Quando um trem parte, os passageiros sentem, aparentemente, que seu corpo é atirado para trás, do mesmo modo que quando um veículo freia bruscamente, sentimos o corpo sendo lançado para frente. Esses exemplos estão relacionados ao fato de que os veículos estão sendo acelerados, mas as pessoas em seu interior, inicialmente, não, indicando que os corpos tendem a permanecer em seus lugares, por inércia.



Cópia de Princípios Matemáticos da Filosofia Natural, de Isaac Newton.

Andrew Dunn/  
Creative Commons

## Inércia

Inércia é a propriedade geral da matéria, segundo a qual um corpo por si só não consegue modificar o seu estado de equilíbrio.

Por estado de equilíbrio pode-se entender duas possibilidades ou situações:

A primeira, de equilíbrio estático, situação na qual um corpo parado (com velocidade nula) em relação a um referencial permanece em repouso em relação a esse mesmo referencial.

A segunda constitui uma situação de equilíbrio dinâmico: quando um corpo (de dimensões desprezíveis, uma partícula) está em movimento em relação a um referencial, livre da ação de forças ou com a resultante das forças igual a zero, deverá permanecer em movimento retilíneo e uniforme em relação a esse mesmo referencial.

Do que foi exposto, pode-se concluir que a força é o agente que promove a alteração da velocidade de um corpo. Quando se fala em alteração da velocidade, comumente se pensa em termos escalares, isto é, do módulo da velocidade. Como velocidade é uma grandeza vetorial, essa alteração pode ser também em termos da direção e do sentido do movimento.

Resumindo, um corpo permanece em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme em relação a um referencial se a resultante das forças que atuam sobre ele for igual a zero.

## Segunda Lei de Newton: Princípio Fundamental da Dinâmica

A grandeza que mede a intensidade da interação entre os corpos é denominada *força*. O resultado dessa interação é uma aceleração (rapidez da alteração da velocidade vetorial), que será maior ou menor em função da massa dos corpos envolvidos.

As grandezas básicas da dinâmica são a força, a massa e a aceleração.

A força e a aceleração são grandezas vetoriais; a massa, uma grandeza escalar.

A soma vetorial de todas as forças que agem sobre um corpo é denominada *força resultante* (comumente designada por  $\vec{R}$ ).

## *Conceituação de força*

Força é toda grandeza de produzir uma deformação ou uma aceleração.

### **Definição**

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Onde:  $\vec{F}$  = força única aplicada ao corpo (ou resultante);

$\vec{a}$  = aceleração adquirida em consequência da força;

$m$  = massa do corpo.

No SI utilizam-se as seguintes unidades:

Aceleração – m/s<sup>2</sup>

Massa – quilograma (kg)

Força – newton (N)

A unidade newton é, por definição, a força que, aplicada a um corpo de 1 kg, provoca a aceleração de 1 m/s<sup>2</sup>.

### **Exemplo**

Um corpo de massa 8 kg, inicialmente em repouso, é submetido a uma força de 40 N. Considerando essa a única interação, qual a aceleração que o corpo adquire?

## Resolução

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Como força e aceleração possuem mesma direção e sentido, neste caso, podemos analisar separadamente direção e sentido e, em relação aos cálculos, trabalhar apenas com os módulos e reescrever:

$$F = m \cdot a$$

$$a = \frac{40}{8}$$

$a = 5 \text{ m/s}^2$  na direção e no sentido da força.

## Intensidade de forças (em newton)

Força da atração gravitacional entre o Sol e a Terra:  $3,5 \cdot 10^{22} \text{ N}$

Força de atração gravitacional entre a Terra e a Lua:  $2 \cdot 10^{20} \text{ N}$

Atração gravitacional da Terra sobre uma pessoa de 70 kg:  $7 \cdot 10^2 \text{ N}$

Atração gravitacional da Terra sobre um pacotinho de balas (100 g): 1,0 N

Força entre o elétron e o núcleo do átomo de hidrogênio:  $8 \cdot 10^{-8} \text{ N}$

Saiba



### Nossa Língua Portuguesa

Segundo o *Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa*, há mais de uma dezena de significados para a palavra força, entre eles: vigor físico, fraqueza, energia moral, violência, tropas de exército, e tantos outros.

Na ciência Física, o conceito de força está associado à ideia de interação entre corpos e, portanto, um corpo sofre ou exerce a ação de uma força, não sendo possível armazená-la.

## Terceira Lei de Newton: Princípio da Ação e Reação

Quando, em um jogo de bilhar, lançamos uma bola perpendicularmente contra a tabela da mesa, comumente, a bola colide com a tabela e retorna em sentido contrário relativamente ao movimento antes da colisão. Quando um carro se movimenta em terreno contendo cascalhos, ele os lança em sentido contrário ao seu movimento. Da mesma forma, quando andamos para frente, empurramos, com os pés, o chão para trás. Tais fatos indicam que, ao exercer uma ação sobre uma superfície (ou outro corpo), surge como consequência uma ação em oposição à primeira, ou seja, uma reação.

### *Princípio da ação e reação*

A toda ação corresponde uma reação de mesma intensidade, mesma direção e sentido contrário.

Assim, tomando como exemplo a colisão entre duas bolas de bilhar, se uma colide frontalmente contra a outra com uma força de intensidade 8 N, a segunda exerce uma força de reação de  $-8\text{ N}$ , isto é, uma força de mesma intensidade, 8 N, na mesma direção, porém em sentido contrário (explicitado pelo sinal negativo) em relação à força de ação.

É importante salientar que as forças de ação e reação *não se anulam porque atuam em corpos distintos*. Dessa forma, embora possamos, eventualmente, em alguma resolução matemática escrever coisas como  $x = 8 + (-8) = 0$ , isto se constitui apenas em uma etapa de resolução do problema e, portanto, pode ser uma verdade matemática, mas não é uma verdade Física, em se tratando de ação e reação.



## Um pouco mais sobre ação e reação

Uma bola de futebol que colide perpendicularmente contra uma superfície plana e horizontal, imediatamente é projetada em direção oposta. Durante o contato da bola com o plano faz-se presente o par ação/reação. No momento em que a bola se destaca da parede não há mais o par de forças em questão. Casos como esse exemplificam situações em que o par ação/reação ocorre por contato.

Podemos ter casos de ação e reação à distância, isto é, sem que haja contato físico entre os corpos. A título de exemplo, podemos citar um par de ímãs que podem atrair-se ou repelir-se mutuamente quando colocados relativamente próximos.

## Descrição de forças – Peso ou força-peso

A Terra exerce uma força de atração sobre os corpos que estão próximos à superfície. Essa força, de caráter gravitacional, comumente denominada peso, é dirigida, em linguagem usual, “verticalmente para baixo”; rigorosamente, devemos dizer para o centro do planeta. A intensidade dessa força exercida num corpo de massa  $m$ , num local em que a aceleração da gravidade tem módulo  $g$ , é dada por:

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g}$$

### Exemplo

A massa de uma pessoa é 70 kg. Determine seu peso na Terra e na Lua, sabendo-se que a aceleração da gravidade na Terra é de  $9,8 \text{ m/s}^2$  e na Lua é de  $1,6 \text{ m/s}^2$ .

### Resolução

$$P = m \cdot g$$

Na Terra

$$P_{\text{Terra}} = 70 \cdot 9,8$$

$$P_{\text{Terra}} = 686 \text{ N}$$

Na Lua

$$P_{\text{Lua}} = 70 \cdot 1,6$$

$$P_{\text{Lua}} = 112 \text{ N}$$

## *Peso ou massa?*

A massa de um corpo é uma grandeza escalar, enquanto o peso é uma grandeza vetorial, ou seja, é uma força que resulta da ação da gravidade local sobre a massa desse corpo.

Quando subimos numa balança, uma vez que a leitura é em kg, na realidade estamos medindo nossa massa, apesar de dizermos que estamos nos pesando. A menos que engordemos ou emagreçamos por conta de uma dieta, nossa massa não varia, ela é a mesma aqui na Terra, na Lua ou em qualquer outro lugar.

No entanto, nosso peso ou, melhor dizendo, nossa força-peso, varia de um planeta para outro conforme varia a aceleração gravitacional local.

Vale ressaltar que a massa obtida por meio da força gravitacional ( $P = m \cdot g$ ), isto é, medida com auxílio de uma balança, é denominada *massa gravitacional*. Outra maneira de se obter a massa de um corpo, denominada *massa inercial*, é pela Segunda Lei de Newton ( $F = m \cdot a$ ). A massa inercial se refere à dificuldade de se alterar a velocidade de um corpo. Embora conceitualmente as massas sejam diferentes, os valores encontrados pelos dois métodos são idênticos.



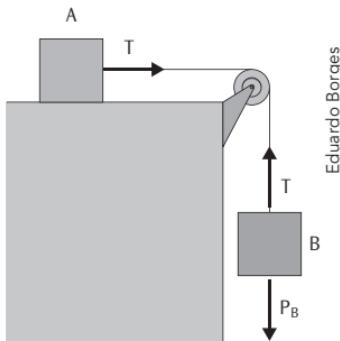
PinkShot/PhotoXpress

# Força de tração em um fio

Uma corda ou fio esticado aplica, sobre o ponto em que está preso, uma força que denominamos tração. A força de tração tem a mesma direção que o fio e sentido de uma extremidade a outra. Portanto, surge um par de forças de tração, uma em cada extremidade da corda ou fio. Caso o fio seja uniforme (ideal), as trações nas duas extremidades terão mesmo módulo.

## Exemplo

Os blocos A e B estão ligados por um fio ideal que passa por uma polia de atrito desprezível. Considere que a superfície onde A está apoiado é horizontal e de atrito também desprezível. As massas de A e B são, respectivamente, 3 kg e 2 kg. Determine a aceleração de cada corpo e a tração do fio que os une.



## Resolução

$$P_B = m_B \cdot g$$

$$P_B = 2 \cdot 10 = 20 \text{ N}$$

O peso do bloco B é que efetivamente movimenta o sistema.

Isolando os corpos, verifica-se que sobre o bloco B manifestam-se duas forças, o peso e a tração no fio. Aplicando a Segunda Lei de Newton para o bloco B, temos:

$$P_B - T = m_B \cdot a \text{ (I)}$$

Sobre o bloco A, a tração no fio é que promove o seu movimento. Aplicando a Segunda Lei de Newton para o bloco A, temos:

$$T = m_A \cdot a \text{ (II)}$$

Somando-se as expressões:

$$\text{I} + \text{II}$$

$$P_B = (m_A + m_B) a$$

$$20 = (2 + 3) a$$

$$a = 4 \text{ m/s}^2$$

A tração no fio pode ser calculada:

$$T = m_A \cdot a$$

$$T = 2 \cdot 4$$

$$T = 8 \text{ N}$$

## Força normal e força de atrito

Quando um corpo está em movimento ou há tendência de movimento, as forças que agem sobre o corpo devido à interação com a superfície têm uma resultante  $R$  que pode ser decomposta em dois vetores:  $N$  e  $F_{at}$ . O vetor  $N$  é a força normal à superfície, isto é, uma força do apoio sobre o elemento apoiado, perpendicularmente à região de apoio. O vetor  $F_{at}$  é denominado *força de atrito* e seu sentido é contrário ao do movimento ou à tendência de movimento do corpo em relação à superfície.

O atrito é denominado *estático* quando inexiste movimento do corpo em relação à superfície. Quando há movimento, o atrito é chamado *dinâmico* ( $F_{atd}$ ), que pode ser determinado por:

$$F_{atd} = \mu_d \cdot N$$

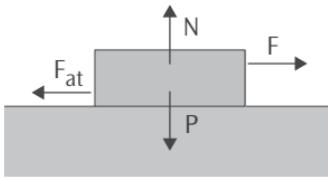
onde:  $\mu_d$  = coeficiente de atrito dinâmico;

$N$  = intensidade da força normal.

## Exemplo

Um corpo de massa 5 kg é puxado horizontalmente sobre um plano com uma força de intensidade 80 N. O coeficiente de atrito dinâmico entre o corpo e o plano é 0,4. Calcule a aceleração do corpo, considerando  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .

A força resultante ( $F_R$ ) que atua sobre o corpo pode ser calculada:



Eduardo Borges

$$F_R = F - F_{at}$$

$$F_{at} = \mu_d \cdot N, \text{ onde, neste caso, } N = P = mg$$

$$F_{at} = 0,4 \cdot 5 \cdot 10$$

$$F_{at} = 20 \text{ N}$$

$$F_R = 80 - 20$$

$$F_R = 60 \text{ N}$$

A partir da Segunda Lei de Newton, obtém-se a aceleração:

$$a = \frac{F_R}{m}$$

$$a = \frac{60}{5}$$

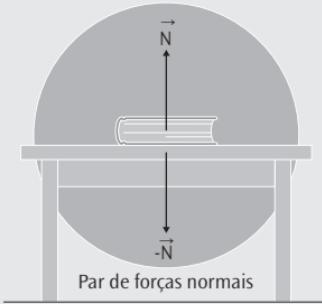
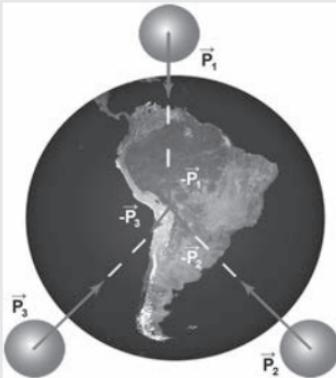
$$a = 12 \text{ m/s}^2$$

É muito comum o equívoco de pensamento ao achar que as forças normal e peso constituem um par ação e reação. Essas forças resultam de interações diferentes.

Peso é a força que a Terra exerce sobre os corpos próximos à superfície, atua sobre o corpo e está dirigida para o centro da Terra, logo, a reação é a força que o bloco exerce sobre a Terra, atuando sobre o centro da Terra e dirigida para o corpo. É um exemplo claro de um par ação/reAÇÃO à distância.

### Peso de um corpo e sua reação

A força normal é fruto da ação de um corpo sobre a superfície no qual ele está apoiado. A ação do bloco sobre o plano de apoio tem como reação a força do plano de apoio sobre o bloco.





## Um pouco mais sobre atrito

A rigor, dizer que o atrito se opõe ao movimento é uma simplificação perigosa. Em verdade, a força de atrito é uma força de reação às verdadeiras forças motoras. O atrito não é uma força motora, mas é graças a ela que há possibilidade de movimento.

Uma pessoa, ao iniciar um passo, faz com que os pés exerçam uma ação empurrando o solo para trás; o piso exerce uma força de reação sobre os pés, empurrando-os para frente. Uma pessoa que tentasse andar sobre uma superfície completamente livre de atrito, não encontraria apoio e permaneceria no mesmo lugar, com os pés deslizando sobre a superfície a cada passo. De modo simplificado, quando damos um passo e, por qualquer motivo, o atrito é “menor que o esperado”, escorregamos.

Na realidade, a força de atrito se opõe ao escorregamento de uma superfície em relação à outra ou à tendência de escorregamento relativo.

### Atrito estático ou dinâmico?

Quando um corpo está sujeito à ação de uma força sobre uma superfície de apoio, não havendo movimento de uma em relação à outra, dizemos que o atrito é de natureza estática. À medida que aumenta a força que tende a colocar o corpo em movimento, aumenta também o atrito estático. Na condição de iminência de movimento, dizemos que o atrito estático é máximo. Quando o corpo entra em movimento, temos atrito dinâmico. A força de atrito dinâmico é sempre menor que a de atrito estático máximo para um par de superfícies em contato.

As forças de atrito estático máximo,  $F_{atM}$ , (iminência de escorregamento) e de atrito dinâmico,  $F_{atD}$ , (escorregamento) podem ser calculadas por:

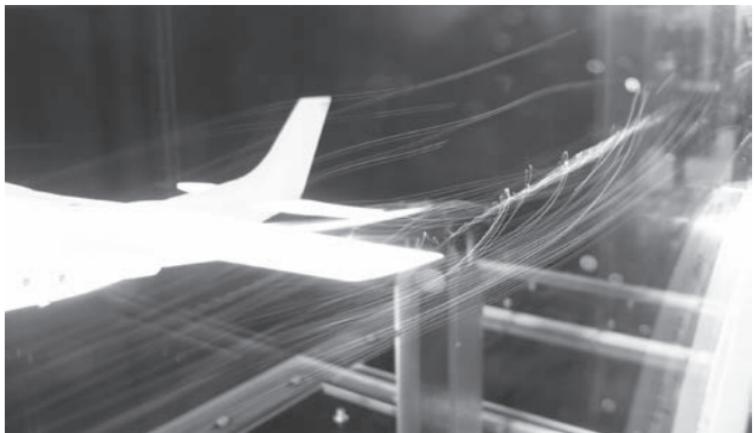
$$F_{atM} = \mu_e N \text{ e } F_{atD} = \mu_d N$$

Onde:  $\mu_e$  = coeficiente de atrito estático;

$\mu_d$  = coeficiente de atrito dinâmico.  $(\mu_d < \mu_e)$

## Força de resistência do ar

Quando um corpo se move, o ar a sua volta exerce uma resistência, e, portanto, uma força contrária ao movimento do corpo. Situação semelhante se aplica caso o corpo esteja imerso em um líquido.



Benjamin FrantzDale/Creative Commons

Teste aerodinâmico em túnel de vento.

Para o movimento no ar, de um paraquedas aberto, a força de resistência tem intensidade igual a  $F = K \cdot v^2$ , em que  $K$  é uma constante de caráter aerodinâmico do corpo (dependente da forma do corpo) e  $v$  é o módulo da velocidade instantânea. No SI, a unidade de  $K$  é  $N \cdot s^2 \cdot m^{-2}$ .

Para gotas de chuva, a força de resistência tem intensidade igual a  $F = K \cdot v$ , com

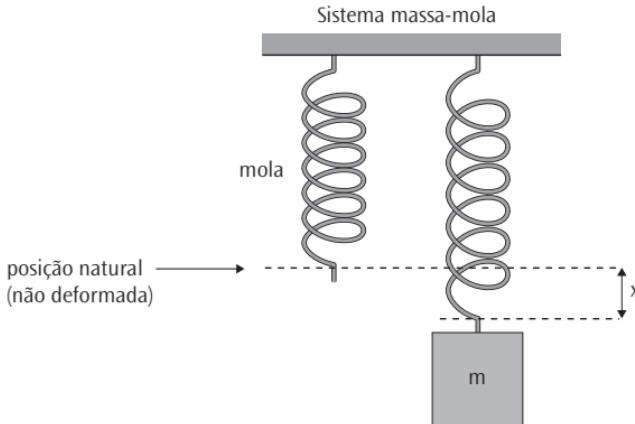
$$K = 1 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s/m} \text{ (aproximadamente).}$$

## Força elástica – Lei de Hooke

A lei de Hooke estabelece que o módulo da força ( $F$ ) exercida sobre uma mola é diretamente proporcional à deformação ( $x$ ) sofrida pela mola:

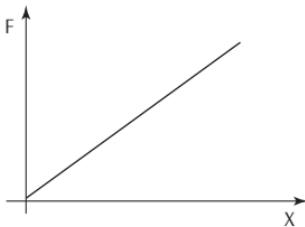
$$F = k \cdot x,$$

onde  $k$  é a constante elástica da mola (cuja unidade é N/m) e seu valor depende da mola.



Como toda função que relaciona grandezas proporcionais, o gráfico  $F$  versus  $x$  é uma reta cujo coeficiente angular é a constante elástica.

A força elástica sobre uma mola tem caráter restaurador, isto é, quando uma mola sofre uma deformação, ao ser solta, ela se comporta de forma a retornar a sua condição original.



## Exemplo

Uma mola de constante elástica  $k = 4000 \text{ N/m}$  sofre uma deformação. Calcule qual será o valor da força executada por essa mola quando:

- Ela for comprimida em 20 cm.
- Ela for comprimida em 30 cm.

## Resolução

a)  $F_{\text{el}} = k \cdot x$

$$F_{\text{el}} = 4000 \cdot 0,20 = 800 \text{ N}$$

b)  $F_{\text{el}} = k \cdot x$

$$F_{\text{el}} = 4000 \cdot 0,30 = 1200 \text{ N}$$

Observe que a força elástica não é constante.

## Referenciais inerciais e não inerciais

Imagine um corpo estacionado sobre a plataforma de um trem em movimento retilíneo e uniforme. Para alguém que, porventura, possa estar na mesma plataforma, o corpo está em repouso e, portanto, a resultante das forças que atuam no corpo é nula. Repentinamente, o trem faz uma curva e o corpo é “jogado para fora da curva”. Quem é que o joga “para fora da curva”? Pelo Princípio da Inércia, o corpo deveria permanecer em repouso, mas ele se desloca “para fora da curva”. O corpo adquire uma aceleração, embora a resultante das forças seja nula, o que contraria a Segunda Lei de Newton. Também não há interação com outro corpo e, portanto, não há ação e reação. Como explicar tal evento?

O detalhe é que as Leis de Newton só são válidas para referenciais inerciais. Referenciais inerciais são referenciais fixados em sistemas rígidos em equilíbrio, isto é, em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme.

Sistemas de referência acelerados são denominados referenciais não inerciais. É o caso em questão. Durante uma curva, ou enquanto um corpo está sendo acelerado ou freado, um elevador que sobe ou desce, mas não com velocidade constante, são exemplos de referenciais não inerciais.

Os sistemas não inerciais dão origem às denominadas forças fictícias. São “forças” que não são exercidas por corpo ou sistema físico algum. Não são, de fato, forças; elas simplesmente não existem! Elas “surgem” porque o corpo, que está em um sistema acelerado, tem a tendência de se manter em equilíbrio, por inércia. Como exemplos podemos citar a força centrífuga e a força de Coriolis.

---

### TESTE SEU SABER

---

1. (Vunesp) Uma bola de futebol de massa 0,4 kg é chutada por um jogador a partir do repouso e adquire a velocidade de 90 km/h. Se o intervalo de tempo em que o pé do jogador interage com a bola é de 0,5 s, pode-se afirmar que a intensidade média da força exercida pelo pé do jogador sobre a bola é de:  
a) 20 N      b) 30 N      c) 40 N      d) 50 N      e) 60 N
2. Se a velocidade de um corpo de 1 kg de massa, que se move em linha reta, variou de 20 m/s em 4 s, qual o módulo da força resultante que atuou sobre ele, suposta constante?
3. Um automóvel de 800 kg se move em linha reta num plano horizontal, submetido a quatro forças, sendo de 2000 N a força motora, 400 N a força devida a atritos (com o solo e o ar, juntos) e 8000 N, o seu peso. Faça um desenho esquemático e represente todas as forças. A que se deve e qual o valor da quarta força? Calcule a aceleração do automóvel.
4. Um automóvel de massa 1200 kg, partindo do repouso, adquire em 10 s a velocidade de 63 km/h. Calcule a força desenvolvida pelo motor, supondo-a constante. Despreze os atritos.
5. O carroceiro ordena (com uma vara) que o burro puxe a carroça. Ele nem se mexe, como que dizendo:

“– Não adianta. Se eu fizer uma força na carroça, ela fará em mim uma força diretamente oposta. A resultante será nula, e eu não conseguirei puxá-la.”

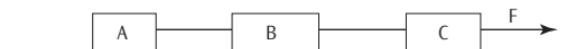
O “argumento do burro” está correto? Justifique sua resposta.

6. A resultante das forças que atuam sobre um corpo é nula. Você pode afirmar que ele está parado? Por quê?
7. (Unesp) Um corpo, sujeito exclusivamente à ação de uma força constante e de intensidade igual a 24 N, tem sua velocidade escalar variada de 4 m/s para 10 m/s, após um percurso de 7 m em trajetória retilínea. Qual a massa deste corpo?
8. Considere o mesmo caminhão, com a mesma velocidade e a mesma força aplicada pelo sistema de freios. Em que condições ele percorre uma distância maior durante a frenagem: carregado ou descarregado? Explique.
9. Um corpo está sobre um plano horizontal sem atrito. Qual a menor força capaz de deslocá-lo? Explique.
10. (Fatec-SP) Dadas as afirmações:  
I - Um corpo pode permanecer em repouso quando solicitado por forças externas.  
II - O efeito final da força de ação exercida por um agente externo a um corpo é anulado pela reação do corpo a esse agente externo.  
III - A força aplicada sobre um corpo, pela Segunda Lei de Newton, é o produto de sua massa pela aceleração que o corpo possui.  
É (são) correta(s):  
a) I e II      b) I e III      c) II e III      d) I      e) todas
11. (UFMG) Um corpo de massa  $m$  está sujeito à ação de uma força  $F$  que o desloca segundo um eixo vertical em sentido contrário ao da gravidade. Se o corpo se move com velocidade constante é porque:  
a) A força  $F$  é maior que a da gravidade.  
b) A força  $F$  é menor que a da gravidade.  
c) A força resultante sobre o corpo é nula.  
d) A diferença entre os módulos das duas forças é diferente de zero.

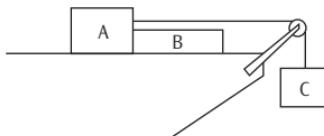
- e) A afirmação da questão está errada, pois qualquer que seja F o corpo está acelerado porque sempre existe aceleração da gravidade.
12. Os blocos A, B e C da figura a seguir têm massas de 1 kg, 2 kg e 3 kg, respectivamente, e estão apoiados sobre um plano horizontal perfeitamente polido. Uma força  $F$  horizontal de 30 N é aplicada sobre o bloco A, conforme a ilustração. Calcule a aceleração do conjunto e a força que cada um dos blocos exerce sobre o outro.



13. Os blocos A, B e C da figura a seguir têm massas de 1 kg, 2 kg e 3 kg, respectivamente. Os fios que ligam os corpos são ideais, e a força  $F$  horizontal aplicada ao corpo C vale 30 N. Considerando o atrito desprezível, determine a aceleração do conjunto e a tração em cada fio.

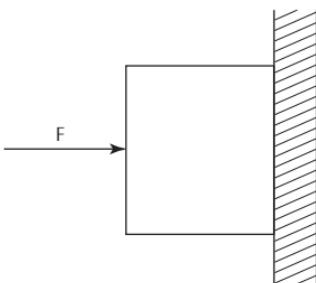


14. Os blocos A, B e C da figura têm massas de 1 kg, 3 kg e 1 kg, respectivamente. Desprezando eventuais atritos, determine a tração no fio e a força trocada entre A e B.



15. Imagine que um astronauta está fazendo um conserto em sua nave “estacionada” num lugar do espaço onde não existe gravidade. Como ele não consegue fazer o conserto, fica nervoso e atira, com toda sua força, a caixa de ferramentas “para baixo”. O que acontecerá com o astronauta? Por quê?

16. Um paraquedista e seu paraquedas sofrem a força de atração gravitacional exercida pela Terra. Quando essa força for maior que a resistência do ar que se opõe ao movimento, o que acontece com sua velocidade? E quando essas forças forem iguais?
17. Um objeto de massa 10 kg está sobre uma balança graduada em newtons, dentro de um elevador. Determine a leitura da balança se o elevador:
- Subir acelerado de  $2,0 \text{ m/s}^2$ .
  - Descer acelerado de  $2,0 \text{ m/s}^2$ .
  - Estiver em queda livre.
18. Um bloco de 2 kg é pressionado contra uma parede, como mostra a figura a seguir. O coeficiente de atrito estático entre esses corpos vale 0,5 e o cinético vale 0,3. Determine a mínima força  $F$  que deve ser aplicada para que ele não deslize.



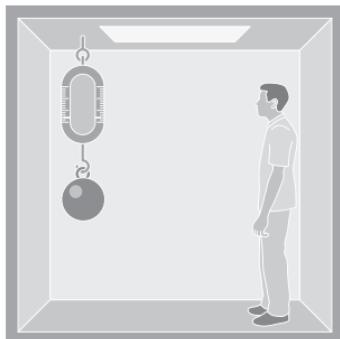
19. (Fuvest-1995) O motor de um foguete de massa  $m$  é acionado em um instante em que ele se encontra em repouso sob a ação da gravidade (constante). O motor exerce uma força constante perpendicular à força exercida pela gravidade. Desprezando-se a resistência do ar e a variação da massa do foguete, podemos afirmar que, no movimento subsequente, a velocidade do foguete mantém:
- Módulo nulo.
  - Módulo constante e direção constante.
  - Módulo constante e direção variável.
  - Módulo variável e direção constante.
  - Módulo variável e direção variável.

A explicação que se segue refere-se às questões 20 e 21.

O peso do bloco de ferro suspenso na extremidade do dinamômetro é 1,6 N, mas o dinamômetro marca 2 N.

**20.** O elevador pode estar:

- a) Subindo com velocidade constante.
- b) Em repouso.
- c) Subindo e aumentando a velocidade.
- d) Descendo com velocidade constante.
- e) Descendo e aumentando a velocidade.



Eduardo Borges

**21.** Na questão anterior, o módulo da aceleração do elevador poderia ser aproximadamente:

- a) Zero.
- b)  $2,5 \text{ m/s}^2$
- c)  $5,0 \text{ m/s}^2$
- d)  $10,0 \text{ m/s}^2$
- e) nra.

## Descomplicando a Física

Numa cena de um filme, a personagem puxa a toalha da mesa de um restaurante sem derrubar copos, pratos ou talheres. Isto é possível? Qual a condição para que isso ocorra? Explique.

É possível desde que se puxe a toalha com uma aceleração  $a > \mu_{\text{e}} g$ . Para que os objetos se movam, sobre eles deve atuar uma força no sentido de movimento da toalha – a força de atrito estático entre os objetos e a toalha.

Bem entendido, os objetos acompanham o movimento da toalha até que a força de atrito estático máxima seja superada. A partir do mo-

Continua...

mento em que a força de atrito estático máxima é superada, os objetos escorregam da toalha, “ficando para trás sobre a mesa”.

A força de atrito estático máxima ( $f_{E\max}$ ) pode ser expressa:  $f_{E\max} = \mu_e \cdot N$ . Considerando, para cada corpo sobre a toalha,  $N = P = mg$ , surge:

$$f_{E\max} = \mu_e \cdot m \cdot g \quad m \cdot a = \mu_e \cdot m \cdot g \quad a = \mu_e \cdot g,$$

condição limite para que os corpos não deslizem sobre a toalha. Portanto, para o efeito desejado é necessário que  $a > \mu_e \cdot g$ .

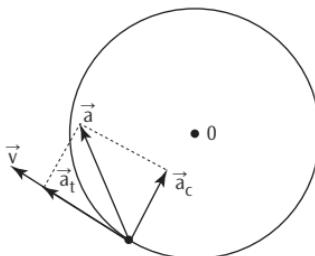
# 8

# Movimento circular

Como velocidade é uma grandeza vetorial, a análise de um movimento circular implica perceber a alteração da velocidade, que pode ocorrer tanto em módulo como em direção. Assim, todo corpo em movimento circular é provido de uma aceleração, podendo esta ter duas componentes:

$a_c$  – aceleração centrípeta: indica a variação da direção da velocidade ao longo do tempo;

$a_t$  – aceleração tangencial: indica a variação do módulo de velocidade ao longo do tempo.



Movimento uniforme acelerado

Assim, podemos afirmar que a aceleração em um movimento circular é a soma vetorial da componente centrípeta da aceleração com a componente tangencial, que pode ser determinada da seguinte forma:

$$\vec{a} = \vec{a}_c + \vec{a}_t \quad (I)$$

A componente centrípeta da aceleração está sempre dirigida para o centro da circunferência descrita pelo corpo, e a componente tangencial muda de direção a todo instante, sendo sempre tangente à trajetória descrita pelo corpo.

Um corpo que executa um movimento circular descreve, em um determinado intervalo de tempo  $\Delta t$ , um ângulo  $\Delta\varphi$  relativo ao seu deslocamento angular. Podemos, então, definir uma velocidade angular média  $\omega_m$ , por meio da relação:

$$\omega_m = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} , \text{ (II)}$$

onde  $\omega_m$  é expresso em rad/s.

## Movimento circular uniforme

Diz-se que um ponto material está em movimento circular uniforme (MCU) quando sua velocidade angular é constante. Neste caso, a velocidade angular média é igual à velocidade instantânea:

$$\omega_m = \omega$$

Ao executar um MCU, a partícula descreve uma circunferência de raio  $R$ , desenvolvendo uma velocidade angular  $\omega$  que, por sua vez, está relacionada a uma velocidade vetorial de módulo  $v$  através da relação:

$$\omega = \frac{v}{R} \quad \text{(III)}$$

Essa relação mostra que o módulo da velocidade ( $v$ ) de um corpo em MCU é constante. A direção e o sentido do vetor velocidade, no entanto, variam de ponto para ponto. O vetor velocidade é sempre tangente à trajetória tal como a aceleração tangencial. Assim sendo, pode-se concluir que em uma partícula em MCU existe apenas a componente centrípeta da aceleração; a componente tangencial é igual a zero.

No MCU, define-se período ( $T$ ) como o intervalo de tempo necessário para que o corpo execute uma volta completa. Desta definição, podemos perceber que a velocidade angular relaciona-se com o período por meio da expressão:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{(IV)}$$

Sendo frequência ( $f$ ) o número de rotações que um corpo promove por unidade de tempo, temos:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{(V)}$$

e

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{VI})$$

No SI, o período ( $T$ ) é dado em segundos, e a frequência ( $f$ ), em hertz (Hz).

## Nota

1 Hz = 1 rps (rotações por segundo); 1 Hz = 60 rpm (rotações por minuto).

## Exemplos

1. Um ponto material executa um movimento circular uniforme cuja trajetória tem 6 m de raio com velocidade de módulo 3 m/s. Determine:
  - Sua velocidade angular.
  - O ângulo, em graus, que descreve em 5 s.

## Resolução

a)  $v = \omega \cdot r$

$$3 = \omega \cdot 6$$

$$\omega = 0,50 \text{ rad/s}$$

b)  $\omega_m = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

$$0,50 = \frac{\Delta\varphi}{5}$$

$$\Delta\varphi = 2,5 \text{ rad}$$

Transformando em graus:

$$\Delta\varphi = 2,5 \text{ rad} = 2,5 \cdot (180^\circ/\pi)$$

$$\Delta\varphi = 140^\circ$$

2. Uma polia está ligada a um motor que efetua 3000 rpm. Determine a frequência em Hz e o período do movimento.

### Resolução

A polia descreve 3000 rotações por minuto, o que equivale a:

$$f = \frac{3000}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Como a frequência é o inverso do período, temos:

$$T = \frac{1}{f}$$

$$T = 1/50$$

$$T = 0,02 \text{ s}$$

3. Em um relógio, qual é a velocidade angular do ponteiro dos segundos?

### Resolução

O período do ponteiro dos segundos é  $T = 60 \text{ s}$ . Então:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{60}$$

$$\omega = \frac{\pi}{30} \text{ rad/s} = 0,15 \text{ rad/s}$$



## Helicóptero

Por que o helicóptero não gira com o movimento de rotação da hélice?

O helicóptero tem o início de sua história na época do renascimento, com Leonardo da Vinci, mas somente no século XX seu projeto operacional teve lugar.

O primeiro modelo, de 1907, assim que decolava, começava a girar em sentido contrário ao da hélice, desgovernando-se.

A solução encontrada, e que é utilizada atualmente, foi a de instalar na cauda do helicóptero uma segunda hélice, a fim de compensar o movimento de rotação, estabilizando o aparelho.

Fonte: GREF. *Leituras de Física. Mecânica.V.1..* São Paulo: Edusp.

## Transmissão de movimento

Comumente, sistemas mecânicos possuem mecanismos de transmissões de movimento como motores, caixas de câmbio e vários outros tipos de máquinas. Essas transmissões podem ser feitas por contato pelo uso de engrenagens ou por correias interligando polias.

Em ambas as situações, os pontos na periferia das rodas (polias ou engrenagens) têm a mesma velocidade escalar. Sendo  $R_A$  e  $R_B$  os raios das rodas A e B, e  $\omega_A$  e  $\omega_B$  suas velocidades angulares, respectivamente, podemos estabelecer as seguintes relações:

$$\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{R_B}{R_A}$$

Pela relação (VI), temos que:

$$\frac{f_A}{f_B} = \frac{R_B}{R_A}$$

## Exemplo

Duas polias de raios  $r_1$  e  $r_2$  giram acopladas por uma correia que não desliza. Se a polia menor tem raio  $r_1 = 10$  cm e frequência  $f_1 = 2400$  Hz, qual deve ser a frequência de rotação da polia maior, considerando que seu raio é de 40 cm?

## Resolução

$$\frac{2400}{f_2} = \frac{40}{10}$$

$$40 \cdot f_2 = 2400 \cdot 10$$

$$f_2 = 600 \text{ Hz}$$

## Aceleração centrípeta e força centrípeta

Se a velocidade vetorial de um corpo varia, necessariamente há uma aceleração. Como no MCU o módulo do vetor velocidade  $\vec{v}$  é constante, temos:

$$\vec{a} = \vec{a}_c,$$

onde a componente centrípeta,  $a_c$ , pode ser expressa por:

$$a_c = \frac{v^2}{R}$$

e, em função da velocidade angular, temos:

$$a_c = \omega^2 \cdot R$$

A Segunda Lei de Newton estabelece que força resultante e aceleração possuem relação causa-efeito. Então:

$$F = m \cdot a$$

$$F_c = m \cdot a_c$$

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{R},$$

onde  $F_c$  é denominada força centrípeta. A força centrípeta é apenas a denominação particular da força resultante que atua sobre um corpo em MCU; não é um novo tipo de força.

### TESTE SEU SABER

1. Analise as afirmativas a seguir, assinalando (V) se for verdadeira e (F) se for falsa. Justifique as falsas:
  - ( ) Em movimento uniforme, a aceleração é sempre nula.
  - ( ) Em MCU, a velocidade escalar é constante.
  - ( ) No movimento circular uniforme, a velocidade vetorial e a aceleração centrípeta são constantes.
  - ( ) Em movimento circular uniformemente variado, a aceleração tangencial é constante.
  - ( ) Se o módulo da aceleração tangencial é  $4 \text{ m/s}^2$  e o módulo da aceleração centrípeta é  $3 \text{ m/s}^2$ , o módulo da aceleração vetorial vale  $7 \text{ m/s}^2$ .
2. Um automóvel corre a  $72 \text{ km/h}$ . Suas rodas têm  $60 \text{ cm}$  de diâmetro. Quantas rotações por minuto elas executam?
3. Um ponto material percorre uma trajetória circular de raio  $6 \text{ m}$ , obedecendo a função horária das velocidades:
$$v = 2 + 8t \text{ (SI). Para } t = 0,5 \text{ s, determine:}$$
  - O módulo da velocidade vetorial.
  - O módulo da aceleração tangencial.
  - O módulo da aceleração centrípeta.
  - O módulo da aceleração resultante.
4. Um corpo em movimento circular uniforme completa  $20$  voltas em  $10 \text{ s}$ . Determine o período e a frequência do movimento.

5. Um satélite artificial descreve uma órbita circular a 1600 km da superfície da Terra, efetuando uma revolução a cada 2 h. Determine o módulo da velocidade do satélite, sabendo que o raio da Terra tem 6400 km.
6. Uma polia de 10 cm de raio gira com frequência 1800 rpm. Determine:  
a) A frequência da polia em hertz e o seu período em segundos.  
b) A sua velocidade angular.  
c) A velocidade de um ponto da periferia da polia.
7. Um projétil com velocidade constante de 400 m/s atravessa diametralmente um globo de papelão de 10 cm de raio que gira em torno de seu eixo vertical. Qual deve ser a menor frequência de rotação do globo para que o projétil possa atravessá-lo fazendo um único furo?
8. Duas polias A e B, de raios respectivamente iguais a 28 cm e 40 cm, estão ligadas por uma correia inextensível. A polia A executa 600 rpm. Determine a velocidade escalar de um ponto da correia e as velocidades angulares das polias.
9. A fachada de uma loja tem um relógio cujo ponteiro dos segundos mede 2 m de comprimento. A velocidade da extremidade desse ponteiro, em m/s, é de aproximadamente:  
a) 0,1      b) 0,2      c) 0,5      d) 1      e) 5
10. (Vunesp-SP) Um farol marítimo projeta um facho de luz contínuo, enquanto gira em torno do seu eixo à razão de 10 rpm. Um navio, com costado perpendicular ao facho, está parado a 6,0 km do farol. Com que velocidade um raio luminoso varre o costado do navio?  
a) 60 m/s      b) 60 km/s      c) 6,3 km/s      d) 630 m/s      e) 1,0 km/s

### Descomplicando a Física

(ITA-2001) Em um farol de sinalização, o feixe de luz acoplado a um mecanismo rotativo realiza uma volta completa a cada  $T$  segundos. O farol se encontra a uma distância  $R$  do centro de uma praia de comprimento  $2L$ , conforme a figura. O tempo necessário para o feixe de luz “varrer” a praia, em cada volta, é:

Continua...

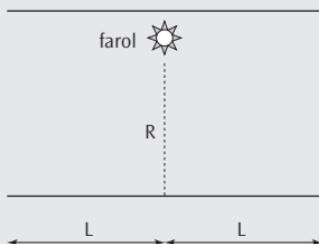
a)  $\frac{T}{2\pi} \cdot \arctg\left(\frac{L}{R}\right)$

b)  $\frac{T}{2\pi} \cdot \arctg\left(\frac{2L}{R}\right)$

c)  $\frac{T}{\pi} \cdot \arctg\left(\frac{L}{R}\right)$

d)  $\frac{T}{2\pi} \cdot \arctg\left(\frac{L}{2R}\right)$

e)  $\frac{2T}{\pi} \cdot \arctg\left(\frac{L}{R}\right)$

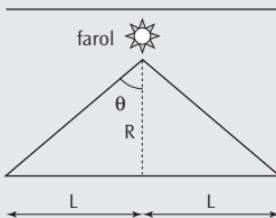


Resposta correta: Alternativa C.

Para varrer toda a praia, o farol deve descrever um arco de ângulo  $20^\circ$ , tal que

$$\operatorname{tg} \theta = (L/R) \text{ ou } \theta = \arctg (L/R).$$

Sendo  $\omega = 2\pi/T$  o tempo necessário para o farol varrer toda a praia é

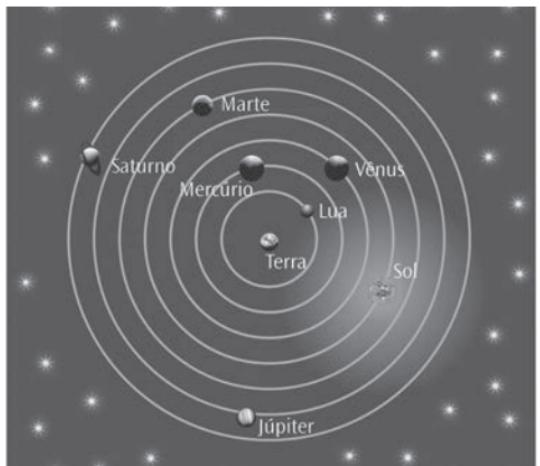


$$t = \frac{20}{\omega} = \frac{2 \cdot \arctg(L/R)}{2\pi/T} = \frac{2 \cdot \arctg(L/R) \cdot T}{2\pi}$$

$$t = \frac{T}{\pi} \cdot \arctg(L/R).$$

Quando olhamos o firmamento, notamos que o Sol, a Lua e as estrelas parecem atravessá-lo de leste a oeste em órbitas circulares, em torno da Terra.

A ideia de que a Terra está no centro do universo remonta à Grécia Clássica. Aristóteles (384-322 a.C.) e Platão (427-347 a.C.) admitiram o modelo geocêntrico.



Eduardo Borges

Aristarco de Samos (280 a.C.) propôs a ideia revolucionária de um universo centrado no Sol, e não na Terra. Pela ideia de que a Terra girava sobre seu eixo em torno do Sol, foi acusado de perturbar o descanso dos deuses.

Eratóstenes (250 a.C.) determinou o raio da Terra. Observou que em um dia do solstício de verão, ao meio-dia, o Sol estava na vertical da cidade de Siena (hoje Assuã, Egito) projetando-se no fundo de um poço. No mesmo momento, em Alexandria, situada

800 km ao norte de Siena, observava-se uma sombra projetada por uma haste (gnômon) que definia um ângulo de aproximadamente  $7^\circ$ . Por esse método obteve o valor de 6400 km para o raio da Terra, com um erro menor que 1%.

## Descomplicando a Física

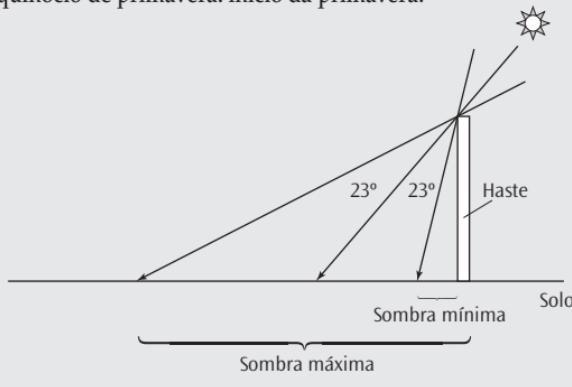
Equinócio: duração igual do dia e da noite.

Solstício de verão: instante em que a sombra de um gnômon é mínima – define o início do verão.

Equinócio de outono: início do outono.

Solstício de inverno: instante em que a sombra é máxima – define o início do inverno.

Equinócio de primavera: início da primavera.

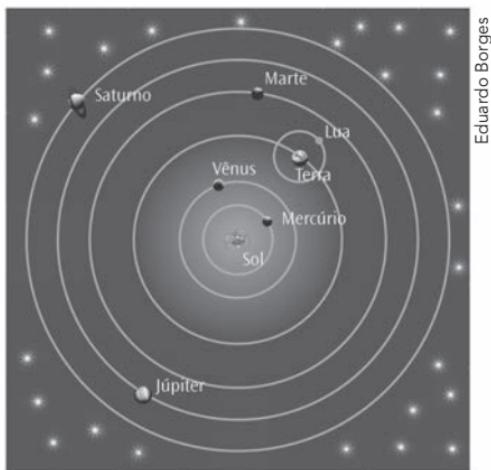


Hiparco (150 a.C.) preparou o primeiro catálogo de estrelas (cerca de 800, classificando-as segundo seus brilhos), estudou a duração das estações do ano e calculou a distância da Terra à Lua com os eclipses.

Também foram adeptos do modelo geocêntrico, Ptolomeu (127-151 d.C.) e Tycho Brahe (1546-1601), este último, um astrônomo dinamarquês que dedicou sua vida à observação do céu.

Ptolomeu, em sua obra *O Almagesto*, descreve de maneira bastante completa um modelo de Sistema Solar.

A visão heliocêntrica do universo (res)surge com Copérnico (1473-1543), em 1543, com o Sol no centro do sistema. A primeira comprovação de que a Terra não era o centro de todos os movimentos celeste coube a Galileu Galilei (1564-1642), que, com o auxílio de lunetas, observou que quatro astros descreviam órbitas em torno de Júpiter, e não da Terra.

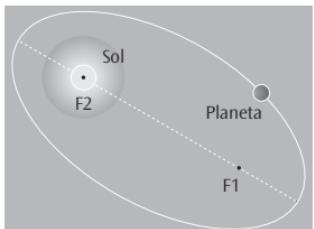


Além de Copérnico e Galileu, Kepler (1571-1630), Newton (1642-1727) e vários outros estudiosos defenderam o modelo heliocêntrico. Galileu e Copérnico admitiam o movimento circular para os planetas, enquanto Kepler e Newton afirmavam que as órbitas dos planetas eram elípticas, e não propriamente circulares.

## Leis de Kepler

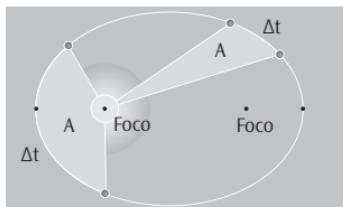
Kepler, analisando durante anos os dados compilados por Tycho Brahe, elaborou três leis relativas às órbitas dos planetas, contrariando a ideia de órbita circular.

Primeira lei: um planeta se move descrevendo uma órbita elíptica ao redor do Sol, com o Sol situado em um dos focos da elipse.



Eduardo Borges

Segunda lei: a linha que liga o Sol ao planeta (raio-vetor) varre áreas iguais em intervalos de tempos iguais.

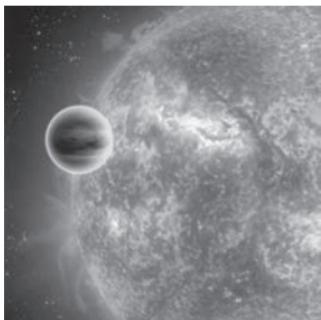


Eduardo Borges

Terceira lei: a razão entre o quadrado do período (T) de movimento de um planeta (tempo que um planeta leva para dar uma volta completa) em torno do Sol e o cubo do raio médio (R) de sua órbita é constante.

$$\frac{T^2}{R^3} = K \quad \text{com } K = \text{constante}$$

É possível ainda demonstrar que, admitindo que um planeta (ou satélite) execute um movimento circular com velocidade escalar constante em torno do Sol (ou de



NASA

outro centro massivo) de massa  $M$ , o valor de  $K$  pode ser calculado pela expressão:

$$K = \frac{4\pi^2}{GM}$$

e também sua velocidade orbital ( $v$ ):

$$v = \sqrt{(GM)/R}$$

Observe que a massa do planeta (ou satélite) em órbita não influiu na velocidade orbital; ela depende apenas do raio da órbita ( $R$ ) e da massa do Sol (ou do centro massivo em questão).

### Exemplo

O raio médio da órbita da Terra é  $1,5 \times 10^{11}$  m; o da órbita de Urano é  $2,9 \times 10^{12}$  m. Qual o período de revolução de Urano em anos terrestres?

### Resolução

Pela terceira lei de Kepler, surge:

$$\frac{T^2}{R^3} = K \quad \text{com } K = \text{constante}$$

Como ambos os planetas giram ao redor do mesmo centro, podemos escrever:

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{T_U^2}{R_U^3}$$

$$T_U^2 \cdot (1,5 \times 10^{11})^3 = 1 \cdot (2,9 \times 10^{12})^3$$

$$T_U = 85 \text{ anos terrestres}$$

## Sistema solar e características dos astros

Astro	Distância média ao Sol (km)	Período de rotação em torno do próprio eixo (unidades terrestres)	Período de translação em torno do Sol (duração do ano – unidades terrestres)	Raio médio (km)	Massa em relação à Terra
Mercúrio	$5,80 \times 10^7$	59 dias	88 dias	$2,43 \times 10^3$	0,05
Vênus	$1,08 \times 10^8$	249 dias	224,7 dias	$6,06 \times 10^3$	0,81
Terra	$1,50 \times 10^8$	23,9 horas	365,25 dias	$6,37 \times 10^3$	1,00
Marte	$2,28 \times 10^8$	24,6 horas	687 dias	$3,37 \times 10^3$	0,11
Júpiter	$7,78 \times 10^8$	19,8 horas	11,9 anos	$6,99 \times 10^4$	317,80
Saturno	$1,43 \times 10^9$	10,2 horas	29,5 anos	$5,85 \times 10^4$	95,20
Urano	$2,87 \times 10^9$	10,8 horas	84,0 anos	$2,33 \times 10^4$	14,50
Netuno	$4,50 \times 10^9$	15 horas	164,8 anos	$2,21 \times 10^4$	17,20
Plutão	$5,91 \times 10^9$	6,4 dias	248,4 anos	$1,5 \times 10^3$	0,08

### Nota

Define-se uma unidade astronômica (1 UA) como sendo a distância média do Sol à Terra ( $1 \text{ UA} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ ).

## Lei da Gravitação Universal

As leis de Kepler descrevem com precisão o movimento dos planetas, mas não fornecem explicação sobre a causa desses movimentos. Coube a Isaac Newton estabelecer a base teórica que deu origem à Lei da Gravitação Universal:

Matéria atrai matéria, na razão direta do produto de suas massas e na razão inversa do quadrado da distância entre as massas.

$$F_g = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

Onde:  $F$  é a força com que uma partícula atrai a outra;

$m_1$  e  $m_2$  são as massas de cada uma das partículas;

$d$  é a distância entre elas; e

$G$  é uma constante, denominada constante da gravitação universal.

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \text{ (SI)}$$

A constante  $G$  não deve ser confundida com a aceleração da gravidade,  $g$ . Como já foi dito, o peso de um corpo de massa  $m$  é uma força de caráter gravitacional e, desta forma, em um planeta de massa  $M$  e raio  $r$ , podemos escrever:

$$P = F_g \rightarrow mg = \frac{GMm}{r^2} \rightarrow g = \frac{GM}{r^2}$$

A expressão descrita associa o módulo da gravidade na superfície do planeta ao próprio planeta.

A uma altura  $h$  em relação à superfície do planeta, temos:

$$g = \frac{GM}{(r+h)^2}$$

Também não podemos esquecer que as forças de atração entre dois corpos constituem o par ação e reação.

### Exemplo

Calcule o módulo da força de atração gravitacional entre dois corpos de massa 1 kg cada, separados pela distância de 1 m.

## Resolução

$$F_g = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

$$F_g = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,0 \cdot 1,0}{(1,0)^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} N$$

## Um pouco de História

O assunto de gravitação, em Física, é de suma importância para percebermos as relações de causa-efeito em temas aparentemente distantes. É interessante notar como, ao longo dos séculos, os eventos astronômicos, a ideia de tempo e as concepções religiosas estão intimamente ligados.

### *A era cristã*

Quando do nascimento de Jesus Cristo, não houve quem propusesse ou se lembrasse de começar a contar o ano a partir desse evento. Nem mesmo com a sua morte.

Mais tarde, em Alexandria, subiu ao trono o imperador Diocleciano. Convencionou-se contar os anos, segundo o calendário Juliano, a partir da data de sua ascensão, dando início à era Diocleciana.

No ano de 242 da era Diocleciana, o abade romano Dionísio, O Pequeno, estava encarregado de preparar tabelas nas quais se apresentavam as datas das Páscoas seguintes, usando a era Diocleciana. O abade sugeriu que se deveria contar os anos segundo a era Cristã, já que o nascimento de Jesus era uma data de suma importância para o mundo religioso ocidental. Segundo cálculos, Dionísio fixou que o ano 248 da era Diocleciana correspondia ao ano 525 após o nascimento de Jesus.

O ano iniciava-se em 25 de dezembro e o ano do nascimento de Jesus passou a se chamar ano 1 da era Cristã. Anos anteriores a essa data eram ditos “antes de Cristo”. Não existia o ano zero. Utilizava-se o ano Juliano com o padrão.

Continua...

Além de 25 de dezembro, em diversas localidades, outras datas foram usadas para definir o início do ano. Eram denominadas Estilos.

Estilo da Natividade: 25 de dezembro.

Estilo da Circuncisão: 1º de janeiro.

Estilo Veneziano: 1º de março.

Estilo da Anunciação: 25 de março.

O Estilo da Circuncisão foi finalmente adotado, pois coincidia, a partir de 153 a.C., com o começo do ano oficial romano, definido pelo inicio anual dos trabalhos de magistratura.

Fonte: Boczko, Roberto. *Conceitos de Astronomia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

## A Páscoa



Salão Sistina do Vaticano, Roma

O Concílio de Nicea

O Concílio de Nicea, em 325 d.C., fixou a data da Páscoa como sendo “o primeiro domingo após a primeira Lua Cheia que ocorre após ou no equinócio da primavera boreal (hemisfério norte), adotado como sendo 21 de março”.

O ano Juliano (365,25 dias) era 0,007801 dias mais longo que o ano solar (365,242199 dias). Isso significa que, após cerca de 125 anos, o verdadeiro início da primavera se dá a 20 de março, e não 21, como fora definido. Desde o Concílio de Nicea até 1582, quando reinava o Papa Gregório XIII, haviam passados 1527 anos; se a cada 125 anos a primavera real se iniciava 1 dia antes do dia definido eclesiasticamente,

Continua...

em 1527 anos houve um retrocesso de 10 dias do equinócio real em relação ao equinócio eclesiástico.

Esta defasagem tinha implicações religiosas: o período entre a Quarta-feira de Cinzas e a Páscoa era um período de abstinência, no qual comer carne era uma heresia. Estava-se, portanto, comendo carne num período em que, rigorosamente, seria proibido. Para corrigir tal “pecado”, a Igreja resolveu reformular o calendário.

No pontificado de Gregório XIII, sob a orientação do astrônomo Lélio, em 1582, a Reforma Gregoriana estabeleceu:

- omissão de 10 dias na contagem do mês de outubro de 1582, de modo que à quinta-feira, dia 04, seguisse a sexta-feira, dia 15;
- os anos da era cristã múltiplos de 100 deixariam de ser bissextos, exceto quando fossem também múltiplos de 400;
- a adoção de uma regra extra ao fixar da Páscoa, de modo que ela nunca ocorresse antes de 22 de março e nunca após 25 de abril.

*A Páscoa ocorre no primeiro domingo após a Lua Cheia Eclesiástica que acontece após ou no Equinócio da Primavera Eclesiástica (21 de março); caso o dia assim definido esteja além de 25 de abril, a Páscoa incide no domingo anterior; caso a Lua Cheia Eclesiástica ocorra no dia 21 de março e esse dia seja domingo, a Páscoa será no dia 25 de abril.*

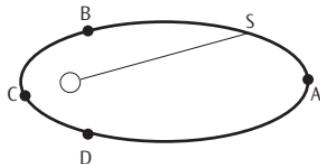
Todas as outras festas religiosas móveis do Calendário Eclesiástico Cristão são definidas tomando-se por base a data da Páscoa:

Septuagésima	63 dias antes da Páscoa
Quarta-feira de Cinzas	46 dias antes da Páscoa
Domingo de Ramos	07 dias antes da Páscoa
Paixão de Cristo	02 dias antes da Páscoa
Domingo do Espírito Santo	49 dias após da Páscoa
Santíssima Trindade	56 dias após da Páscoa
Corpo de Cristo	60 dias após da Páscoa

fonte: Boczko, Roberto. *Conceitos de Astronomia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

## TESTE SEU SABER

1. Ao estudarmos o movimento dos planetas em torno do Sol, pudemos verificar que:
  - a) Todas as órbitas são elípticas.
  - b) Os planetas têm raios e períodos proporcionais.
  - c) Os movimentos dos planetas são periódicos.
  - d) A Terra tem um período de translação de 1 ano terrestre.
  - e) Todas estão corretas.
2. Um satélite artificial PAZ se move em órbita circular em torno da Terra em um período de 100 dias. Outro satélite, LUZ, possui órbita circular de raio 16 vezes maior que a do satélite PAZ. Calcule o período do satélite LUZ.
3. Pretende-se lançar um satélite artificial de massa 1000 kg que irá descrever uma órbita circular a 1600 km de altura. Considerando que o raio médio da Terra e sua massa são, respectivamente, 6400 km e  $6 \times 10^{24}$  kg, calcule:
  - a) O módulo da força de atração entre a Terra e o satélite.
  - b) O módulo da velocidade que deve ser imprimida ao satélite para obter a órbita desejada.
4. O raio médio da órbita de Netuno é, aproximadamente, 30 vezes maior que o raio médio da órbita da Terra. Calcular, em anos terrestres, o período de revolução de Netuno.
5. Se a Lei da Gravitação Universal vale para todos os corpos do Universo, por que não se observa a atração entre os corpos de nossa vida diária? Por que, por exemplo, um lápis não atrai uma borracha?
6. (Unitau-SP) Um satélite artificial S descreve uma órbita elíptica em torno da Terra, sendo que a Terra ocupa um dos focos da elipse, conforme a figura.



Indique a alternativa correta:

- a) A velocidade do satélite é sempre constante.
  - b) A velocidade do satélite cresce à medida que o satélite caminha ao longo da curva ABC.
  - c) A velocidade do satélite no ponto B é máxima.
  - d) A velocidade do satélite no ponto D é mínima.
  - e) A velocidade tangencial do satélite é sempre nula.
7. (Fuvest-SP) No sistema solar, o planeta Saturno tem massa cerca de 100 vezes maior que a da Terra e descreve uma órbita, em torno do Sol, a uma distância média 10 vezes maior que a distância média da Terra ao Sol (valores aproximados). A razão  $(F_{\text{Sat}}/F_{\text{T}})$  entre a força gravitacional com que o Sol atrai Saturno e a força gravitacional com que o Sol atrai a Terra é de aproximadamente:
- a) 1000
  - b) 10
  - c) 1
  - d) 0,1
  - e) 0,001
8. O período de translação do planeta Vênus em torno do Sol é menor que o da Terra, assim, pelas Leis de Kepler, temos que:
- a) A massa de Vênus é menor que a da Terra.
  - b) O diâmetro de Vênus é menor que o da Terra.
  - c) Vênus está mais distante do Sol que a Terra.
  - d) O raio da órbita de Vênus é menor que o da Terra.
  - e) O período de rotação de Vênus é menor que o da Terra.
9. Seja  $F$  a força de atração do Sol sobre um planeta. Qual seria a nova força de atração, caso a massa do Sol se tornasse três vezes maior, a do planeta, cinco vezes maior, e a distância entre eles fosse reduzida à metade?
10. O raio médio da órbita da Terra é  $1,5 \times 10^{11}$  m; da órbita de Júpiter é  $7,8 \times 10^{11}$  m. Qual o período de revolução de Júpiter em anos terrestres?
11. Imagine que uma pessoa lhe dissesse que foi descoberto um pequeno planeta com período de 8 anos terrestres e cuja distância ao Sol é de 4 ua (1 ua = distância média do Sol à Terra). Estes dados estão coerentes com as Leis de Kepler?
12. Qual o valor da aceleração da gravidade num ponto A em torno da Terra, a uma altitude igual a 4 vezes o raio terrestre, acima da superfície? (Dado:  $g = 10 \text{ m/s}^2$  na superfície da Terra.)

13. Um homem na Terra pesa 1000 N. Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$  na superfície da Terra. Qual a massa desse homem? Qual o seu peso em Júpiter, sabendo-se que, comparado à Terra, esse planeta tem massa 320 vezes maior e raio 11 vezes maior?
14. (UFPI) Suponha que tenha sido descoberto um novo planeta do Sistema Solar com raio orbital de  $5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ . Sendo  $k = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ s}^2/\text{m}^2$  (valor da constante da terceira lei de Kepler), pode-se afirmar que o período de revolução do novo planeta é de:
- a)  $2 \cdot 10^8 \text{ s}$
  - b)  $2,6 \cdot 10^8 \text{ s}$
  - c)  $1,75 \cdot 10^9 \text{ s}$
  - d)  $2,8 \cdot 10^9 \text{ s}$
  - e)  $4 \cdot 10^9 \text{ s}$
15. (Fuvest-1995) A melhor explicação para o fato de a Lua não cair sobre a Terra é que:
- a) A gravidade da Terra não chega até a Lua.
  - b) A Lua gira em torno da Terra.
  - c) A Terra gira em torno de seu eixo.
  - d) A Lua também é atraída pelo Sol.
  - e) A gravidade da Lua é menor que a da Terra.

## Descomplicando a Física

### Medidas de tempo

Classicamente, o tempo é expresso em anos, dias, horas etc. O SI estabelece como padrão o *segundo* como sendo: “1 segundo é o tempo decorrido para que ocorram 9192631770 ciclos de transição entre os níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de Césio 133”. É o tempo atômico.

Em Astronomia, no entanto, esta medida é pouco prática. Para se determinar a posição de um astro no céu, outras formas de medir o tempo devem ser consideradas.

*Tempo das Efemérides:* é baseado no movimento orbital dos corpos do sistema solar, mais exatamente da Terra ao redor do Sol. A unidade

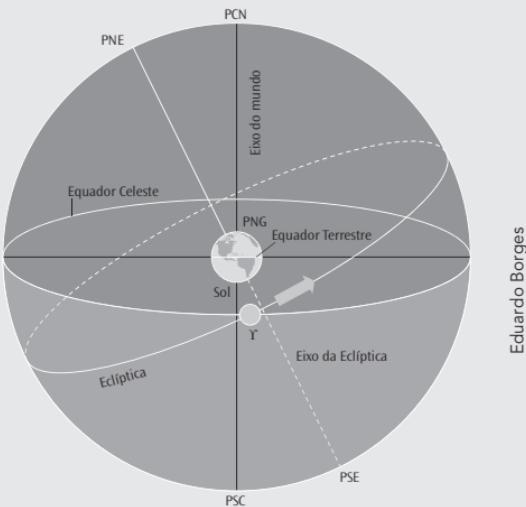
Continua...

fundamental é o segundo das efemérides (sE), definido como “*a fração 1/31556925,9747 da duração do ano trópico de 1900*”.

O valor do segundo atômico, acima descrito, é tal que coincide com o segundo das efemérides observado entre os anos de 1956 e 1965.

*Tempo Solar:* é baseado no movimento diário aparente do Sol, na alternância entre o dia e a noite. Nesse sistema de medida, temos o *tempo solar verdadeiro* e o *tempo solar médio*. O *dia solar verdadeiro* inicia-se à meia-noite e é definido como “*o intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas do Sol sobre um mesmo meridiano*”.

*Tempo Sideral:* baseado no período de rotação da Terra, com relação às estrelas. O Sol, durante sua trajetória anual aparente, cruza duas vezes a Linha do Equador, uma delas próximo de 21 de março. Esse ponto que representa o cruzamento do plano da eclíptica (a eclíptica é definida como a circunferência imaginária correspondente à trajetória aparente do Sol na esfera celeste) com o Equador terrestre, estando o Sol se deslocando para o hemisfério Norte, é denominado Ponto  $\gamma$  ou Ponto de Áries. Duas passagens sucessivas do Sol pelo Ponto  $\gamma$  definem um *ano*.



O eixo do mundo contém o polo celeste Norte (PCN), o polo Norte geográfico (PNG), bem como o polo Sul geográfico (PSG) e o polo Sul celeste (PSC). O plano do Equador terrestre está contido no plano do Equador celeste.

Continua...

*sideral*. Em função dos movimentos de precessão (movimento como o descrito por um pião) e nutação (movimento de bamboleamento de um pião) do planeta Terra, ocorre um fenômeno denominado *retrogradação do Ponto γ* (o ponto  $\gamma$  move-se no sentido oposto do movimento anual aparente do Sol); o Sol o atinge antes do que o faria se ele estivesse imóvel. Toma-se, então, um Ponto  $\gamma$  médio e, com base neste, se define um *ano trópico*, de forma análoga ao *ano sideral*.

Um ano sideral = 365 dias 06 horas 09 minutos 09,5 segundos.

Um ano trópico = 365 dias 05 horas 48 minutos 46,0 segundos.

Note-se que, da forma como são definidas, medidas de tempo são medidas angulares.

Disponível no site: <<http://www.companhiadoceu.com.br/fckimages/equinocio.jpg>>.

Adaptado de Boczko, Roberto. *Conceitos de Astronomia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

# 10 Trabalho e energia

## Trabalho de uma força constante

O conceito de trabalho está relacionado à transferência de energia de um corpo para outro ou à transformação de energia de uma espécie em outra. De qualquer forma, para a realização de trabalho, em mecânica, há atuação de uma força.

Define-se *trabalho mecânico* como sendo o produto de uma força atuante sobre um corpo pelo deslocamento realizado durante a ação da força.

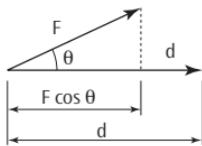
$$\tau = \vec{F} \cdot \vec{d}$$

O trabalho é uma grandeza escalar, embora seja fruto de um produto vetorial. Desta forma, a expressão pode ser reescrita:

$\tau = F \cdot d \cdot \cos \theta$ , sendo  $\theta$  o ângulo descrito entre a força e o deslocamento.

A unidade de trabalho no SI é:

$$\text{N} \cdot \text{m} = \text{joule} = \text{J}$$



## Trabalho de uma força ( $F$ ) durante um deslocamento ( $d$ )

O ângulo entre a força e o deslocamento vai definir o sinal algébrico da grandeza trabalho. Para um ângulo menor que  $90^\circ$ ,

o trabalho realizado será positivo, constituindo o que se denomina *trabalho motor*; para um ângulo de  $90^\circ$ ,  $\cos 90^\circ = 0$ , o trabalho é nulo; para ângulos cujo cosseno é negativo, o trabalho também é negativo, sendo denominado *trabalho resistente*.

### Exemplo

Um homem puxa uma caixa com uma força de 600 N aplicada por meio de uma corda, durante um percurso de 20 m. Considerando que a força atua sobre a caixa segundo um ângulo de  $60^\circ$  com o deslocamento, qual o trabalho realizado pela força?

### Resolução

$$\tau = F \cdot d \cdot \cos \theta$$

$$\tau = 600 \cdot 20 \cdot \cos 60^\circ$$

$$\tau = 600 \cdot 20 \cdot \frac{1}{2}$$

$$\tau = 6000 \text{ J}$$

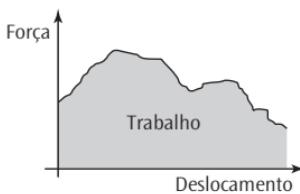
Isso significa que, efetivamente, 6000 J de energia foram transferidos à caixa. Observe que se a mesma força fosse aplicada na direção do deslocamento, pelos mesmos 20 m, teríamos um ângulo de  $0^\circ$  entre a força e o deslocamento e, como consequência,  $\cos 0^\circ = 1$ , e o trabalho realizado seria de 12000 J.

Observe que a expressão proposta aplica-se a situações em que a força é constante durante o deslocamento considerado. Para situações em que a força varia ao longo do deslocamento, o trabalho deve ser calculado de outra forma.

### Trabalho de uma força variável

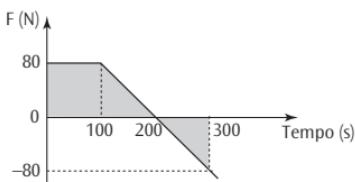
Para estas situações, o cálculo do trabalho é efetuado por método gráfico. Representa-se o comportamento da força

por meio de um gráfico de força em função do deslocamento,  $F \times d$ . A área compreendida entre a curva do gráfico e o eixo horizontal é numericamente igual ao trabalho realizado pela força. O trabalho será positivo se  $F$  e  $d$  tiverem o mesmo sentido e, negativo, se forem de sentidos opostos.



### Exemplo

Considere uma força que atua sobre um corpo, conforme o gráfico a seguir. Calcule o trabalho total exercido pela força no percurso de 0 m a 300 m.



### Resolução

Cálculo das áreas (A):

$$\text{De } 0 \text{ a } 100 \text{ m: } A = 80 \times 100 = 8000$$

$$\text{De } 100 \text{ a } 200 \text{ m: } A = (80 \times 100)/2 = 4000$$

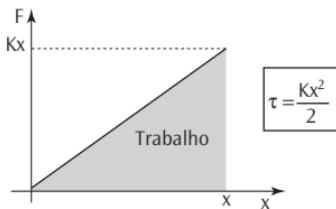
$$\text{De } 200 \text{ a } 300 \text{ m: } A = (80 \times 100)/2 = 4000$$

Note que as duas primeiras áreas calculadas fornecem informações acerca de um trabalho motor, totalizando 12000 J. A terceira área calculada fornece informações acerca de uma situação em que a força se torna negativa, isto é, opera em oposição ao sentido de movimento; neste caso, o trabalho é -4000 J (trabalho resistente). O trabalho total é, então:

$$\tau = 8000 + 4000 - 4000 = 8000 \text{ J}$$

## Trabalho da força elástica

A força elástica é tipicamente uma força variável. O trabalho pode ser calculado por meio da área do gráfico a seguir.



## Potência

Na definição de trabalho de uma força, não são feitas considerações acerca do tempo gasto para realizá-lo. Assim uma mesma tarefa pode ser feita em segundos ou em horas, e em ambos os casos o trabalho será o mesmo. No entanto, algo muda quando dois trabalhos iguais são realizados em tempos distintos. A diferença reside na rapidez com que a energia é desprendida.

A essa propriedade, que relaciona energia desprendida com o tempo gasto para executar um trabalho, denominamos *potência*.

Define-se potência média  $P_m$  de uma força  $F$  como sendo a relação entre o trabalho realizado e o intervalo de tempo gasto para realizá-lo.

$$P_m = \frac{\tau}{\Delta t}$$

No SI, a unidade de potência é watt (W).

$$1W = \frac{1J}{s}$$

Outras unidades de potência e suas correlações:  $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$

$$1 \text{ cv} = 736 \text{ W} \quad (\text{cv: cavalo-vapor})$$

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W} \quad (\text{HP: horse-power})$$

### Exemplo

Calcule a potência média de uma força que realiza um trabalho de  $10 \text{ kJ}$  em  $40 \text{ s}$ .

### Resolução

$$P_m = \frac{\tau}{\Delta t}$$

$$P_m = \frac{10000}{40} = 25W$$

## Potência e velocidade

Associando as expressões de potência média e trabalho, podemos escrever:

$$P_m = \frac{F \cdot d \cdot \cos\theta}{\Delta t}$$

Para simplificar o estudo, consideremos  $\cos\theta = 1$ , e, então, teremos:

$$P_m = F \cdot v_m,$$

onde  $v_m$  representa a velocidade média no percurso e  $v_m = d/\Delta t$ .

Para a velocidade em um intervalo de tempo muito pequeno (tendendo a zero), a potência média se iguala à potência instantânea. Podemos, então, escrever, simplificadamente:

$$P = F \cdot v$$

## Energia

*Energia* é uma propriedade da matéria, isto é, corpos são capazes de armazenar energia. Corpos não são capazes de armazenar trabalho. A energia armazenada em um corpo pode ser transferida a outro ou, eventualmente, uma forma de energia pode ser transformada em outra(s), como, por exemplo, energia elétrica em energia mecânica (motor elétrico). Desta forma, energia está associada ao conceito de trabalho.

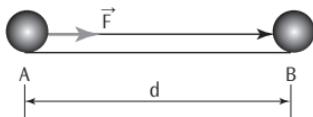
## Energia cinética

A *energia cinética* é a energia relacionada ao movimento de um corpo. Sendo  $m$  a massa do corpo e  $v$  sua velocidade num determinado instante, a energia cinética do corpo pode ser expressa por:

$$E_c = \frac{mv^2}{2}$$

Assim, para cada valor de velocidade de um corpo, está associada uma energia cinética. Para alterar a velocidade de um corpo, é necessária a ação de uma força. Como consequência, o trabalho da força resultante sobre um corpo num determinado deslocamento é igual à variação da energia cinética do corpo durante o deslocamento. Desta forma, considerando uma força resultante durante um deslocamento AB, temos:

$$\tau = E_c^B - E_c^A$$



## Exemplo

Um corpo de massa  $m = 4,0 \text{ kg}$  desloca-se com velocidade inicial de  $10 \text{ m/s}$ , quando, sob a ação de uma força constante, sua velocidade atinge  $50 \text{ m/s}$ .

Determine o trabalho realizado por essa força durante o tempo de sua atuação.

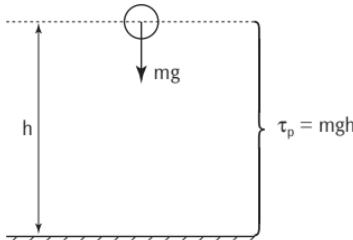
## Resolução

$$\tau = E_c^B - E_c^A$$

$$\tau = \frac{4 \cdot 50^2}{2} - \frac{4 \cdot 10^2}{2} = 4800 \text{ J}$$

## Energia potencial gravitacional

Considere um corpo de massa  $m$  que é abandonado de uma altura  $h$  em relação ao solo. À medida que esse corpo cai, ele vai adquirindo velocidade. Do que foi exposto anteriormente, fica evidente que sua energia cinética vai aumentando até o momento da colisão com o solo. Isto é possível porque imediatamente antes de se iniciar a queda, o corpo possui uma energia armazenada, denominada *energia potencial gravitacional*. À medida que ele cai, a energia potencial vai diminuindo e se transformando em energia cinética. Tanto é verdade, que se quisermos fazer com que ele volte à altura  $h$  inicial, é necessário fornecer-lhe energia, por exemplo, lançando-o de volta.



$$E_p = m \cdot g \cdot h$$



## Usinas hidroelétricas e energia

Grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidroelétricas. A usina hidroelétrica explora uma queda-d'água no leito de um rio aproveitando a energia potencial gravitacional de grandes porções de água em função desse desnível.

A água é acumulada na cabeceira da usina por um dique e é levada por um duto, do nível mais alto para o nível mais baixo do leito do rio. À medida que ela cai, sua energia potencial gravitacional vai diminuindo. Esta energia é convertida em energia cinética, uma vez que na queda, a massa de água vai adquirindo gradativamente velocidade. No percurso, a água move o rotor de uma turbina, o qual efetivamente vai gerar a energia elétrica.

## Energia potencial elástica

Uma mola apresenta um comprimento próprio. Comprimida ou distendida por uma força  $F$ , sofre uma deformação ( $x$ ), onde a relação entre a força e a deformação é dada pela Lei de Hooke:

$$F = k \cdot x$$

O módulo do trabalho realizado para deformar a mola é:

$$\tau = \frac{k \cdot x^2}{2}$$

Ao ser solta, a mola deve voltar ao tamanho original. Desta forma, esse trabalho representa a *energia potencial elástica* armazenada na mola, tomando como referência a mola em sua posição original.

$$E_{el} = \frac{k \cdot x^2}{2}$$

## Exemplo

Uma mola de constante elástica  $k = 4000 \text{ N/m}$  sofre uma deformação de 20 cm. Calcule qual será o valor da energia potencial elástica armazenada por essa mola.

## Resolução

$$E_{el} = \frac{k \cdot x^2}{2}$$

$$E_{el} = \frac{4000 \cdot (0,20)^2}{2} = 80 \text{ J}$$

## Forças conservativas e forças dissipativas

Tomemos como exemplo um corpo de massa 2 kg colocado em um ponto A a 15 m do solo. Sua energia potencial gravitacional pode ser calculada:

$$E_p^A = m \cdot g \cdot h = 2 \cdot 10 \cdot 15 = 300 \text{ J}$$

Se este corpo cair devido à força-peso até um ponto B a 5 m de altura do solo, a energia potencial será:

$$E_p^B = m \cdot g \cdot h = 2 \cdot 10 \cdot 5 = 100 \text{ J}$$

O trabalho realizado pela força-peso pode ser escrito:

$$\tau = E_p^A - E_p^B$$

Imagine que o corpo se deslocasse de A para B ao longo de uma outra trajetória qualquer. Pode-se demonstrar que o trabalho realizado pelo peso do corpo seria o mesmo e, portanto, não depende da trajetória. Existem outras forças que possuem essa mesma propriedade.

As forças cujo trabalho não depende do caminho realizado são denominadas *forças conservativas*. As forças cujo trabalho depende da trajetória, como o atrito, por exemplo, são denominadas *forças dissipativas* ou *não conservativas*.

## Conservação de energia mecânica – Sistemas conservativos

A energia nunca é criada ou destruída, mas transformada de uma espécie em outra ou outras. Imagine um sistema que não troca matéria nem tampouco energia com o meio externo. Assim, para esse tipo de sistema, o total de energia existente antes, durante e após uma transformação não se altera. Dizemos então que o sistema é conservativo (*princípio da conservação de energia*).

A energia mecânica pode ser representada pela soma de três parcelas: a energia cinética, a energia potencial gravitacional e a energia potencial elástica.

Nos *sistemas mecânicos conservativos*, toda diminuição de uma das parcelas de energia corresponde a um aumento de pelo menos uma dentre as outras parcelas de energia.

$$E_m = E_c + E_p + E_{el}$$

Em um sistema conservativo, a energia mecânica é sempre constante.

### Exemplos

1. Um corpo é lançado verticalmente para cima, a partir do solo, com velocidade inicial de 20 m/s. Desprezando eventuais atritos e a resistência do ar, determine a altura máxima atingida pela esfera e a velocidade com que ela atinge, na queda, o solo. (Considere  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .)

## Resolução

No momento do lançamento, a altura  $h = 0$  m em relação ao solo, e toda energia mecânica está armazenada no corpo na forma de energia cinética:

$$E_M = E_c = \frac{m \cdot (20)^2}{2} = 200m \text{ J}$$

À medida que o corpo sobe, a energia cinética vai se convertendo em energia potencial e, como o sistema é conservativo (desprezam-se os atritos), no ponto de altura máxima toda energia mecânica encontra-se armazenada no corpo na forma de energia potencial:

$$E_M = E_p = mgh$$

$$m \cdot g \cdot h = 200 \text{ m J}$$

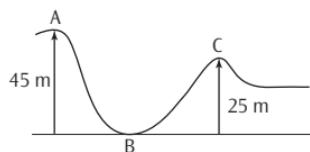
$$g \cdot h = 200, \text{ com } g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$h = 20 \text{ m.}$$

Observe que a altura alcançada não depende da massa do corpo.

Sendo o sistema conservativo, a velocidade do corpo em uma altura  $h$  qualquer na descida será a mesma que na subida. Assim, o corpo atingirá o solo com a mesma velocidade, em módulo, com que foi lançado.

2. Em uma montanha-russa, um carrinho é abandonado de um ponto situado a 45 m de altura em relação ao solo. Calcule a velocidade do carrinho ao passar por um ponto na base da montanha-russa, rente ao solo, e por outro ponto



situado a 25 m de altura em relação ao mesmo solo. Considere o sistema conservativo e  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .

## Resolução

Em A, toda energia se apresenta na forma de energia potencial gravitacional:

$$E_{mA} = E_{pA} = m \cdot g \cdot h = m \cdot 10 \cdot 45 = 450m \text{ J}$$

Em B, toda energia se apresenta na forma de energia cinética:

$$E_{cB} = 450m = m \cdot v^2/2$$

$$v^2 = 900$$

$$|v| = 30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h.}$$

Em C, temos energia cinética e energia potencial gravitacional:

$$E_{mC} = (m \cdot v^2/2) + (m \cdot g \cdot h) = 450m$$

$$(v^2/2) + (g \cdot h) = 450$$

$$(v^2/2) + (10 \cdot 25) = 450$$

$$(v^2/2) = 200$$

$$v^2 = 400$$

$$|v| = 20 \text{ m/s} = 72 \text{ km/h.}$$

## Rendimento

Praticamente toda a diversidade de aparelhos e máquinas que utilizamos em nosso dia a dia promovem transformações de energia. Essas máquinas absorvem energia,  $E_t$  (que está associada a uma certa potência denominada *potência total*,  $P_t$ ), aproveitando parte da energia,  $E_u$  (parcela associada à *potência útil*,  $P_u$ ) e, como a eficiência não é 100%, dissipam a fração restante,  $E_d$  (a diferença

entre as duas parcelas de potência é chamada *potência dissipada*,  $P_d$ ), ou seja, esta última parcela está relacionada com a energia não aproveitada no processo, como calor, som etc.

Pelo princípio da conservação da energia, podemos escrever:

$$P_t = P_u + P_d$$

As respectivas energias podem estar também associadas:

$$E_t = E_u + E_d$$

Como *rendimento* ( $\eta$ ) define-se a relação entre a potência útil e a potência total,

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}$$

$$\eta = \frac{E_u}{E_t}$$

O rendimento é um parâmetro adimensional, sendo  $0 \leq \eta \leq 1$ . Se um sistema é considerado ideal, não há perdas e, neste caso, o rendimento é igual a 1.

## Exemplo

Considere uma máquina que absorve 3000 J de energia a cada 15 s, dissipando 600 J de energia a cada ciclo. Calcule o rendimento da máquina em questão.

## Resolução

A potência total pode ser obtida:

$$P_t = 3000/15 = 200 \text{ W}$$

A potência útil:

$$P_u = 2400/15 = 160 \text{ W}$$

O rendimento será:

$$\eta = P_u/P_t = 160/200 = 0,80$$

$$\eta = 80 \%$$

---

## TESTE SEU SABER

---

1. Um móvel sai do repouso pela ação de uma força de 12 N, constante, que nele atua durante 4 s, em trajetória retilínea e horizontal, sem atrito, e o móvel caminha 20 m. Determine:
  - a) A aceleração adquirida pelo móvel.
  - b) A massa do corpo.
  - c) O trabalho da força nos quatro primeiros segundos.
  - d) A velocidade do corpo após 4 s.
2. Numa casa, a água é retirada de um poço de 12 m de profundidade com o auxílio de um motor elétrico de 1,5 kW. Determine o rendimento do motor se para encher uma caixa de 9000 l decorre um tempo de 1 hora. Considere como 1 kg/l a densidade da água.
3. Um carro recentemente lançado pela indústria brasileira tem aproximadamente 1500 kg e pode acelerar, do repouso até uma velocidade de 108 km/h, em 10 segundos. (Extraído de *Quatro Rodas*, agosto/1992.)  
Adotando 1 cavalo-vapor (cv) = 750 W, qual o trabalho realizado nesta aceleração? Qual a potência média do carro em cv?
4. Um corpo de massa 2 kg e velocidade 5 m/s se choca com uma mola de constante elástica 20000 N/m. O corpo comprime a mola até parar. Determine a energia armazenada pela mola e a variação de comprimento desta.
5. No rótulo de uma lata de leite em pó lê-se “valor energético: 150 kJ por 100 g”. Se toda a energia armazenada em uma lata com 400 g de leite fosse utilizada para levantar um objeto de 10 kg, qual a altura atingida?
6. Uma pessoa arrasta um saco de areia de massa 10 kg a uma distância de 8 m sobre o solo, empregando para tanto uma força horizontal de 90 N.

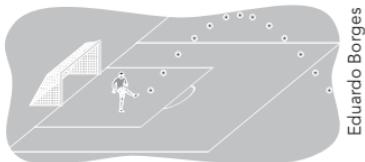
A seguir, ergue o saco a uma altura de 1,5 m para colocá-lo sobre um muro. Calcule o trabalho total realizado pela pessoa.

7. Um poste de madeira, de comprimento 3,2 m e peso 400 N, está disposto horizontalmente. Qual o trabalho desenvolvido para colocá-lo na posição vertical?
8. Um carrinho de 5 kg está se movimentando com velocidade escalar de 10 m/s ao longo de uma superfície plana. Ele está prestes a subir um plano inclinado. Considerando a aceleração da gravidade no local como  $10 \text{ m/s}^2$ , qual a altura máxima que o carrinho pode atingir na rampa, desprezando-se os atritos?
9. Duas lagartixas idênticas estão no teto de uma sala. Elas têm a mesma energia potencial? Explique.
10. Uma montanha-russa tem altura máxima de 30 m. Considerando um carrinho de 200 kg colocado, inicialmente em repouso, no topo da montanha e desprezando os atritos, calcule:
  - a) A energia potencial do carrinho, em relação ao solo, no instante inicial.
  - b) A energia cinética do carrinho no instante em que a altura, em relação ao solo, é de 15 m.
11. Um homem está em repouso com um caixote também em repouso às costas.
  - a) Como o caixote tem um peso, o homem está realizando trabalho.
  - b) O homem está realizando trabalho sobre o caixote pelo fato de estar segurando-o.
  - c) O homem realiza trabalho pelo fato de estar fazendo força.
  - d) O homem não realiza trabalho pelo fato de não estar se deslocando.
  - e) O homem não realiza trabalho pelo fato de o caixote estar sujeito à aceleração da gravidade.
12. Um bueiro levemente inclinado sai de um muro de arrimo na margem de uma estrada. Uma bola lançada por meio da manilha (tubulação) volta com maior velocidade do que tinha ao ser lançada. Se isto lhe acontecesse, você suspeitaria de que:
  - a) A manilha tivesse do outro lado uma inclinação muito alta.
  - b) A manilha tivesse a forma de um L.

- c) Alguém tivesse pegado a bola do outro lado e a arremessado com maior impulso.
- d) Dentro da manilha existe uma mola, não comprimida, com grande constante elástica.
- e) O Princípio da Conservação da Energia não é mais válido.
- 13.** (FEI-SP) Um corpo de massa 5 kg é retirado de um ponto A e levado a um ponto B, distante 40 m na horizontal e 30 m na vertical, traçadas a partir do ponto A. Qual é o módulo do trabalho realizado pela força-peso?
- a) 2500 J      b) 2000 J      c) 900 J      d) 500 J      e) 1500 J
- 14.** (Unitau-SP) Quando um objeto está em queda livre:
- a) Sua energia cinética se conserva.
- b) Sua energia potencial gravitacional se conserva.
- c) Não há mudança de sua energia total.
- d) A energia cinética se transforma em energia potencial.
- e) Nenhum trabalho é realizado sobre o objeto.
- 15.** (UFRS) Para um dado observador, dois objetos A e B, de massas iguais, movem-se com velocidades constantes de 20 km/h e 30 km/h, respectivamente. Para o mesmo observador, qual a razão  $E_a/E_b$  entre as energias cinéticas desses objetos?
- a) 1/3      b) 4/9      c) 2/3      d) 3/2      e) 9/4
- 16.** (Vunesp-SP) Conta-se que Newton teria descoberto a lei da gravitação ao lhe cair uma maçã na cabeça. Suponha que Newton tivesse 1,70 m de altura e se encontrasse em pé, e que a maçã, de massa 0,20 kg, tivesse se soltado, a partir do repouso, de uma altura de 3 m do solo. Admitindo-se  $g = 10 \text{ m/s}^2$  e desprezando-se a resistência do ar, pode-se afirmar que a energia cinética da maçã, ao atingir a cabeça de Newton, seria, em joules, de:
- a) 0,30      b) 0,60      c) 2      d) 2,60      e) 6
- 17.** (Vunesp-SP) Um corpo cai em queda livre, a partir do repouso, sob ação da gravidade. Se sua velocidade, depois de perder uma quantidade E de energia potencial gravitacional, é v, podemos concluir que a massa do corpo é dada por:
- a)  $2Ev$       b)  $(2E)/v^2$       c)  $2Ev^2$       d)  $\sqrt{2Ev}$       e)  $(2v^2)/E$

**18.** (UFSC) Um homem ergue um bloco de 100 newtons a uma altura de 2 metros em 4 segundos com velocidade constante. Qual a potência em watts desenvolvida pelo homem?

**19.** (UFRRJ) Um goleiro chuta uma bola que descreve um arco de parábola, como mostra a figura a seguir.

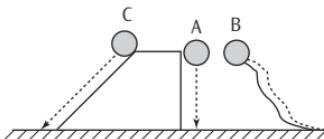


Eduardo Borges

No ponto em que a bola atinge a altura máxima, pode-se afirmar que:

- a) A energia potencial é máxima.
- b) A energia mecânica é nula.
- c) A energia cinética é nula.
- d) A energia cinética é máxima.
- e) Nada se pode afirmar sobre as energias, pois não conhecemos a massa da bola.

**20.** (Unirio)



Três corpos idênticos de massa  $M$  deslocam-se entre dois níveis, como mostra a figura. A – caindo livremente; B – deslizando ao longo de um tobogã; e C – descendo uma rampa, sendo, em todos os movimentos, desprezíveis as forças dissipativas. Com relação ao trabalho ( $W$ ) realizado pela força-peso dos corpos, pode-se afirmar que:

- a)  $W_C > W_B > W_A$
- b)  $W_C > W_B = W_A$
- c)  $W_C = W_B > W_A$
- d)  $W_C = W_B = W_A$
- e)  $W_C < W_B > W_A$

## *Descomplicando a Física*

### Zonas de deformação

Corpos em movimento possuem energia cinética. Um veículo, quando colide contra um obstáculo, tende a transferir essa energia para o obstáculo, por vezes deformando-o. De alguma maneira, essa energia será dissipada. Se o obstáculo, por exemplo, um muro, se mantém intacto, para onde vai essa energia?

Nos veículos modernos, essa energia é canalizada para o próprio veículo que a absorve, sofrendo uma deformação. A ideia é que a absorção deva ser a maior possível e, desta forma, os ocupantes do veículo recebam a menor quantidade possível de energia. Por conta disso, os carros modernos se deformam, propositalmente, mais facilmente que os antigos. É um equívoco pensar que os carros antigos, por terem uma estrutura metálica mais resistente à deformação, eram mais seguros; grande parte da energia, em um acidente, era transferida para seus ocupantes.

# 11 Quantidade de movimento

Quantidade de movimento,  $Q$ , também denominada momento linear, é uma grandeza vetorial definida como o produto da massa de um corpo pela sua velocidade.

A unidade SI da quantidade de movimento é o  $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ .

A quantidade de movimento pode ser expressa por:

$$\vec{Q} = m \cdot \vec{v}$$

Onde:  $m$  = massa do corpo;

$v$  = velocidade do corpo.

## Impulso de uma força constante

Um corpo que seja submetido à ação de uma força resultante  $F$  constante e diferente de zero, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , sofre alteração de sua velocidade. Dizemos que o corpo está sujeito a um *impulso*.

*Impulso* é uma grandeza vetorial expressa por:

$$\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$$

A unidade do impulso no SI é o  $\text{kg} \cdot \text{m/s}$  ( ou  $\text{N} \cdot \text{s}$ ).

$$1 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 1 \text{ N} \cdot \text{s}$$

## Exemplo

Considere que, ao cobrar uma falta, um jogador promove sobre a bola uma força constante de módulo 300 N que age durante 0,2 s. Calcule o impulso da força a que a bola está sujeita.

## Resolução

$$I = F \cdot \Delta t$$

$$I = 300 \cdot 0,2 = 60 \text{ N.s}$$

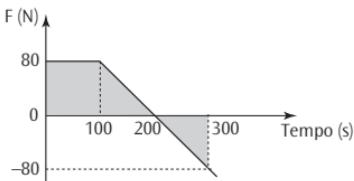
## Impulso de uma força variável

A representação de cálculo do impulso é efetuada por método gráfico. Representa-se o comportamento da força por meio de um gráfico de força em função do tempo,  $F \times t$ . A área compreendida entre a curva do gráfico e o eixo horizontal é numericamente igual ao impulso realizado pela força. O impulso será positivo para a área acima do eixo dos tempos e, negativo, se a área for abaixo do eixo dos tempos.



## Exemplo

Considere uma força que atua sobre um corpo conforme o gráfico a seguir. Calcule o impulso total exercido pela força no intervalo de 0 a 300 s.



## Resolução

Cálculo das áreas (A):

$$\text{De 0 a 100 s: } A = 80 \times 100 = 8000$$

$$\text{De 100 a 200 s: } A = (80 \times 100)/2 = 4000$$

$$\text{De 200 a 300 s: } A = (80 \times 100)/2 = 4000$$

Note que as duas primeiras áreas calculadas fornecem informações acerca de um impulso positivo, totalizando 12000 N.s. A terceira área calculada fornece informações acerca de um impulso negativo. O impulso total ao final dos 300 s é 8000 N.s.

## Teorema do impulso

Como dito anteriormente, a atuação de uma força resultante não nula sobre um corpo durante um determinado intervalo de tempo promove alteração de sua velocidade. Como consequência, o impulso promove alteração da quantidade de movimento. Ou, de outra forma: o impulso da força resultante que atua sobre um corpo durante determinado intervalo de tempo é igual à variação da quantidade de movimento desse corpo nesse intervalo de tempo.

Considerando a ação de uma força resultante entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ , fazendo com que a quantidade de movimento varie de  $\vec{Q}_1$  para  $\vec{Q}_2$ , temos:

$$\vec{I} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1$$

$$\vec{I} = \Delta \vec{Q}$$

## Exemplo

Um corpo de massa 5 kg, em movimento retilíneo e uniforme, está à velocidade de 10 m/s quando passa a atuar sobre ele uma força constante na direção e sentido do deslocamento, fazendo com que

sua velocidade atinja 30 m/s. Considerando que a força atua por 4 s, calcule o impulso que ela ocasiona ao corpo e sua intensidade.

### Resolução

A quantidade de movimento inicial do corpo é

$$Q_0 = m \cdot v_0$$

$$Q_0 = 5 \cdot 10 = 50 \text{ kg.m/s}$$

Após a ação da força, temos:

$$Q = m \cdot v$$

$$Q = 5 \cdot 30 = 150 \text{ kg.m/s}$$

O impulso será:

$$I = Q - Q_0 = 150 - 50 = 100 \text{ kg.m/s} = 100 \text{ N.s}$$

A força pode, então, ser determinada:

$$I = F \cdot \Delta t$$

$$100 = F \cdot 4$$

$$F = 25 \text{ N}$$

## Quantidade de movimento de um sistema

Dado um sistema de  $n$  corpos, a quantidade de movimento total do sistema pode ser determinada pela soma vetorial das quantidades de movimento de cada corpo. Assim,

$$\vec{Q}_{sist.} = \vec{Q}_1 + \vec{Q}_2 + \vec{Q}_3 + \dots + \vec{Q}_n$$

## Conservação da quantidade de movimento

Considere um sistema de  $n$  pontos materiais  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , de massas  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , respectivamente. Sejam  $v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}$ , suas velocidades em um certo instante  $t_1$  e  $v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n}$ , em um instante posterior  $t_2$ .

Aplicando o teorema do impulso a cada ponto, temos:

$$\vec{I}_1 = m_1 \cdot \vec{v}_{21} - m_1 \cdot \vec{v}_{11}$$

$$\vec{I}_2 = m_2 \cdot \vec{v}_{22} - m_2 \cdot \vec{v}_{12}$$

...

$$\vec{I}_n = m_n \cdot \vec{v}_{2nn} - m_n \cdot \vec{v}_{1n}$$

Somando membro a membro, surge:

$$\begin{aligned}\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \dots + \vec{I}_n &= (m_1 \cdot \vec{v}_{21} + m_2 \cdot \vec{v}_{22} + \dots + m_n \cdot \vec{v}_{2n}) - \\ &\quad - (m_1 \cdot \vec{v}_{11} + m_2 \cdot \vec{v}_{12} + \dots + m_n \cdot \vec{v}_{1n})\end{aligned}$$

Como os impulsos das forças internas anulam-se mutuamente e supondo o sistema isolado,

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \dots + \vec{I}_n = 0,$$

o que resulta em:

$$\begin{aligned}(m_1 \cdot \vec{v}_{21} + m_2 \cdot \vec{v}_{22} + \dots + m_n \cdot \vec{v}_{2n}) &= \\ &= (m_1 \cdot \vec{v}_{11} + m_2 \cdot \vec{v}_{12} + \dots + m_n \cdot \vec{v}_{1n})\end{aligned}$$

Logo:

$$\vec{Q}_{final} = \vec{Q}_{inicial}$$

Assim, em um sistema isolado, a quantidade de movimento é constante.

Ou, de outra forma, se a resultante das forças externas a um sistema for nula, a quantidade de movimento total desse sistema permanecerá constante.

Mesmo que haja forças externas não equilibradas, isto é, a resultante das forças externas não é nula, quando o tempo de interação é muito pequeno, o sistema pode ser considerado isolado.

### Exemplo

Um projétil de massa 5 kg é disparado na direção horizontal com velocidade de 550 m/s por um canhão de massa 2200 kg. Determine a velocidade de recuo do canhão.

### Resolução

Como antes do disparo a velocidade do conjunto é zero, podemos escrever:

$$\vec{Q}_{final} = \vec{Q}_{inicial} = 0$$

$$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = 0$$

$$5 \cdot 550 + 2200 \cdot v_2 = 0$$

$$v_2 = -1,25 \text{ m/s}$$

## Quantidade de movimento e colisões – Colisões elásticas e inelásticas

Para as colisões, pode-se definir uma grandeza denominada coeficiente de restituição ( $e$ ) como sendo:

$$e = \frac{\text{velocidade relativa após o choque}}{\text{velocidade relativa antes do choque}}$$

O coeficiente de restituição ( $e$ ) é um número adimensional:  
 $0 \leq e \leq 1$

Em qualquer tipo de colisão, num sistema isolado, a quantidade de movimento total sempre se conserva. A energia cinética do sistema, no entanto, pode variar. Por conta disso, podemos classificar as colisões em três tipos:

Colisões elásticas: quando os corpos não se agrupam depois do choque e não há perdas de energia cinética no sistema:  $e = 1$ ;

Colisões inelásticas: quando os corpos não se agrupam depois do choque, mas há perdas de energia cinética no sistema:  $0 < e < 1$ ;

Colisões perfeitamente inelásticas: quando os corpos se agrupam formando um único corpo; há perdas de energia cinética no sistema:  $e = 0$ .

### TESTE SEU SABER

1. Um carro de 800 kg, parado num sinal vermelho, é abalroado por trás por outro carro, de 1200 kg, com uma velocidade de 72 km/h. Imediatamente após o choque, os dois carros se movem juntos. Calcule a velocidade do conjunto logo após a colisão.
2. Um canhão dispara horizontalmente uma granada de 60 kg conferindo-lhe  $1/40$  s à velocidade de 900 m/s. Qual a intensidade do impulso recebido pela granada? Admitindo-se que, durante o disparo, a força propulsora seja constante, calcule a sua intensidade.
3. Um recipiente de metal com  $X$  kg de massa desliza inicialmente vazio sobre uma superfície horizontal, com velocidade de 10 m/s. Começa a chover verticalmente e, após certo tempo, a chuva para. Depois da chuva o recipiente contém 1 kg de água e se move com velocidade  $v' = 20/3$  m/s. Desprezando o atrito, quanto vale  $X$ ?
4. Após o chute para cobrança de uma penalidade máxima, uma bola de futebol de massa 400 g sai com velocidade igual a 24 m/s. O tempo

de contato entre o pé do jogador e a bola é de 0,03 s. Qual a quantidade de movimento adquirida pela bola com o chute? Qual a força média aplicada pelo pé do jogador?

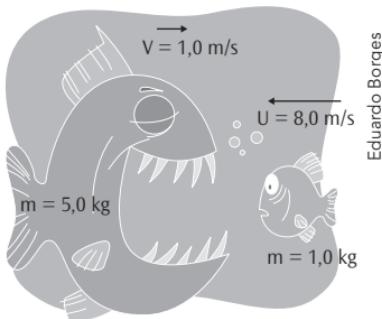
5. Uma bomba tem velocidade  $v$  no instante em que explode e se divide em dois fragmentos, um de massa  $m$  e outro de massa  $2m$ . A velocidade do fragmento menor, logo após a explosão, é de  $5v$ . Calcule a velocidade vetorial do outro fragmento, desprezando a ação da gravidade e a resistência do ar durante a explosão.
6. Uma nave espacial de 1000 kg se movimenta livre de quaisquer forças com velocidade constante de 1 m/s, em relação a um referencial inercial. Necessitando pará-la, o centro de controle decidiu acionar um dos motores auxiliares, que fornecerá uma força constante de 200 N, na mesma direção, mas em sentido contrário ao do movimento. Esse motor deverá ser programado para funcionar durante:  
a) 1 s      b) 2 s      c) 4 s      d) 5 s      e) 10 s
7. Uma arma de 1 kg atira um projétil de 0,02 kg com velocidade de 1000 m/s. Qual a velocidade de recuo da arma?
8. Dois patinadores de mesma massa deslocam-se numa mesma trajetória retilínea com velocidades respectivamente iguais a 1,5 m/s e 3,5 m/s. O patinador mais rápido persegue o outro. Ao alcançá-lo, salta verticalmente e agarra-se às suas costas, passando os dois a deslocarem-se com velocidade  $v$ . Desprezando o atrito, o módulo de  $v$ , em m/s, deve ser:  
a) 1,5      b) 2      c) 2,5      d) 3,5      e) 5
9. Duas esferas iguais de 5 kg de massa têm velocidade de 20 m/s e 6,0 m/s e se movimentam num plano horizontal sem atrito, em sentidos opostos. Sendo o coeficiente de restituição 0,20, determine as velocidades das esferas após o choque.
10. Um carrinho de massa 80 kg desloca-se horizontalmente com velocidade de 5 m/s. Um bloco de massa 20 kg cai de uma altura muito pequena, verticalmente, aderindo-se a ele. Com que velocidade final move-se o conjunto?

11. (Fuvest) Um menino de 40 kg está sobre um *skate* que se move com velocidade constante de 3 m/s numa trajetória retilínea e horizontal. Defronte de um obstáculo ele salta e após 1 s cai sobre o *skate*, que durante todo tempo mantém a velocidade de 3 m/s. Desprezando-se eventuais forças de atrito e adotando  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , pede-se:

- A altura que o menino atingiu no seu salto, tomando como referência a base do *skate*.
- A quantidade de movimento do menino no ponto mais alto de sua trajetória.

12. (UFPI) Na figura a seguir, o peixe maior, de massa  $M = 5 \text{ kg}$ , nada para a direita a uma velocidade  $v = 1 \text{ m/s}$ , e o peixe menor, de massa  $m = 1 \text{ kg}$ , se aproxima dele a uma velocidade  $u = 8 \text{ m/s}$ , para a esquerda.

Despreze qualquer efeito de resistência da água.



Eduardo Borges

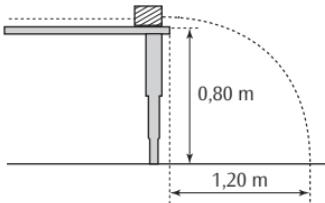
Após engolir o peixe menor, o peixe maior terá uma velocidade de:

- 0,50 m/s, para a esquerda.
- 1 m/s, para a esquerda.
- Nula.
- 0,50 m/s para a direita.
- 1 m/s para a direita.

13. (Fuvest) Um vagão A, de massa 10 000 kg, move-se com velocidade igual a 0,4 m/s sobre trilhos horizontais sem atrito até colidir com outro vagão B, de massa 20 000 kg, inicialmente em repouso. Após a colisão, o vagão A fica parado. A energia cinética final do vagão B vale:

- 100 J
- 200 J
- 400 J
- 800 J
- 1600 J

- 14.** (Unesp) Para medir a velocidade de uma bala, preparou-se um bloco de madeira de 0,990 kg, que foi colocado a 0,80 m do solo sobre uma mesa plana, horizontal e perfeitamente lisa, como mostra a figura ao lado. A bala, disparada horizontalmente contra o bloco em repouso, alojou-se nele, e o conjunto (bala + bloco) foi lançado com velocidade  $V$ , atingindo o solo a 1,20 m da borda da mesa.



- Adotando-se  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , determine a velocidade  $v$  do conjunto, ao abandonar a mesa. (Despreze a resistência e o empuxo do ar.)
- Determine a velocidade com que a bala atingiu o bloco, sabendo-se que sua massa é igual a 0,010 kg.

## Descomplicando a Física

### Pêndulo balístico

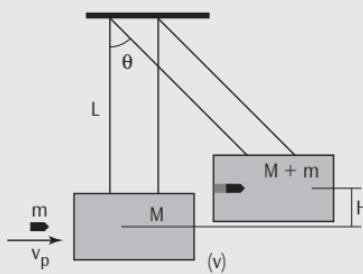
É o mais antigo dispositivo usado para medir a velocidade de um projétil ou bala, criado em meados do século XVIII. É composto de um bloco de material macio, de massa relativamente grande, suspenso verticalmente de maneira que o bloco se mantenha na horizontal durante a oscilação. Quando o bloco é atingido pelo projétil, o ângulo de desvio dos fios de sustentação em relação à vertical permite a determinação da velocidade do projétil antes do impacto.

$$v = \sqrt{2g \cdot H}$$

$$H = L(1 - \cos\theta)$$

$$v_p = \frac{m+M}{m} \sqrt{2g \cdot H}$$

$$v_p = \frac{m+M}{m} \sqrt{2g L(1 - \cos\theta)}$$



Continua...

O projétil de massa  $m$  é lançado com velocidade  $v_p$  e aloja-se no bloco de massa  $M$  que está suspenso por um conjunto de fios de comprimento  $L$ . Dessa maneira, o conjunto desloca-se de uma altura  $H$ .

Para determinarmos a velocidade do projétil, faz-se:

$$m \cdot v_p = (m + M) v$$

$$v = (m \cdot v_p) / (m + M)$$

A energia cinética após a colisão é completamente convertida em energia potencial gravitacional quando o conjunto atinge a altura  $H$ .

$$\frac{(m + M) \cdot v^2}{2} = (m + M) \cdot g \cdot H \quad \rightarrow \quad v = (2 \cdot g \cdot H)^{1/2} \quad \rightarrow$$

$$\rightarrow v_p = \frac{(m + M)}{m} \cdot (2 \cdot g \cdot H)^{1/2}$$

Modernamente utilizam-se processos fotográficos e eletrônicos que são mais precisos.

# 12

# Equilíbrio de corpos rígidos

Para colocar um corpo em rotação, é suficiente uma única força? Sempre que se aplica um par de forças de mesma intensidade e direção, porém de sentidos opostos, sobre um corpo em repouso em relação a um referencial, ele permanece em repouso?

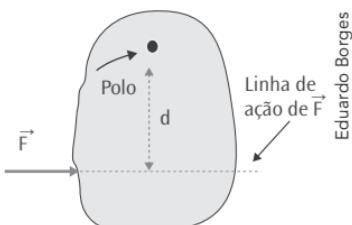
Se suas duas respostas foram afirmativas, como você explica o ato de virar o volante de um veículo?

## Equilíbrio de um ponto material

Para que um ponto material esteja em equilíbrio, uma única condição precisa ser satisfeita: a somatória das forças externas que atuam sobre o corpo deve ser nula. Isto se deve ao fato de que o corpo, no sistema considerado, representa um elemento de dimensões desprezíveis (por isso mesmo denominado ponto material). Desta forma, todas as forças que atuam sobre ele podem ser consideradas concorrentes, isto é, admite-se que elas atuam exatamente no mesmo ponto ou convergem para um mesmo ponto. No caso de um corpo extenso (cujas dimensões não podem ser desprezadas), outras considerações devem ser feitas. Quando aplicamos uma força a um corpo extenso, temos de considerar em que ponto do corpo esta força é aplicada.

## Momento de uma força (torque)

Em corpos rígidos, o ponto em que uma força é aplicada pode alterar radicalmente a situação física. Mas o efeito da força sobre o corpo rígido não se altera se ela for aplicada em qualquer ponto da reta



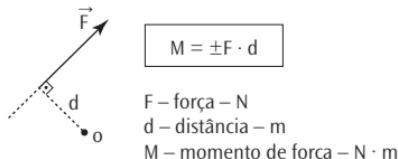
que contém o vetor força. Essa reta é denominada *linha de ação* da força.

Define-se o *momento* de uma força ( $M_O$ ) em relação a um ponto O, também chamado de *polo*, como sendo:

$$M_O = F \cdot d$$

Onde:  $F$  = intensidade da força;

$d$  = distância do polo à linha de ação da força.



## Equilíbrio de um corpo extenso

Diferentemente de partícula, um corpo extenso não pode ter desprezíveis suas dimensões. Assim, sob ação de forças, ele pode desenvolver movimento de translação e/ou de rotação. Portanto, para que um corpo extenso esteja em equilíbrio, são necessárias duas condições:

1. a resultante das forças externas deve ser nula,

$$\Sigma F = 0$$

2. a somatória dos momentos das forças que atuam no corpo, em relação a um polo qualquer, deve ser nula.

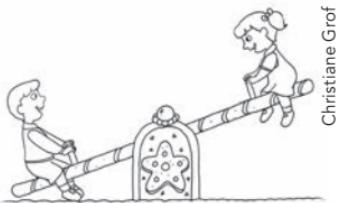
$$\Sigma M_O = 0$$

Lembre-se de orientar, nessa soma, os momentos das forças, considerando anti-horários como positivos e os horários como negativos (ou vice-versa).

## Exemplo

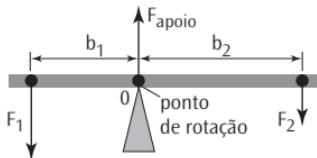
Duas crianças estão sentadas em extremidades opostas de uma gangorra de 4,4 m de comprimento.

O garoto possui massa de 25 kg, enquanto a menina possui massa de 30 kg. Calcule as distâncias que as crianças devem estar do ponto de apoio para que a gangorra fique parada na posição horizontal.



## Resolução

Esquematicamente, o sistema pode ser representado:



Assim, considerando  $F_1$  o peso da menina (300 N) e  $b_1$  a sua distância do ponto de apoio O, e  $F_2$  o peso do menino (250 N) e  $b_2$  a sua distância do ponto de apoio O, temos:

$$\Sigma M_o = 0$$

$$F_1 \cdot b_1 = F_2 \cdot b$$

$$300 \cdot b_1 = 250 \cdot b_2 \text{ ou } 6 b_1 = 5 b_2$$

Da extensão da gangorra, surge:

$$b_1 + b_2 = 4,4 \text{ m}$$

$$b_1 = 4,4 - b_2$$

Combinando as duas expressões:

$$6(4,4 - b_2) = 5b_2$$

$$b_2 = 2,4 \text{ m}$$

e, como

$$b_1 = 4,4 - b_2,$$

$$b_1 = 2 \text{ m}$$

Saiba



## Alavanca – uma máquina simples

Uma alavanca consiste num sistema rígido com um ponto fixo apropriado para multiplicar a força a ser aplicada a um objeto. Existem, basicamente, três tipos de alavancas:

Alavanca interfixa – O ponto A em que se fixa a alavanca está posicionado entre a resistência R (refere-se à força a ser superada) e a potência p (refere-se à força a ser feita).

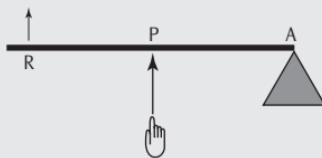


Exemplos: Gangorra, articulação, alicate, tornozelo e tesoura.

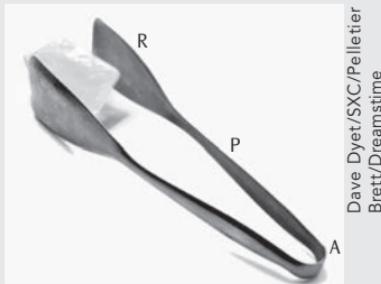


Continua...

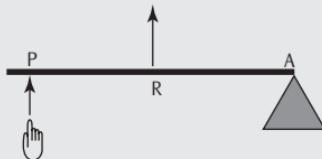
Alavanca interpotente – A potência está situada entre a resistência e o ponto de apoio.



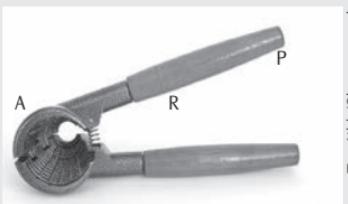
Exemplo: Pinça ou pegador de gelo.



Alavanca inter-resistente – A resistência está localizada entre o ponto de apoio da alavanca e a potência.



Exemplo: Carrinho de mão, quebra-nozes e pé.



---

## TESTE SEU SABER

---

1. Uma criança pesando 400 N está sentada numa extremidade de uma gangorra de 3 m de comprimento e apoiada a 1,4 m da criança. Se outra criança estiver apoiada na outra extremidade, equilibrando a gangorra, qual o seu peso? Desprezar o peso da gangorra. Qual a força total no apoio?
2. (ITA) A barra AB é uniforme, pesa 50 N e tem 10 m de comprimento. O bloco D, de tamanho desprezível, pesa 30 N e dista 8 m de A. A distância entre os pontos de apoio da barra é 7 m. Calcule a reação na extremidade A.

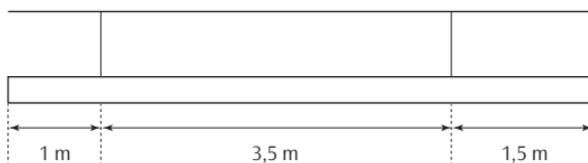


3. Um homem de peso 600 N caminha numa tábua de madeira simplesmente apoiada em uma extremidade A e articulada em C, distante 4 m de A. O peso da tábua é 900 N e seu comprimento é de 6 m. Determine a máxima distância que o homem pode caminhar sobre a tábua para que ela fique em equilíbrio. Admita-se que a tábua é homogênea.
4. Analise a afirmativa a seguir, justificando sua resposta:

“Sempre que a força resultante sobre um objeto for nula, todas as suas partes estarão em equilíbrio.

5. É comum encontrarmos, em manuais de motos, o valor do torque (momento de uma força) máximo que pode ser aplicado em uma porca. No manual da Honda CG125, por exemplo, aparece a seguinte informação: “torque máximo para aperto da porca para o eixo dianteiro 70 N.m”. Se um mecânico usa uma chave de boca que permite um braço máximo de 14 cm, qual a maior força que ele pode aplicar na ferramenta sem danificar a porca, exercendo o menor esforço pessoal?

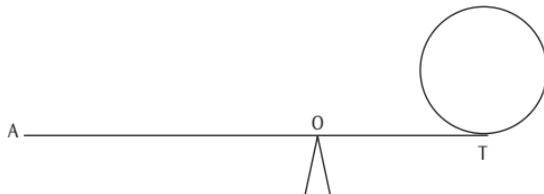
6. (Unicamp) Um homem de massa 80 kg quer levantar um objeto usando uma alavanca rígida e leve. Os braços da alavanca têm 1 m e 3 m. Qual é a maior massa que o homem consegue levantar usando a alavanca e o seu próprio peso? Neste caso, qual a força exercida sobre a alavanca no ponto de apoio?
7. Na figura abaixo, está representada uma viga homogênea de peso 6000 N, suspensa horizontalmente por dois cabos verticais. Determine a tração exercida por esses cabos.



8. (ITA-SP) Considere as três afirmativas a seguir, sobre um aspecto da Física do cotidiano:
- I - Quando João começou a subir pela escada de pedreiro apoiada numa parede vertical, e já estava no terceiro degrau, Maria grita para ele:  
 - Cuidado, João, você vai cair, pois a escada está muito inclinada e vai deslizar.
- II - João responde: - Se ela não deslizou até agora que estou no terceiro degrau, também não deslizará quando eu estiver no último.
- III - Quando João chega ao meio da escada fica com medo e dá total razão a Maria. Ele desce da escada e diz à Maria: - Como você é mais leve do que eu, tem mais chance de chegar ao fim da escada com a mesma inclinação, sem que ela deslize.
- Ignorando o atrito na parede:
- a) Maria está certa com relação a I, mas João está errado com relação a II.  
 b) João está certo com relação a II, mas Maria está errada com relação a I.  
 c) As três afirmativas estão fisicamente corretas.  
 d) Somente a afirmativa I é fisicamente correta.  
 e) Somente a afirmativa III é fisicamente correta.

9. Uma pessoa A, tentando fechar uma porta, aplica à maçaneta uma força de 40 N, perpendicularmente à porta, tentando fazê-la girar no sentido horário.
- Sabendo que a maçaneta dista 90 cm das dobradiças, determine o torque, em relação às dobradiças, que a pessoa A aplica à porta.
  - Uma pessoa B consegue impedir que a porta seja fechada, aplicando-lhe uma força  $F$ . Qual o torque que B aplicou à porta (em relação às dobradiças)?
  - Supondo que  $F$  também seja perpendicular à porta, aplicada a 20 cm das dobradiças, determine o módulo dessa força.
10. Para fazer girar uma porca, que prende a roda de um automóvel, é necessário um momento de 12 kgfm. Supondo que a força máxima que o motorista é capaz de exercer seja de 50 kgf, qual deve ser o comprimento mínimo do braço da chave de roda para que ele consiga trocar o pneu?
11. Uma barra homogênea AB, de 8 m de comprimento e peso igual a 500 N, submetida à ação de uma força  $F$ , é mantida em equilíbrio na posição horizontal, apoiada no ponto O, a 6 m da extremidade A, conforme esquema abaixo. A força vertical  $F$ , aplicada na extremidade B, tem módulo, em newtons, igual a:
- a) 500      b) 400      c) 300      d) 200      e) 166
- 
12. Duas crianças, de 20 kg e 30 kg de massa, encontram-se sobre uma gangorra de 4 kg de massa, com apoio no ponto médio (O). A criança mais pesada está situada a 1 m do ponto O. A que distância de O deve se situar a criança mais leve para que a gangorra fique em equilíbrio?
- a) 1 m      b) 0,56 m      c) 1,25 m      d) 2,50 m      e) 1,50 m
13. Um corpo rígido está em equilíbrio sob ação de um sistema de três forças. Qual das alternativas a seguir melhor descreve a situação?

- a) A resultante das forças deve ser nula.  
b) O momento das forças deve ser nulo.  
c) A resultante das forças deve ser diferente de zero.  
d) O momento das forças deve ser diferente de zero.  
e) A soma dos momentos e a resultante das forças devem ser nulas.
- 14.** Os benefícios que as alavancas nos trazem não são descobertas recentes. O grego Arquimedes, que viveu na cidade de Siracusa, uma colônia grega situada na Sicília, entusiasmou-se tanto com a alavanca que formulou a frase: "Se me deres uma alavanca e um ponto de apoio, deslocarei o mundo". Exageros à parte, Arquimedes verificou que, com o auxílio de uma barra rígida e um ponto de apoio, é possível ao homem erguer ou equilibrar uma carga muito grande. Conclui que quanto maior for a distância do operador ao ponto de apoio da barra, menor deverá ser a intensidade da força que ele deverá aplicar. Suponha que o peso da Terra seja igual a  $6 \times 10^{25}$  N e que a distância OT seja de 100000 km. Neste caso:
- a) Determine qual a distância OA, se Arquimedes exerce uma força  $F = 20$  N;



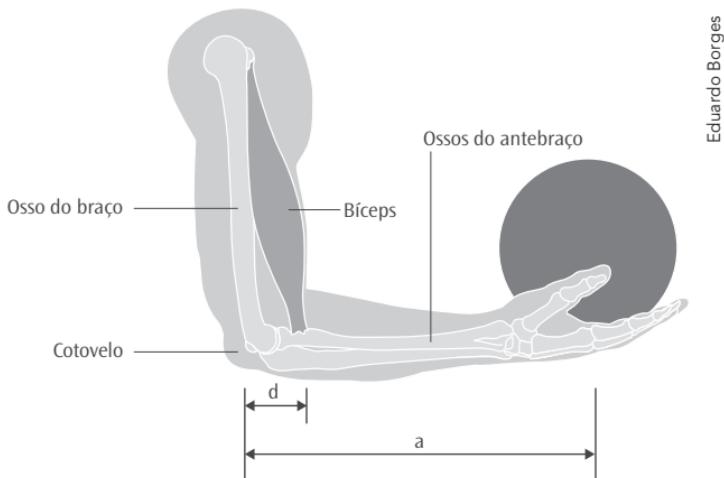
- b) se considerarmos a distância Terra–Lua como sendo  $4 \times 10^5$  km, compare com a distância encontrada no item anterior.
- 15.** (UFRRJ-RJ) Na figura ao lado, suponha que o menino esteja empurrando a porta com uma força  $F_m = 5$  N, atuando a uma distância 2 m das dobradiças (eixo de rotação), e que o homem exerça uma força  $F_h = 80$  N, a uma distância de 10 cm do eixo de rotação.



Eduardo Borges

Nessas condições, pode-se afirmar que:

- a) A porta estaria girando no sentido de ser fechada.
  - b) A porta estaria girando no sentido de ser aberta.
  - c) A porta não gira em nenhum sentido.
  - d) O valor do momento aplicado à porta pelo homem é maior que o valor do momento aplicado pelo menino.
  - e) A porta estaria girando no sentido de ser fechada, pois a massa do homem é maior que a massa do menino.
- 16.** (Unicamp-SP) O bíceps é um dos músculos envolvidos no processo de dobra de nossos braços. Esse músculo funciona num sistema de alavanca como é mostrado na figura abaixo. O simples ato de equilibrarmos um objeto na palma da mão, estando o braço em posição vertical e o antebraço em posição horizontal, é o resultado de um equilíbrio das seguintes forças: o peso  $P$  do objeto, a força  $F$  que o bíceps exerce sobre um dos ossos do antebraço e a força  $C$  que o osso do braço exerce sobre o cotovelo. À distância do cotovelo até a palma da mão chamamos de  $a$  e do cotovelo ao ponto em que o bíceps está ligado a um dos ossos do antebraço de  $d$ .



Com base nos conceitos de alavanca interpotente, analise o texto acima e identifique a alternativa correta.

- a) A força potente ( $F$ ) é sempre menor que a força resistente ( $P$ ).
- b) A força potente ( $F$ ) é sempre maior que a força resistente ( $P$ ).

- c) A força potente (F) e a força resistente (P) são iguais.
  - d) A força potente (F) e a força resistente (P) podem ser iguais ou diferentes.
  - e) Não podemos fazer quaisquer afirmações a respeito das forças potente e resistente.
17. (Enem-MEC) Um portão está fixo em um muro por duas dobradiças A e B, conforme mostra a figura, sendo P o peso do portão.



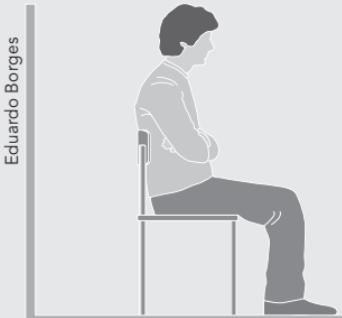
Eduardo Borges

Caso um garoto se dependure no portão pela extremidade livre, e supondo que as reações máximas suportadas pelas dobradiças sejam iguais, podemos dizer que:

- a) É mais provável que a dobradiça A arrebente primeiro que a B.
- b) É mais provável que a dobradiça B arrebente primeiro que a A.
- c) Seguramente as dobradiças A e B arrebentaráo simultaneamente.
- d) Nenhuma delas sofrerá qualquer esforço.
- e) O portão quebraria ao meio, ou nada sofreria.

### *Descomplicando a Física*

(Vunesp-SP) Justifique por que uma pessoa sentada conforme a figura, mantendo o tronco e as tibias na vertical e os pés no chão, não consegue se levantar por esforço próprio.

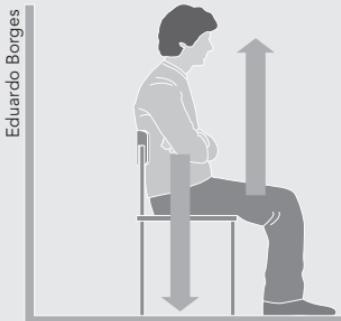


Eduardo Borges

Continua...

## Resolução

Observe que para a pessoa se levantar, o único ponto de apoio que ela tem é no pé em contato com o chão. O peso da pessoa encontra-se aplicado no seu centro de massa, que deve se encontrar próximo à região pélvica, e, portanto, deslocado do ponto de apoio.



Note que não há como anular o momento da força-peso em torno do ponto de apoio situado, no caso, nos pés.

Da próxima vez que você se levantar de uma cadeira, procure observar qual a posição que seus pés tomam como ponto de apoio. Para levantar-se com o tronco reto, os pés devem ser posicionados para trás, de sorte que o eixo de ação da força-peso passe sobre o ponto de apoio e, portanto, o peso e a normal na região do apoio passem a ter a mesma linha de ação.

Levantar-se mantendo os pés conforme representado na figura é possível, desde que você flexione o tronco para frente.

# 13 Estática dos fluidos

Fluidos são materiais não sólidos que caracteristicamente possuem a capacidade de escoar. Assim, os fluidos tendem a assumir a forma do recipiente no qual estão confinados, mesmo que seja necessário um intervalo de tempo grande para que isso ocorra, como no caso do piche e do vidro.

Saiba



## Líquidos

Os líquidos, ao contrário do que se costuma afirmar e do senso comum, têm forma definida. O que faz o líquido assumir a forma do recipiente é a ação gravitacional. Na ausência de campo gravitacional, em uma nave espacial, por exemplo, qualquer líquido assume a forma esférica. Gotas de mercúrio ou mesmo água, quando bastante pequenas, possuem forma praticamente esférica (mesmo sob ação gravitacional da Terra). Apenas quando a força gravitacional superar as forças de coesão entre as partículas do líquido, o que se consegue com o aumento de massa (e, portanto, da quantidade) do líquido, este assumirá a forma do recipiente.



Tatjana Streikova/Shutterstock

Outra característica dos fluidos é a capacidade de, ao receber uma força, transmiti-la igualmente a todos os pontos. Isso garante

uma uniformidade quando, por exemplo, um balão ou câmara de ar é preenchido com ar.

Em particular, os gases possuem volume variável e preenchem totalmente o volume do recipiente que os contém, ao passo que os líquidos têm volume quase invariável, ou seja, são praticamente incompressíveis.

## Pressão

Define-se pressão ( $p$ ) como sendo a relação entre a força ( $F$ ) exercida perpendicularmente sobre uma superfície e a área ( $A$ ) dessa superfície.

$$p = \frac{F}{A}$$

No SI, a unidade de pressão é o pascal (Pa). É muito comum, no entanto, o uso de outras unidades, como atmosfera (atm), milímetro de mercúrio (mm Hg), quilograma-força/centímetro quadrado (kgf · cm<sup>-2</sup>), libras-força por polegada quadrada (lbf · pol<sup>-2</sup>), entre outras.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 1 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2} = 14,7 \text{ lbf} \cdot \text{pol}^{-2} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Saiba



### Pressão sanguínea

Esfigmanômetro. Este é o nome do aparelho comumente usado para se medir a pressão sanguínea em seres humanos.

Na mesma altura em que está o coração, um bracelete é colocado envolvendo o antebraço do paciente. Exercendo uma pressão gradativamente crescente até que uma das artérias do



Luis Louro/Shutterstock

Continua...

braço se feche, o bracelete vai sendo inflado. A seguir, o ar do bracelete é liberado, diminuindo a pressão sobre a artéria em questão. Com um estetoscópio, o médico pode ouvir o som provocado pelo movimento do sangue na artéria.

Quando a pressão exercida sobre a artéria está próxima da pressão máxima exercida pelo coração, ocorre um fluxo turbulento de sangue de som característico. Com a pressão em queda, atinge-se o valor mínimo, com som mais uniforme.

É comum ouvirmos falar que a pressão de um indivíduo está “12 por 8”. Para pessoas saudáveis, este é um par de valores médios de referência. Traduzindo, a pressão sistólica (contração do coração) está 120 mmHg acima da pressão atmosférica e a pressão diastólica (estado de repouso do coração, entre duas contrações) está 80 mmHg acima da pressão atmosférica.

À medida que o sangue se afasta do coração, a pressão diminui, mas como os vasos sanguíneos são de menor diâmetro, o sangue flui com velocidade menor.

## Densidade

Define-se densidade de um corpo ( $d$ ) como sendo a razão entre a massa ( $m$ ) do corpo e o seu volume ( $V$ ).

$$d = \frac{m}{V}$$

Por meio dessa relação, podemos prever o comportamento de um sólido, se afundará ou flutuará, quando imerso em um líquido, ou, então, quando temos dois líquidos imiscíveis, qual deles se comportará como sobrenadante.

A unidade de densidade no SI é o quilograma por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). É de uso frequente outras unidades, como grama por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ) e grama por mililitro ( $\text{g/mL}$ ).

Lembramos que as unidades litro (L) e decímetro cúbico (dm<sup>3</sup>) também são muito usadas para a medida de volume, equivalendo a:

$$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Ressalte-se que o volume de uma substância depende da temperatura a que ele está submetido e consequentemente sua densidade também.

Relações usuais:

$$1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 1 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1} = 1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = 1 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$$

Apresentamos, a seguir, tabela de valores usuais de densidades a 25 °C para alguns materiais.

Material	Densidade – Valores médios (g - cm <sup>-3</sup> )
Ar (20 °C e 1 atm)	0,0012
Água	1,00
Álcool etílico	0,79
Chumbo	11,30
Cortiça	0,22
Ferro	7,85
Gasolina	0,70
Mercúrio	13,60
Óleo	0,80
Ouro	19,30
Prata	10,50

## Pressão no interior de um fluido

Vivemos imersos em um fluido, o ar. Estamos sujeitos à pressão que o ar exerce sobre o nosso corpo, a pressão atmosférica. Quando subimos ou descemos uma serra, sentimos os efeitos da variação de pressão, o que nos mostra que a pressão atmosférica é dependente da altitude.

Quando mergulhamos em uma piscina, sentimos uma alteração de pressão sobre nosso corpo. Neste caso, além da pressão atmosférica, estamos sujeitos também à pressão que o líquido exerce sobre o nosso corpo. O corpo humano suporta pressões de até 4 atm.

A pressão efetiva ( $p_{ef}$ ) exercida sobre um corpo imerso em um líquido em repouso está relacionada à densidade do líquido ( $d$ ), à aceleração da gravidade local ( $g$ ) e à altura ( $h$ ) da coluna de líquido acima do corpo (profundidade em que o corpo se encontra).

$$\text{Equação fundamental da hidrostática: } p_{ef} = d \cdot g \cdot h$$

Assim, a pressão total (ou pressão absoluta) exercida sobre um corpo imerso em um líquido em recipiente aberto, e sujeito à ação da pressão atmosférica, pode ser escrita da seguinte forma:

$$p = p_{atm} + d \cdot g \cdot h$$

### Exemplo

Um caixa-d'água cúbica, situada ao nível do mar, contém água até a altura de 5 m. Determine a pressão exercida pela água e a pressão absoluta no fundo desse reservatório.

### Resolução

A densidade da água é  $d = 1 \text{ g/cm}^3 = 1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . A pressão efetiva será:

$$p_{ef} = d \cdot g \cdot h = (1 \cdot 10^3) \cdot 10 \cdot 5 = 5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$

Somando-se a pressão atmosférica, tem-se a pressão absoluta:  $1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .

## Princípio de Pascal

Uma variação de pressão que ocorre sobre um fluido contido em um recipiente é integralmente transferida a todos os pontos do fluido e, por extensão, às paredes do recipiente que o contém.

O princípio de Pascal resume uma propriedade dos fluidos que permite a ampliação de uma força aplicada, a essência do funcionamento de sistemas hidráulicos.

Um sistema hidráulico consiste em um pistão, cuja área da seção transversal é  $S_1$ , interligado, por meio de um fluido, a outro maior, de área  $S_2$ . Como a pressão é transmitida integralmente, podemos escrever:

$$p_1 = p_2 \text{ e, portanto, } \frac{f_1}{S_1} = \frac{f_2}{S_2}$$

onde  $f_1$  e  $f_2$  representam as forças que atuam sobre os pistões de áreas  $S_1$  e  $S_2$ .



### Exemplo

Em um elevador hidráulico, um carro de peso de 10000 N está apoiado num êmbolo de  $500 \text{ cm}^2$  de área. Determine o módulo da força que, aplicada a um êmbolo de  $25 \text{ cm}^2$ , equilibra o carro.

## Resolução

$$\frac{f_1}{S_1} = \frac{f_2}{S_2}$$

$$\frac{10000}{500} = \frac{f_2}{25}$$

$$f_2 = 500 \text{ N}$$

## Princípio de Arquimedes

Um corpo total ou parcialmente imerso em um fluido recebe deste um empuxo ( $E$ ) dirigido verticalmente de baixo para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo.

$$E = d \cdot V \cdot g$$

sendo  $d$  a densidade do fluido,  $V$  o volume deslocado de fluido e  $g$  a aceleração da gravidade local.

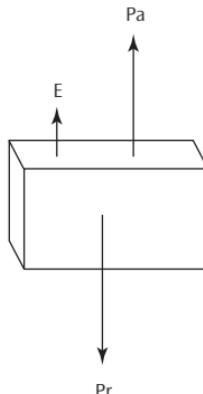
## Peso aparente de um corpo e empuxo

O empuxo explica por que é mais fácil carregar uma pessoa quando ela está imersa na água, por que os navios flutuam e os balões sobem.

Quando um corpo está inteiramente imerso em um líquido, o empuxo reduz a medida do peso do corpo. O peso real,  $P_r$ , de um corpo, o empuxo,  $E$ , e o peso aparente,  $P_a$ , estão relacionados:

$$P_r = E + P_a$$

O peso de um corpo imerso no ar também é aparente, uma vez que o ar, como qualquer fluido, também exerce empuxo. O



empuxo do ar é da ordem de 0,13% do peso de um corpo, podendo ser considerado desprezível na maioria das situações práticas.

Se um corpo está parcialmente imerso em um líquido, o empuxo equilibra o peso:

$$P = E$$

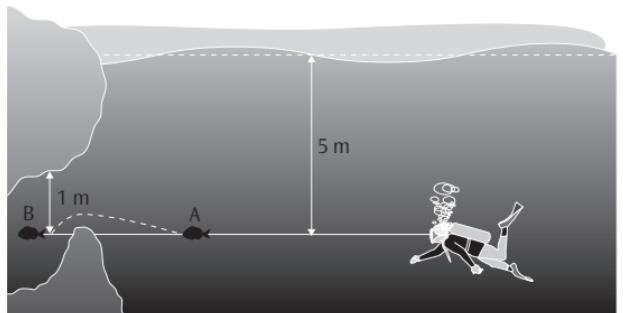
## TESTE SEU SABER

1. Com uma prensa hidráulica se quer equilibrar um corpo de massa 5000 kg sobre o pistão maior com um corpo de massa 200 kg sobre o pistão menor. Qual deve ser a razão entre os raios dos dois pistões?
2. Coloca-se dentro de um tanque com água de densidade  $1\text{g}/\text{cm}^3$  um corpo de 500g de massa e 1000 mL de volume, que fica flutuando à superfície da água com metade de seu volume imerso. Qual é a intensidade em N (newtons) do empuxo aplicado pela água sobre o corpo?
3. (Unicamp-SP) Suponha que o sangue tenha a mesma densidade que a água e que o coração seja uma bomba capaz de bombeá-lo a uma pressão de 150 mm de mercúrio acima da pressão atmosférica. Considere uma pessoa cujo cérebro esteja 50 cm acima do coração e adote, para simplificar, que  $1\text{ atm} = 750\text{ mm de mercúrio}$ .
  - a) Até que altura o coração consegue bombear o sangue?
  - b) Suponha que esta pessoa esteja em outro planeta. A que aceleração gravitacional máxima ela pode estar sujeita para que ainda receba sangue no cérebro?
4. (Esal-MG) Uma esfera cujo volume é de  $200\text{ cm}^3$ , feita de um material cuja densidade é  $0,8\text{g}/\text{cm}^3$ , é totalmente mergulhada em um tanque cheio de água (densidade  $1\text{g}/\text{cm}^3$ ) de profundidade 10 m e abandonada a seguir. Considerando-se  $g = 10\text{ m/s}^2$  e  $p = 100000\text{ N/m}^2$ , calcule:
  - a) A pressão que a esfera suporta no fundo do tanque.
  - b) O módulo, a direção e o sentido da aceleração adquirida pela esfera.
  - c) A velocidade da esfera quando atinge a superfície da água.
  - d) O tempo que a esfera gastará para atingir a superfície da água.

5. Uma grande piscina e um pequeno tanque, um ao lado do outro, contêm água a uma mesma profundidade.
- A pressão no fundo da piscina é maior, menor ou igual à pressão no fundo do tanque?
  - A força total, exercida pela água, no fundo da piscina é maior, menor ou igual à força total no fundo do tanque?
6. (UEMS) Uma bailarina de 48 kg apoia-se sobre a ponta de uma de suas sapatilhas, cuja área de contato com o piso é de  $6 \text{ cm}^2$ .
- Determine a pressão que a bailarina exerce sobre o piso.
  - Suponha que o material de que é feito o piso não resista a pressões superiores a  $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Qual deve ser a área mínima da sapatilha para não afundar o piso?
7. Um submarino navega a 100 m de profundidade. Qual a pressão a que o submarino está sujeito? (Dados: densidade da água do mar  $1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e  $g = 9,80 \text{ m/s}^2$ .)
8. Um astronauta, na Lua, conseguiria tomar um refrigerante, usando canudinho, como se faz aqui na Terra? Explique.
9. Em uma residência, há uma caixa-d'água de 1 m de largura, 2 m de comprimento e 1 m de altura. Para aumentar a pressão da água nas torneiras, um bombeiro sugeriu que se colocasse, no mesmo local, outra caixa de maior capacidade, com 2 m de largura, 3 m de comprimento e 1 m de altura. Você concorda com a proposta do bombeiro? Explique.
10. (Fuvest-SP) Um tijolo tem massa igual a 2 kg e volume de  $1000 \text{ cm}^3$ . (Dados: densidade do ar =  $1,2 \text{ kg/m}^3$ ). Calcule:
- A densidade do tijolo.
  - O peso aparente do tijolo.
11. (Unifor-CE) Um bloco maciço de metal, em forma de cubo, tem massa de 800 kg e está apoiado sobre uma superfície horizontal por uma de suas faces. A pressão que ele exerce tem intensidade de  $5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ . Nessas condições, a medida da aresta desse cubo, em centímetros, vale:
- a) 20      b) 30      c) 40      d) 50      e) 60

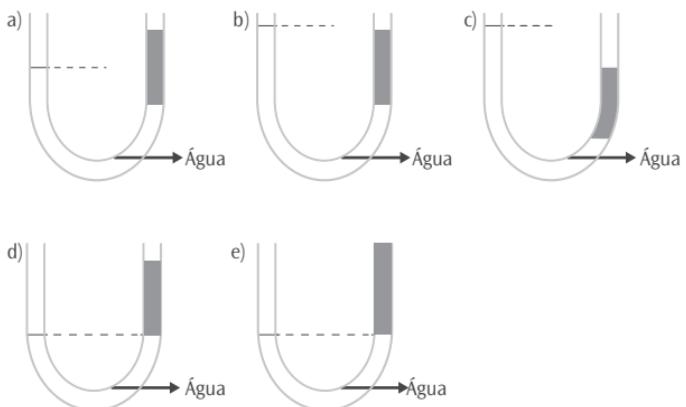
- 12.** (Fuvest-SP) Os buracos negros seriam regiões do universo de densidade muito elevada, capazes de absorver matéria, que passaria a ter a densidade desses buracos. Se a Terra, com massa da ordem de  $10^{27}\text{g}$ , fosse absorvida por um buraco negro de densidade  $10^{24}\text{ g/cm}^3$ , o volume que ela passaria a ocupar seria mais próximo do volume:
- De um nêutron.
  - De uma gota d'água.
  - De uma bola de futebol.
  - Da Lua.
  - Do Sol.
- 13.** Misturam-se dois líquidos A e B. O líquido A possui volume de  $120\text{ cm}^3$  e densidade  $0,78\text{ g/cm}^3$ . O líquido B possui volume de  $200\text{ cm}^3$  e densidade  $0,56\text{ g/cm}^3$ . A densidade da mistura, em  $\text{g/cm}^3$ , é:  
a) 0,64      b) 0,67      c) 0,70      d) 1,34      e) 0,44
- 14.** (Fuvest-SP) Um ovo está no fundo de uma jarra com água pura. Adicionam-se aos poucos pequenas quantidades de sal. Num determinado momento, o ovo sobe e fica flutuando. Sendo  $d_s$  a densidade da solução salgada,  $d_o$  a densidade do ovo e  $d_a$  a densidade da água pura, podemos afirmar que:  
a)  $d_a < d_o < d_s$ .  
b)  $d_s < d_a < d_o$ .  
c)  $d_o < d_s < d_a$ .  
d)  $d_a < d_s < d_o$ .  
e)  $d_o < d_a < d_s$ .
- 15.** Num posto de gasolina, um elevador hidráulico deve erguer um automóvel de  $1000\text{ kg}$  de massa. Se o pistão sobre o qual está o carro tem área de  $600\text{ cm}^2$ , qual é o módulo da força que deve ser aplicada à outra extremidade do pistão, cuja área vale  $25\text{ cm}^2$ ? Adote  $g = 10\text{ m/s}^2$ .
- 16.** (Unicamp) Ao serem retirados  $128\text{ L}$  de água de uma caixa-d'água de forma cúbica, o nível de água baixa  $20\text{ cm}$ .
  - Calcule o comprimento das arestas da referida caixa.
  - Calcule sua capacidade em litros.

17. (Unicamp-SP) Um mergulhador persegue um peixe a 5 m abaixo da superfície do mar. O peixe foge da posição A e se esconde em uma gruta na posição B, conforme mostra a figura a seguir. A pressão atmosférica na superfície da água é igual a  $p_{atm} = 1.10^5 \text{ N/m}^2$ . Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$  e  $\rho_{água} = 1 \text{ g/cm}^3$ .



Eduardo Borges

- a) Qual é a pressão no mergulhador?  
b) Qual a variação de pressão sobre o peixe nas posições A e B?
18. (UFMG-1995) Um certo volume de água é colocado num tubo em U, aberto nas extremidades. Num dos ramos do tubo, adiciona-se um líquido de densidade menor que a da água, o qual não se mistura com ela. Após o equilíbrio, a posição dos dois líquidos no tubo está corretamente representada pela figura:

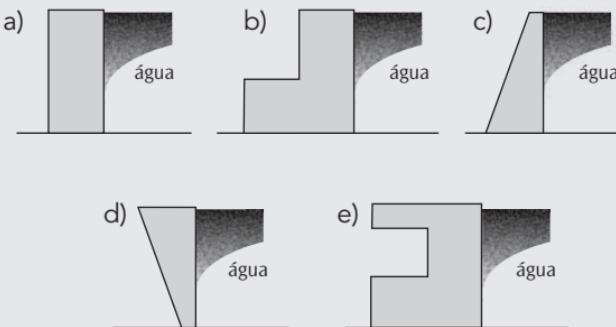


Eduardo Borges

## Descomplicando a Física

(Vunesp) Ao projetar uma represa, um engenheiro precisou aprovar o perfil de uma barragem sugerido pelo projeto da construtora. Admitindo-se que ele se baseou na Lei de Stevin, da hidrostática, em que a pressão de um líquido aumenta linearmente com a profundidade, assinale a opção que o engenheiro deve ter feito.

Resposta correta: Alternativa C.



### Resolução

A pressão na superfície da água é a pressão atmosférica local. À medida que aumenta a profundidade, a pressão aumenta também. De fato, cada 10 m de coluna de água exerce uma pressão de 1 atm.

A barragem deve ser mais larga na base que na parte superior, para poder suportar pressão maior.

Como a pressão aumenta linearmente com a profundidade, a espessura da barragem deve aumentar gradativamente.

# 14

# Introdução à termodinâmica

## Calor

É muito comum ouvirmos expressões como “amanhã deve fazer calor ... , amanhã chega à cidade uma frente fria ... ”, ou, ainda, “estou com calor ... ”, e uma série de outras expressões que promovem equívocos. Afinal, o contrário de frio é calor? Ou quente? Calor e quente são a mesma coisa? Um corpo armazena calor?

## Temperatura

Toda matéria ou corpo, independentemente do seu estado físico, é constituído de partículas, sejam elas átomos ou moléculas. Podemos imaginar essas partículas em constante movimento aleatório, o que lhes confere uma energia cinética. Esse movimento aleatório depende exclusivamente da temperatura do corpo. À medida que esse movimento se torna mais intenso, a energia cinética tende a aumentar e, em consequência, a temperatura também. Assim, temperatura é uma grandeza que traduz quão quente ou frio está um sistema.

Temperatura é uma medida da energia cinética média das partículas presentes em um corpo.

## Escalas termométricas

Duas escalas muito comumente utilizadas, Celsius e Fahrenheit, são denominadas escalas relativas por envolver uma escolha arbitrária de dois valores, os pontos fixos, como parâmetros de partida para elaboração da graduação. Assim, Celsius atribuiu o valor zero ao ponto de fusão da água ( $0^{\circ}\text{C}$ ) e o valor 100 ao ponto de ebulição da água ao nível do mar ( $100^{\circ}\text{C}$ ). Na escala Fahrenheit, esses mesmos fenômenos correspondem a  $32^{\circ}\text{F}$  e  $212^{\circ}\text{F}$ , respectivamente.

A escala Kelvin é denominada escala absoluta por apresentar o zero na situação de mínima energia cinética média das partículas, o zero absoluto ( $0\text{ K} = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Com isso, em valores inteiros,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  equivale a  $273\text{ K}$  (lê-se Kelvin e não “grau Kelvin”) e  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  equivale a  $373\text{ K}$ .

### **Exemplo**

Determine a única temperatura cuja indicação é a mesma nas escalas Celsius e Fahrenheit.

### **Resolução**

A relação entre as temperaturas na escala Celcius ( $T_c$ ) e na escala Fahrenheit ( $T_f$ ) pode ser expressa por:

$$\frac{T_c - 0}{100 - 0} = \frac{T_f - 32}{212 - 32}$$

A condição é:  $T_c = T_f = T$ . Portanto:

$$\frac{T - 0}{100 - 0} = \frac{T - 32}{212 - 32}$$

$$\frac{T}{100} = \frac{T - 32}{180}$$

$$180T = 100(T - 32)$$

$$80T = -3200$$

$$T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$$

e, então,  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} = -40\text{ }^{\circ}\text{F}$

## Lei Zero da Termodinâmica

Considerando um sistema de vários corpos, cada um a uma temperatura diferente, e que haja contato entre eles ou não, os corpos quentes vão esfriar e os corpos frios irão esquentar até que todos atinjam o mesmo estado térmico, isto é, a mesma temperatura. Em essência, essa é Lei Zero da Termodinâmica, uma lei da natureza que pode ser enunciada:

Se um corpo A está em equilíbrio térmico com um corpo B e este, por sua vez, está em equilíbrio com um corpo C, então, A está em equilíbrio com C.

## Calor, energia e temperatura: três conceitos, uma confusão

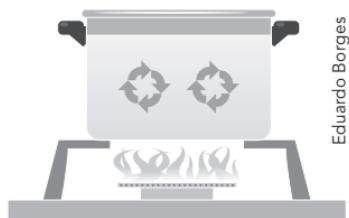
A temperatura está associada a uma energia que traduz o estado de agitação das partículas que constituem um corpo. Energia é uma propriedade dos corpos. Calor é um termo reservado para designar a existência de um fluxo de energia térmica entre dois corpos. Assim, corpos são capazes de armazenar energia nas suas mais diversas formas, mas não armazenam calor.

Calor é um fenômeno de fronteira entre dois corpos ou sistemas que ocorre quando a energia térmica é transferida de um corpo (ou sistema) de maior temperatura para outro de menor temperatura.

## Transferência de energia térmica

Há três formas de transmissão de energia térmica a partir de um lugar para outro: convecção, condução e radiação.

Convecção implica fluxo de material e, portanto, é característica de líquidos e gases. A massa do fluido em questão se desloca formando correntes de



Eduardo Borges

circulação no interior do líquido (ou gás, conforme o caso), denominadas correntes de convecção. Em suma, a matéria flui levando consigo a energia térmica.

O movimento do ar na atmosfera, e mesmo de massas de água nos oceanos, é resultado das correntes de convecção.

Condução é o processo de transmissão de energia que ocorre principalmente nos sólidos. Como o material não possui fluidez e as partículas que constituem o sistema estão próximas, sem sair do lugar, elas vibram em torno de sua posição e a energia é transferida de uma partícula a outra. Há fluxo de energia sem que haja fluxo de matéria.

Em sistemas em que a transmissão de energia ocorre por condução, podemos definir a grandeza fluxo de calor ( $\Phi$ ) como sendo a quantidade de energia ( $Q$ ) transmitida por intervalo de tempo ( $\Delta t$ ):

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Considere uma barra metálica de comprimento  $L$  e área de secção transversal  $A$ , tendo em uma das extremidades uma fonte de energia térmica. A “rapidez” com que a energia é transmitida por condução de uma extremidade a outra da barra pode ser expressa pela Lei de Fourier,

$$\Phi = \frac{k \cdot A \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{L},$$

onde  $k$  é uma constante que depende do material (denominada condutividade térmica do material) e  $\theta_1$  e  $\theta_2$  representam temperaturas em pontos distintos da barra, sendo  $\theta_1 > \theta_2$ .



Eduardo Borges

No SI as unidades são:

$\Phi$  é expresso em watt (W) ou J/s (1W = 1 J/s);

$k$  é expresso em W/(m · K);

$A$  é expresso em m<sup>2</sup>;

$L$  é expresso em m.

## Exemplo

Em uma residência, há uma vidraça de 5 m<sup>2</sup> e espessura 2 mm. Suponha que a temperatura no interior da residência seja de 20 °C e no exterior seja de 18 °C. Calcule o fluxo de energia através da vidraça. Considere, para o vidro,  $k = 0,84$  J/(s · m · K).

## Resolução

$$\Phi = \frac{k \cdot A \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{L}$$

$$\Phi = \frac{(0,84) \cdot (5) \cdot (20 - 18)}{2 \cdot 10^{-3}}$$

$$\Phi = 4200 \text{ J/s} = 4200 \text{ W}$$

*Irradiação térmica ou radiação térmica* é o processo de transmissão de energia associada à natureza eletromagnética da matéria. Uma radiação, ao atingir um corpo, aumenta a vibração das partículas elétricas no interior de suas moléculas, aumentando assim a energia cinética média. A transferência de energia se dá pela radiação infravermelha,



independentemente do meio material. Esse é o único modo de a transmissão de energia ocorrer na ausência de meio material.

## TESTE SEU SABER

1. (Fesp-SP) No texto de uma revista científica: "Em Plutão, o planeta mais afastado do Sol, a temperatura vai a 380 ° abaixo de zero". O autor, embora não tenha declarado qual a escala termométrica utilizada, certamente se refere, para a temperatura mencionada, à escala:
  - a) Kelvin.
  - b) Celsius.
  - c) Fahrenheit.
  - d) Diferente das anteriores, pois o valor não é compatível com nenhuma das três escalas.
2. Um estudante, no laboratório, deveria aquecer certa quantidade de água desde 25 °C até 70 °C. Depois de iniciada a experiência, ele quebrou o termômetro de escala Celsius e teve de continuá-la com outro de escala Kelvin. Em que posição do novo termômetro ele deve ter parado o aquecimento?
3. Um pesquisador construiu uma escala termométrica P com base nas temperaturas de fusão e ebulição do álcool etílico, tomadas como pontos 0 e 100 dessa escala. Na escala Celsius, aqueles dois pontos extremos da escala do pesquisador têm valores -118 °C e 78 °C. Qual a temperatura na escala Celsius corresponde a 80 P?
4. Por que os aquecedores são colocados na parte inferior dos ambientes, e os aparelhos de ar-condicionado, na parte superior?
5. Cobertor esquenta? Se você embrulhar uma pedra de gelo em um cobertor, ele vai derreter mais depressa do que desembrulhada? Explique.
6. Nos supermercados, os balcões frigoríficos são abertos e mesmo assim os alimentos são mantidos em temperaturas bem frias. Justifique.
7. Em relação à transmissão de calor, a afirmação errada é:
  - a) Nos sólidos, o calor se propaga principalmente por condução.

- b) A energia térmica pode ser transmitida por meio do vácuo apenas por meio da irradiação.
- c) Só haverá transmissão de calor de um ponto para outro quando houver diferença de temperatura entre os dois pontos.
- d) Na convecção não há transferência de matéria fria ou quente de um ponto para outro.
- e) A sensação de quente ou frio que sentimos ao tocar um objeto está relacionada com sua condutibilidade térmica.
- 8.** (PUC-SP) Nas garrafas térmicas, usa-se uma parede dupla de vidro. As paredes são espelhadas e entre elas há vácuo. Assinale a alternativa correta:
- a) O vácuo entre as paredes evita perdas de energia por irradiação.
- b) As paredes são espelhadas para evitar perdas de energia por condução.
- c) As paredes são espelhadas para evitar perdas de energia por convecção.
- d) O vácuo entre as paredes acelera o processo de convecção.
- e) As paredes são espelhadas para evitar perdas de energia por irradiação.
- 9.** (UFRN) Num dia quente de verão, sem vento, com a temperatura ambiente na marca dos  $38^{\circ}\text{C}$ , Seu Honório teria de permanecer bastante tempo na cozinha de sua casa. Para não sentir tanto calor, resolveu deixar a porta do refrigerador aberta, no intuito de esfriar a cozinha. A temperatura no interior da geladeira é de aproximadamente  $0^{\circ}\text{C}$ . A análise desta situação permite dizer que o objetivo do Seu Honório:
- a) Será alcançado, pois o refrigerador vai fazer o mesmo papel de um condicionador de ar, diminuindo a temperatura da cozinha.
- b) Não será atingido, pois o refrigerador vai transferir calor da cozinha para a própria cozinha, e isso não constitui um processo de refrigeração.
- c) Será alcançado, pois atingido o equilíbrio térmico, a cozinha terá sua temperatura reduzida para  $19^{\circ}\text{C}$ .
- d) Não será atingido, pois, com a porta do refrigerador aberta, tanto a cozinha como o próprio refrigerador terão suas temperaturas elevadas, ao receber calor do Seu Honório.
- e) Impossível prever o que ocorrerá.
- 10.** (UFRR) Colocam-se em um mesmo recipiente três termômetros: um Celsius, um Fahrenheit e um Kelvin. Aquece-se o sistema até a va-

riação de leitura fornecida pelo termômetro Celsius seja de 45 °C. Quais as variações de leitura obtidas pelos outros termômetros?

- a) 81 °F, 113 K.
- b) 81 °F, 45 K.
- c) 113 °F, 81 K.
- d) 113 °F, 45 K.
- e) 45 °F, 81 K.

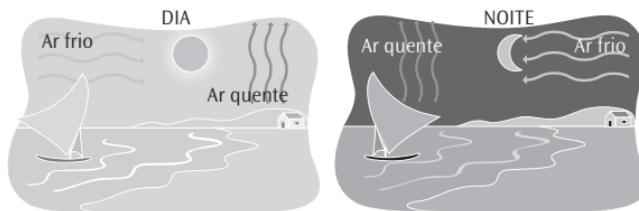
**11.** (Ufac) A temperatura de uma máquina na escala Fahrenheit é de 122 °F. Qual é sua temperatura na escala Celsius?

- a) 40°C.
- b) 46°C.
- c) 50°C.
- d) 60°C.
- e) 80°C.

**12.** Uma porca está muito apertada no parafuso. O que você deve fazer para afrouxá-la?

- a) É indiferente esfriar ou esquentar a porca.
- b) Esfriar a porca.
- c) Esquentar a porca.
- d) É indiferente esfriar ou esquentar o parafuso.
- e) Esquentar o parafuso.

**13.** Observe as figuras a seguir sobre a formação das brisas marítima e terrestre.



Eduardo Borges

Durante o dia, o ar próximo à areia da praia se aquece mais rapidamente que o ar próximo à superfície do mar. Dessa forma, o ar aquecido do continente sobe e o ar mais frio do mar desloca-se para o continente, formando a brisa marítima. À noite, o ar sobre o oceano permanece aquecido mais tempo que o ar sobre o continente, e o processo se inverte. Ocorre, então, a brisa terrestre.

Dentre as alternativas a seguir, indique a que explica, corretamente, o fenômeno apresentado.

- a) É um exemplo de convecção térmica e ocorre pelo fato de a água ter um calor específico maior que a areia. Dessa forma, a temperatura da areia se altera mais rapidamente.
- b) É um exemplo de condução térmica e ocorre pelo fato de a areia e a água serem bons condutores térmicos. Dessa forma, o calor se dissipa rapidamente.
- c) É um exemplo de irradiação térmica e ocorre pelo fato de a areia e a água serem bons condutores térmicos. Dessa forma, o calor se dissipa rapidamente.
- d) É um exemplo de convecção térmica e ocorre pelo fato de a água ter um calor específico menor que a areia. Dessa forma, a temperatura da areia se altera mais rapidamente.
- e) É um processo de estabelecimento do equilíbrio térmico e ocorre pelo fato de a água ter uma capacidade térmica desprezível.

## *Descomplicando a Física*

Por que se diz que durante o dia, numa região litorânea, os ventos são do mar para a terra e durante a noite, os ventos são da terra para o mar?

### **Resolução**

Durante o dia, o Sol aquece tanto a massa de água como o solo (terra). É fato que a terra aquece mais rapidamente que a água do mar. Isso pode ser evidenciado quando se chega à praia e a areia já está quente enquanto que a água está bem mais fria.

Isso faz com que a temperatura na superfície da terra, e por consequência o ar próximo a ela, esteja bem mais quente que o ar e a superfície do mar. Cria-se, assim, correntes de convecção em que o ar quente sobe, dando lugar para o ar mais frio que vem do mar (brisa marítima). Durante o dia, portanto, o vento sopra do mar para a terra.

À noite, os papéis se invertem. Da mesma maneira que a terra é aquecida mais rapidamente, ela também resfria mais rápido. Analogamente, o sentido de deslocamento das massas de ar se inverte e à noite o vento sopra da terra para o mar.

# 15

# Dilatação térmica

Ao sofrer variação de temperatura, todo corpo, em geral, independentemente do seu estado físico, sofre dilatação ou contração de volume, a chamada dilatação volumétrica. Em regra, o aumento de temperatura está associado ao aumento de volume do corpo, e o resfriamento, à contração de volume. Esse princípio é explorado em várias situações: na confecção de instrumentos de medida de temperatura como termômetros e termopares, no espaçamento que deve ser deixado entre estruturas como trilhos de trem e de pontes, entre outras.

## Dilatação linear

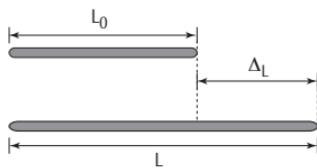
A variação no comprimento ( $\Delta L$ ) de um corpo está diretamente relacionada à variação de temperatura sofrida, ao tipo de material do qual ele é composto e ao comprimento do corpo.

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta q$$

Onde:  $L_0$  é o comprimento inicial do corpo;

$\alpha$  é denominado coeficiente de dilatação linear, relacionado ao tipo de material que constitui o corpo, comumente expresso em  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

$\Delta q$  é a variação de temperatura sofrida pelo corpo.



## Coeficientes de dilatação linear ( $\alpha$ ) de alguns materiais a 20 °C

Material	$\alpha$ (em $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
Alumínio	$23 \times 10^{-6}$
Aço	$12 \times 10^{-6}$
Bronze	$18 \times 10^{-6}$
Carbono	$8 \times 10^{-6}$
Cobre	$17 \times 10^{-6}$
Chumbo	$29 \times 10^{-6}$
Quartzo	$0,5 \times 10^{-6}$
Vidro comum	$9 \times 10^{-6}$
Vidro Pyrex	$1,2 \times 10^{-6}$
Concreto	$12 \times 10^{-6}$

### Exemplo

Um trilho de aço tem 100 m de comprimento a 10 °C. Qual o comprimento alcançado quando sua temperatura chegar a 30 °C?  
( $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

### Resolução

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta q$$

$$\Delta L = 100 \cdot (1,2 \cdot 10^{-5}) \cdot 20$$

$$\Delta L = 0,024 \text{ m}$$

O comprimento final será: 100,024 m.

## Dilatação superficial

A variação na área ( $\Delta A$ ) da superfície de um corpo está diretamente relacionada à variação de temperatura sofrida, ao tipo de material do qual ele é composto e à área original do corpo.

$$\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta q$$

Onde:  $A_0$  é a área original do corpo;

$\beta$  é denominado coeficiente de dilatação superficial, relacionado ao tipo de material que constitui o corpo, comumente expresso em  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$\Delta q$  é a variação de temperatura sofrida pelo corpo.



## Dilatação volumétrica

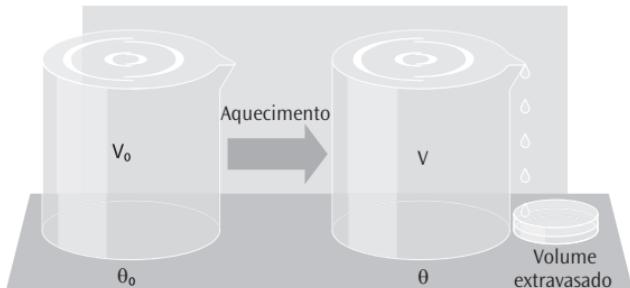
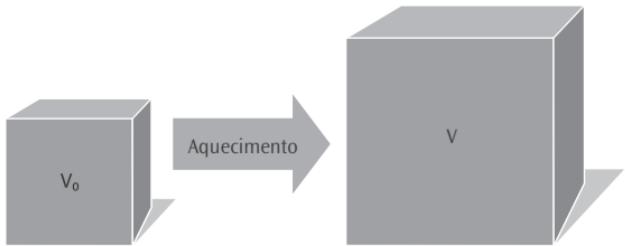
A variação de volume ( $\Delta V$ ) de um corpo está diretamente relacionada à variação de temperatura sofrida, ao tipo de material do qual ele é composto e ao volume original do corpo.

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta q$$

Onde:  $V_0$  é o volume original do corpo;

$\gamma$  é denominado coeficiente de dilatação volumétrica, relacionado ao tipo de material que constitui o corpo, comumente expresso em  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$\Delta q$  é a variação de temperatura sofrida pelo corpo.



Os coeficientes de dilatação estão relacionados:

$$\beta = 2\alpha$$

$$\gamma = 3\alpha$$

Obs.: Para todo e qualquer gás, o coeficiente de dilatação volumétrico é o mesmo:  $\gamma = (1/273)^\circ\text{C}^{-1}$ .

### Saiba



Afinal, se, em geral, todo corpo sofre dilatação volumétrica, por que trabalhar com dilatação superficial ou linear?

Em algum problema ou contexto, por vezes, pode-se desejar analisar a dilatação em uma única dimensão, sendo desprezível a variação da área da seção transversal de um corpo. Pode ser o caso, por exemplo,

Continua...

a análise da dilatação de fios, cabos e trilhos de trem. Neste caso, a situação pode ser simplificada por meio da expressão de dilatação linear.

Raciocínio análogo pode levar à opção de se tratar o problema como dilatação superficial, caso uma das dimensões possa ser desprezada.

## Comportamento anômalo da água

Em regra, todo corpo aumenta de volume quando sofre aumento de temperatura. A dilatação da água apresenta uma anomalia no intervalo de temperatura de 0 °C a 4 °C. À medida que uma massa de água é aquecida, de 0 °C até 4 °C, o seu volume diminui. Continuando o aquecimento, a partir de 4 °C, seu volume volta a aumentar.

### TESTE SEU SABER

1. É comum um copo ficar preso dentro de outro. Como você poderia soltá-lo raciocinando termodinamicamente? Explique.
2. O tanque de gasolina de um carro tem capacidade para 50L. Suponha que o proprietário encha o tanque numa manhã, na sombra, a 15 °C, e logo depois estacione o carro ao sol, que, inclemente, faz a temperatura atingir 35 °C. Considerando desprezível a variação de volume do tanque, qual o volume de gasolina que vazou do tanque? ( $\gamma = 9,6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
3. Para o ajuste sem folga, os rebites de alumínio usados na fabricação de aviões são ligeiramente maiores que os furos. Para passar sem folga pelos furos, são resfriados com gelo seco a -78 °C. O diâmetro do furo a 20 °C é de 0,635 cm. Qual o diâmetro do rebite a 20 °C? (Alumínio:  $\alpha = 2,4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .)
4. O vidro "Pirex" apresenta maior resistência ao choque térmico do que o vidro comum porque:
  - a) Possui alto coeficiente de rigidez.

- b) Tem baixo coeficiente de dilatação térmica.
  - c) Tem alto coeficiente de dilatação térmica.
  - d) Tem alto calor específico.
  - e) É mais maleável que o vidro comum.
5. (Uerj) Um frasco completamente cheio de água é aquecido e transborda um pouco do líquido. O volume transbordado mede:
- a) A dilatação absoluta da água.
  - b) A dilatação absoluta do frasco.
  - c) A dilatação aparente da água.
  - d) A dilatação do frasco mais a da água.
  - e) A dilatação relativa do líquido.
6. (PUCC-SP) Um pino metálico, a uma dada temperatura, ajusta-se perfeitamente em um orifício de uma placa metálica. Se somente a placa for aquecida, verifica-se que:
- a) Haverá contração apenas do orifício da placa.
  - b) Haverá contração do pino da placa.
  - c) O pino não mais passará pelo orifício.
  - d) O pino passará mais facilmente pelo orifício.
  - e) Nenhuma das anteriores.
7. (UFRS) A expressão “dilatação anômala da água” refere-se ao fato de uma determinada massa de água, sob pressão constante:
- a) Possuir volume máximo a 4 °C.
  - b) Aumentar sua densidade quando sua temperatura aumenta de 0 °C para 4 °C.
  - c) Aumentar de volume quando sua temperatura aumenta de 0 °C para 4 °C.
  - d) Reduzir-se de volume quando sua temperatura aumenta a partir de 4 °C.
  - e) Possuir uma massa específica constante acima de 4 °C.
8. (ITA-SP) Você é convidado para projetar uma ponte metálica cujo comprimento será de 2 km. Considerando os efeitos da contração e da expansão térmica para temperaturas no intervalo de -40 °F e 110 °F e o coeficiente de dilatação linear do metal é de  $12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , qual a máxima variação

esperada no comprimento da ponte? (O coeficiente de dilatação linear é constante no intervalo de temperatura considerado.)  
a) 9,3 m      b) 2 m      c) 3 m      d) 0,93 m      e) 6,5 m

## Descomplicando a Física

(Unirio) Um industrial propôs construir termômetros comuns de vidro, para medir temperaturas ambientes entre 1°C e 40 °C, substituindo o mercúrio por água destilada. Cristóvão, um físico, se opôs, justificando que as leituras no termômetro não seriam confiáveis, porque:

- a) A perda de calor por radiação é grande.
- b) O coeficiente de dilatação da água é constante no intervalo de 0 °C a 100 °C.
- c) O coeficiente de dilatação da água entre 0 °C e 4 °C é negativo.
- d) O calor específico do vidro é maior que o da água.
- e) Há necessidade de um tubo capilar de altura aproximadamente 13 vezes maior que o exigido pelo mercúrio.

Resposta correta: Alternativa C.

### Resolução

Em regra, quando os corpos são resfriados, eles sofrem uma contração em seu volume. A água pura, no entanto, é uma substância que possui a particularidade de se expandir ao ser resfriada, no intervalo de 4 °C a 0 °C.

Devido a essa característica, tal substância não é indicada para servir como matéria termoscópica, até porque, no intervalo mencionado, seu comportamento, quanto à variação de volume, não é linear, e, provavelmente, o termômetro se romperia.

# 16 Transformações gasosas

Vivemos rodeados por uma camada de gases conhecida como atmosfera, sem a qual seria impossível a manutenção da vida no planeta. A matéria no estado gasoso tem inúmeras aplicações. Dentro elas podemos citar os gases utilizados em sistemas de refrigeração de geladeiras e aparelhos de ar-condicionado, que realizam trocas de calor, e alguns sprays, que utilizam um gás para empurrar líquidos para fora da embalagem (gases propelentes). A possibilidade de expansão e compressão dos gases, propriedades características desse estado da matéria, permite o funcionamento dos motores à explosão interna dos automóveis, por exemplo.

Para se descrever uma determinada massa gasosa, deve-se levar em consideração ao menos três fatores: a pressão, o volume e a temperatura – as variáveis de estado – de um gás.

Define-se pressão ( $p$ ) como sendo a relação entre uma força ( $F$ ) aplicada e a área ( $S$ ) sobre a qual a força atua. ( $p = F/S$ .)

Saiba



Para um gás, a pressão está relacionada à força exercida sobre as paredes do recipiente com as quais ele se choca continuamente. Quanto maior a frequência e a intensidade do choque, maior a pressão por ele exercida.

Observe, no entanto, que a definição de pressão apresentada se baseia na interação entre o gás e a superfície que o confina (sólida ou líquida). Para se definir pressão de um gás em função de suas propriedades, é necessário entender o que é um gás e como ele se comporta – objetivo da *teoria cinética dos gases*.

Os gases da atmosfera exercem uma força sobre a superfície do nosso planeta, resultando no que denominamos pressão atmosférica.

A pressão é comumente expressa em atmosfera (atm), milímetros de mercúrio (mmHg), Torricelli (torr), Pascal (Pa), entre outras unidades.

Para converter uma unidade em outra, podemos utilizar:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ torr}$$

$$1 \text{ mmHg} = 1 \text{ torr} = 1/760 \text{ atm}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 \text{ (unidade do SI).}$$

O volume de um gás representa o espaço físico que ele ocupa. As unidades comumentes utilizadas são: litros (L), metros cúbicos ( $\text{m}^3$ ), decímetros cúbicos ( $\text{dm}^3$ ), entre outras. Para conversão entre unidades de medida, podemos relacionar:

$$1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ dm}^3 = 10^3 \text{ L}$$

$$1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ L} = 10^3 \text{ cm}^3 = 10^3 \text{ mL}$$

$$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL} = 10^{-3} \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ L}$$

A temperatura de um sistema expressa a agitação entre as partículas do gás. Quanto maior for a temperatura, mais agitadas estarão essas partículas e, portanto, maior será a energia cinética média.

A temperatura pode ser expressa em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), Kelvin (K), entre outras. Muito frequentemente, no entanto, trabalha-se com a temperatura na escala Kelvin, visto que algumas definições exigem que ela esteja em uma escala absoluta.

Para converter uma medida de temperatura na escala Celsius em Kelvin (e vice-versa), utilizamos a relação:

$$T_k = T_c + 273$$

Onde:  $T_k$  = temperatura em Kelvin;

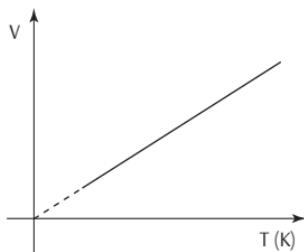
$T_c$  = temperatura em graus Celsius.

Vimos que em uma transformação gasosa qualquer há alteração de pelo menos duas variáveis de estado. Assim, considerando um gás que se comporta conforme descrito pela teoria cinética (gás ideal ou gás perfeito), três situações particulares podem ser expli-citadas, conforme tabela a seguir.

#### Transformações gasosas

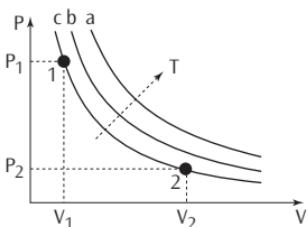
Transformação	Característica	Expressão matemática
Isobárica (Lei de Charles – Gay-Lussac)	Pressão constante	$V_i/T_i = V_f/T_f$
Isotérmica (Lei de Boyle – Mariotte)	Temperatura constante	$p_i \cdot V_i = p_f \cdot V_f$
Isocórica, isométrica ou isovolumétrica	Volume constante	$p_i/T_i = p_f/T_f$

### Transformação isobárica



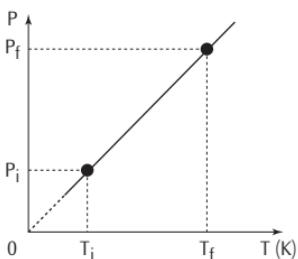
Observe que a temperatura se apresenta em uma escala ab-soluta. O segmento tracejado representa situações em que o gás já não existe.

## Transformação isotérmica



Cada uma das curvas a, b e c representa uma isotermia ( $T_a > T_b > T_c$ ).

## Transformação isocórica



### Exemplos

- Uma câmara usada por mergulhadores tem volume de 10,3 m<sup>3</sup> e funciona sob pressão de 4,5 atm. Qual o volume que o ar ocuparia quando submetido a uma pressão de 1 atm, na mesma temperatura?

## Resolução

$$p_i V_i = p_f V_f$$

$$10,3 \cdot 4,5 = 1 \cdot V_f$$

$$V_f = 46,35 \text{ m}^3$$

- b) Um balão selado, quando cheio de ar, tem volume de  $50 \text{ m}^3$  a  $22^\circ\text{C}$  e a uma dada pressão. O balão é aquecido. Assumindo que a pressão se mantenha constante, a que temperatura estará o balão quando seu volume for  $60 \text{ m}^3$ ?

## Resolução

As temperaturas devem estar expressas na escala Kelvin:  $T = t_c + 273$

$$\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_f}{T_f}$$

$$\frac{50}{295} = \frac{60}{T_f}$$

$$T_f = 354 \text{ K}$$

- c) Certa massa de gás hélio, mantida em um recipiente fechado a  $-33^\circ\text{C}$ , exerce uma pressão de 1,5 atm. Calcule a qual temperatura a pressão do gás hélio nesse recipiente será igual 0,25 atm.

## Resolução

Para uma massa de gás a volume constante, vale a relação:

$$\frac{P_i}{T_i} = \frac{P_f}{T_f},$$

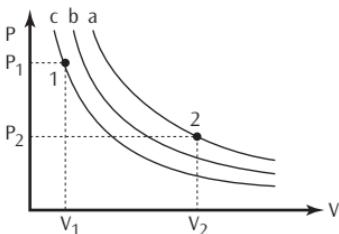
onde as temperaturas devem ser expressas na escala Kelvin:  
 $T = t_c + 273$

$$\frac{1,5}{250} = \frac{0,25}{T_f}$$

$$T_f = 40 \text{ K}$$

## Equação geral dos gases

Considere, representada no gráfico a seguir, a transformação de uma determinada massa gasosa, em que o estado inicial é descrito pelo ponto 1, e o estado final, pelo ponto 2. Essa transformação não se enquadra em nenhuma das três situações particulares descrita anteriormente. Podemos, no entanto, tratá-la como um par de transformações, uma isobárica (de c para a, a partir de 1), seguida de uma isotérmica.



Pode-se demonstrar que, em casos como esse, vale a relação, denominada equação geral dos gases:

$$\frac{(p_i \cdot V_i)}{T_i} = C, \quad \text{onde } C \text{ é uma constante,}$$

o que nos leva a

$$\frac{(p_i \cdot V_i)}{T_i} = \frac{(p_f \cdot V_f)}{T_f}$$

onde os índices i e f representam dois estágios distintos quaisquer defasados por um intervalo de tempo, podendo inclusive representar os estágios inicial (i) e final (f).

## Exemplo

A partir de dados enviados de Vênus por sondas espaciais norte-americanas e russas, pode-se considerar que, em certos pontos da superfície desse planeta, a temperatura é de 327 °C e a pressão atmosférica é de 100 atm. Sabendo-se que na superfície da Terra o volume de um mol de um gás ideal é 24,6 L a 27 °C e 1,0 atm, qual seria o valor desse volume nesses pontos de Vênus?

## Resolução

Lembrando que as temperaturas devem ser expressas em Kelvin ( $T = t_c + 273$ ), a partir da equação geral dos gases, temos:

$$\frac{(p_i \cdot V_i)}{T_i} = \frac{(p_f \cdot V_f)}{T_f}$$

$$\frac{(100 \cdot V_i)}{600} = \frac{(1,0 \cdot 24,6)}{300}$$

$$100 \cdot 300 \cdot V_i = 600 \cdot 1 \cdot 24,6$$

$$V_i = 0,492 \text{ L}$$

## Teoria cinética dos gases

Para explicar as propriedades dos gases, foi desenvolvida a **teoria cinética dos gases**, que pode ser resumida da seguinte forma:

1. Todo gás é constituído de um número enorme de moléculas.
2. As moléculas possuem dimensões desprezíveis em relação às distâncias médias entre elas.
3. As moléculas movem-se continuamente em todas as direções, por isso os gases ocupam todo o volume do recipiente que o contém.

4. Entre as moléculas de um gás, só há interação quando há colisão entre elas. As colisões ocorrem em um breve intervalo de tempo, desprezível se comparado ao intervalo de tempo médio decorrente entre uma colisão e outra. Entre duas colisões, as moléculas estão separadas e executam movimento retilíneo uniforme.
5. Devido à movimentação livre, ocorrem choques das moléculas entre si e contra as paredes internas do recipiente que contém o gás. As colisões são perfeitamente elásticas, isto é, não há perda nem ganho de energia para o meio. A energia cinética total das moléculas permanece constante.

## Atenção

Média de velocidade não é velocidade média. Um grupo de veículos se desloca por uma via em um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Cada um possui uma velocidade média. A média das velocidades é uma referência ao grupo.

Para  $n$  mols de um gás de massa molecular  $M$ , a expressão toma a forma:

$$P = \frac{n \cdot M \cdot v^2}{3V}$$

A teoria cinética também permite estabelecer uma expressão para a temperatura  $T$  de uma amostra de gás:

$$T = \frac{m \cdot v^2}{3R}$$

ou

$$T = \frac{M \cdot v^2}{3k},$$

sendo  $R$  a constante universal dos gases perfeitos de valor igual a  $8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  e  $k$  a constante de Boltzmann, cujo valor, no SI, é  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ .

Essas relações nos mostram que a temperatura de um gás está ligada com a energia das partículas que constituem um gás, denominada *energia interna*. Tal conceito será discutido oportunamente.

Essas hipóteses fornecem uma ideia razoável do comportamento de um gás e, a partir delas, pode-se demonstrar que a pressão  $p$  exercida por  $N$  moléculas um gás em um recipiente de volume  $V$ , onde cada molécula possui massa  $m$ , pode ser expressa por

$$p = \frac{N \cdot m \cdot v^2}{3V},$$

onde  $v$  (minúsculo) representa a média das velocidades das moléculas.

## Alteração da pressão de um gás

Para alterar a pressão de um gás, é necessário alterar o número de colisões entre as partículas e as paredes internas do recipiente que o confina. Para tanto, uma possibilidade é alterar o volume do recipiente.

Diminuindo-se o volume do recipiente, mantendo inalteradas a temperatura e a massa do gás, as partículas que compõem o gás estarão mais próximas umas das outras, e o número de colisões deve aumentar, elevando a pressão do gás. Por analogia, aumentando-se o volume, a pressão do gás diminui.

Outra possibilidade para se alterar o número de colisões consiste em variar a temperatura. Para uma determinada massa gasosa, considerando inalterado o volume, o aumento da temperatura implica o aumento da energia cinética média das partículas e, por conseguinte, as colisões se tornam mais intensas. Assim, o aumento da temperatura provoca o aumento de pressão; a diminuição da temperatura provoca a diminuição da pressão.

Resumidamente, considerando uma amostra de gás de massa constante: à temperatura constante, pressão e volume são grandezas inversamente proporcionais; volume constante, pressão e temperatura são grandezas diretamente proporcionais.

## CNTP, TPN ou CN

Quando um gás encontra-se à temperatura de 0 °C e sob pressão de 1 atmosfera (1 atm, pressão ao nível do mar ou pressão normal), dizemos que ele se encontra em CNTP, CN ou TPN.

## Volume molar

O volume molar de um gás é aquele ocupado por um mol desse gás. Nas CNTP este valor é de 22,4 L.

## Equação de Clapeyron

Um mol de um gás contém sempre um número fixo de moléculas.

$$\frac{(p_i \cdot V_i)}{T_i} = C$$

O termo C está relacionado ao número de partículas do gás, mais exatamente ao número de mol (n) desse gás. Portanto, a menos de uma constante R (constante universal dos gases), temos

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T,$$

onde:  $R = 0,082 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

## Exemplo

Qual o volume de um balão com 44 g de gás hélio, utilizado em parques de diversões ou em propagandas, num dia em que a temperatura é de 28 °C e a pressão no interior do balão é 2,5 atm?

## Resolução

$T = 301\text{ K} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$  e, portanto:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$2,5 \cdot V = 11 \cdot 0,082 \cdot 301$$

$$V = 108,6\text{ L.}$$

## TESTE SEU SABER

1. Dispomos de 22,4 L de oxigênio que se acham à pressão de  $2 \times 10^5\text{ N/m}^2$  ( $R = 8,3$  unidades do SI). Podemos afirmar que:
  - Sua temperatura é 273 K.
  - Sua temperatura é 546 K.
  - Sua temperatura é  $(5,4 \times 10^5)$  K.
  - Sua temperatura é  $(2,7 \times 10^5)$  K.
  - Não temos dados suficientes para calcular sua temperatura.
2. (Furg-RS) Certa quantidade de gás ideal, inicialmente à pressão  $P_0$ , volume  $V_0$  e temperatura  $T_0$ , é submetida à seguinte sequência de transformações:
  - É aquecida a pressão constante até que sua temperatura termodinâmica triplique.
  - É resfriada a volume constante até que a temperatura atinja o valor inicial  $T_0$ .
  - É comprimida à temperatura constante até que atinja a pressão inicial  $P_0$ .Ao final desses três processos, podemos afirmar que o volume final do gás será igual a:
  - $V_0/9$
  - $V_0/3$
  - $V_0$
  - $3V_0$
  - $9V_0$
3. Certa massa gasosa é comprimida isotermicamente até que sua pressão torne-se 4 vezes maior que o valor inicial. Se a densidade inicial do gás era de 0,2 g/L, sua densidade final será, em g/L:
  - 0,2
  - 0,4
  - 0,8
  - 1
  - 2

4. Uma pessoa calibra os pneus de seu carro em um posto de gasolina. O manômetro do posto indica a pressão 26 libras/pol<sup>2</sup>, e a temperatura neste momento é de 17 °C. Após rodar alguns quilômetros, devido ao atrito do pneu com a estrada, a temperatura do ar em seu interior atinge 37 °C. Considerando desprezível a dilatação do pneu, qual sua nova pressão em libras/pol<sup>2</sup>?
5. Um gás, a 27 °C, tem volume de 2000 cm<sup>3</sup> e pressão de 0,9 atm. Determine a nova pressão do gás se ele for comprimido isotermicamente até que seu volume seja reduzido de 10% do seu valor inicial.
6. Um *freezer* foi ligado quando a temperatura do ar em seu interior era 27 °C e a pressão exercida por ele sobre as paredes internas era 700 mmHg. Determine a pressão exercida pelo ar interior quando a temperatura baixar para -23 °C. Explique por que se torna difícil abrir a porta do *freezer* após seu fechamento.
7. (PUC-SP) Um recipiente rígido contém 2 gramas de oxigênio à pressão de 20 atmosferas e temperatura de 47 °C. Sabendo que a massa molecular do oxigênio é 32 e que  $R = 0,082 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$ , o *volume* do recipiente é, em litros:  
a) 0,082      b) 0,820      c) 0,078      d) 0,780      e) 0,069
8. (Vunesp-SP) Duas amostras de um gás perfeito submetidas a uma mesma pressão ocupam volumes iguais quando a temperatura da primeira é 10 °C e da segunda 100 °C. A relação entre os números de mols é:  
a) 1:1,32      b) 1:0,76      c) 1:10      d) 1:0,1      e) 1:0,33
9. (PUC-SP) Certo gás ocupa um volume de 41 litros, sob pressão de 2,9 atmosferas à temperatura de 17 °C. O número de Avogadro vale  $6,02 \times 10^{23}$  e a constante universal dos gases perfeitos  $R = 0,082 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$ . Nessas condições, o número de moléculas contidas no gás é de, aproximadamente:  
a)  $3 \cdot 10^{24}$       b)  $5 \cdot 10^{23}$       c)  $6,02 \cdot 10^{23}$       d)  $2 \cdot 10^{24}$       e)  $3 \cdot 10^{29}$
10. (Uespi) Sob certas circunstâncias, o comportamento de um gás real aproxima-se daquele previsto para um gás ideal. Isto acontece quando o gás real é submetido a:  
a) Altas pressões e baixas temperaturas.  
b) Altas pressões e altas temperaturas.

- c) Baixas pressões e altas temperaturas.  
d) Baixas pressões e baixas temperaturas.  
e) Baixas temperaturas.
- 11.** (Unimep-SP) Assinale a alternativa correta.
- a) Nas CNTP, o volume ocupado por um mol de certo gás ideal depende do número de moléculas.
  - b) Na equação de Clapeyron ( $pV = nRT$ ), o valor de  $R$  depende das unidades de pressão e volume.
  - c) Numa transformação de estado de um gás, a pressão sempre aumenta com o aumento de volume.
  - d) As variáveis de estado de um gás são: massa, volume e número de moléculas.
- 12.** (PUCCamp-SP) Um recipiente rígido contém gás perfeito sob pressão de 3 atm. Sem deixar variar a temperatura, são retirados 4 mols do gás, fazendo com que a pressão se reduza a 1 atm. O número de mols existente inicialmente no recipiente era:
- a) 6
  - b) 8
  - c) 10
  - d) 12
  - e) 16

### *Descomplicando a Física*

(ITA-2006) Sejam o recipiente (1), com 1 mol de  $H_2$  (massa molecular  $M = 2$ ) e o recipiente (2) com 1 mol de He (massa atômica  $M = 4$ ) ocupando o mesmo volume, ambos mantidos a mesma pressão. Assinale a alternativa correta.

- a) A temperatura do gás no recipiente 1 é menor que a temperatura do gás no recipiente 2.
- b) A temperatura do gás no recipiente 1 é maior que a temperatura do gás no recipiente 2.
- c) A energia cinética média por molécula do recipiente 1 é maior que a do recipiente 2.
- d) O valor médio da velocidade das moléculas no recipiente 1 é menor que o valor médio da velocidade das moléculas no recipiente 2.
- e) O valor médio da velocidade das moléculas no recipiente 1 é maior que o valor médio da velocidade das moléculas no recipiente 2.

Continua...

Resposta correta: Alternativa E.

### Resolução

Considerando que os gases mencionados na questão estão sujeitos à mesma pressão, ocupando o mesmo volume e com o mesmo número de mols, a expressão de Clapeyron nos mostra que ambos possuem a mesma temperatura.

A temperatura é uma medida da energia cinética média das partículas. Conclui-se que esta energia cinética média é a mesma para os dois gases mencionados.

A energia cinética, por sua vez, está relacionada com a massa e a velocidade de um corpo. Sabendo-se que as massas molares dos gases mencionados são diferentes, aquele que apresentar a menor massa molar deverá ter a maior velocidade média entre suas moléculas.

Por que determinados materiais, ao tato, nos parecem mais quentes que outros? Por que determinados materiais esquentam mais facilmente que outros? O que ferve mais rapidamente: água ou leite? Quando fornecemos energia térmica a um corpo, ele realmente esquenta? Estas são algumas entre muitas outras questões do dia a dia em que a simples análise pelo senso comum pode nos levar a conclusões equivocadas.

### Unidades de calor

Joseph Black (1728-1799) foi o primeiro indivíduo a perceber que a variação de temperatura de um corpo poderia ser usada para determinar a quantidade de calor absorvida (ou cedida) por ele. Assim, ele definiu uma unidade de calor:

"Uma caloria é a quantidade de calor necessária para elevar de 1 °C a temperatura de 1 g de água."

Mais tarde, percebeu-se que essa quantidade de calor variava um pouco, dependendo da temperatura inicial da água. Dessa forma, foi escolhido um intervalo de temperatura, e a definição de caloria sofreu ligeira alteração:

"Uma caloria é a quantidade de calor necessária para elevar de 14,5 °C para 15,5 °C a temperatura de 1 g de água."

No SI, a unidade de energia é o joule (J). Com isso, modernamente, tem-se, precisamente

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

e, hoje, a definição de caloria não depende mais da água.

## Capacidade térmica de um corpo

Capacidade térmica (C) é a grandeza que corresponde à quantidade de energia térmica que deve ser transferida a um corpo para promover uma variação de temperatura de uma unidade. Assim sendo, para um corpo que sofre uma variação de temperatura  $\Delta T$  quando recebe uma quantidade de energia térmica  $\Delta Q_s$  (denominada calor sensível), podemos expressar:

$$C = \frac{\Delta Q_s}{\Delta T}$$

A capacidade térmica é comumente expressa em J/K (SI), J/ $^{\circ}$ C, kcal/ $^{\circ}$ C ou em cal/ $^{\circ}$ C.

### Atenção

1 kcal = 4,186 kJ (exatamente)

1 kcal = 1000 cal

Em algumas literaturas, a unidade kcal, também expressa como Cal, é denominada *grande caloria*, e a unidade cal, *pequena caloria*; não é recomendável, no entanto, tais nomenclaturas, a fim de se evitar confusões.

As necessidades nutricionais diárias de um indivíduo, em termos energéticos, giram em torno de 2000 kcal, dependendo de suas atividades. Alguns profissionais de saúde usam o termo caloria (em referência à grande caloria) para expressar a dieta do indivíduo. Em verdade o correto é expressar a quantidade em kcal.

## Variação de energia térmica e de temperatura – Calor sensível

A capacidade térmica de um corpo depende da massa (m) e do tipo de material do qual o corpo é composto. Para cada substância

existe uma propriedade a ela relacionada, o calor específico sensível ( $c$ ), muitas vezes denominado simplesmente calor específico, traduzindo a dificuldade que uma substância tem de ser aquecida ou resfriada. Assim sendo, podemos escrever:

$$c = \frac{C}{m},$$

que pode ser reescrita na forma:  $\Delta Q_s = m \cdot c \cdot \Delta T$ ,

o que nos mostra que a variação de energia térmica de um corpo está relacionada à massa, à variação de temperatura e a uma característica do material que compõe o corpo.

**Tabela de calor específico sensível de algumas substâncias**

Substância	Calor específico (cal/g.°C)
Água	1,0
Álcool	0,6
Alumínio	0,22
Carbono	0,12
Chumbo	0,031
Cobre	0,093
Ferro	0,11
Gelo	0,5
Hélio	1,25
Hidrogênio	3,4
Mercúrio	0,033
Nitrogênio	0,25
Ouro	0,032

Continua...

Substância	Calor específico (cal/g.°C)
Oxigênio	0,22
Prata	0,056
Zinco	0,093

## Exemplos

- a) Um corpo de 400 g, ao receber 800 cal, tem sua temperatura elevada de 10°C para 50°C. Calcule a capacidade térmica do corpo e o calor específico da substância que o constitui.

## Resolução

$$C = \frac{\Delta Q_s}{T}$$

$$C = \frac{800}{50 - 10}$$

$$C = 20 \text{ cal/}^{\circ}\text{C}$$

O calor específico será:

$$c = \frac{C}{m}$$

$$c = \frac{20}{400}$$

$$c = 0,05 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C.}$$

- b) Tem-se uma amostra de 250 g de água a 20 °C. Calcule a energia necessária para:
- Elevar a temperatura da amostra a 60 °C.
  - Elevar a temperatura da amostra de 60 °C.

## Resolução

- a) A temperatura final da amostra é 60 °C. Então,  $\Delta T = T_f - T_i$ :

$$\Delta Q_s = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$\Delta Q_s = 250 \cdot 1 \cdot (60 - 20)$$

$$\Delta Q_s = 10000 \text{ cal}$$

- b) Neste caso,  $\Delta T = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , ou seja, a temperatura final da amostra será 80 °C.

$$\Delta Q_s = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$\Delta Q_s = 250 \cdot 1 \cdot 60$$

$$\Delta Q_s = 15000 \text{ cal}$$

Saiba



### *Energia térmica e meio ambiente*

Um dos fatores que influencia a temperatura de uma região é a cobertura do solo.

A água absorve de 60% a 90% da luz do Sol, dependendo da posição relativa do Sol no céu. A areia seca absorve cerca de 75% da luz do Sol; o campo lavrado, 75% a 95%; a neve, 25%; o campo gramado, 80% a 90%; e as florestas, 95% da luz solar.

A água, no entanto, é uma das substâncias de maior calor específico.

A amplitude térmica (diferença entre a maior e a menor temperatura de uma região em um determinado período) em regiões onde há grandes massas de água, como lagos, rios e mares, é menor que em regiões onde não há água. Isso porque a água, em função do seu calor específico, é aquecida lentamente durante o dia e, com a mesma dificuldade que é aquecida, ela é resfriada, isto é, durante a noite, quando a água libera essa energia para o meio ambiente, ela o faz com a mesma lentidão, evitando que a temperatura caia muito.

Em desertos ou regiões onde não há grandes massas de água, pelo fato de a areia possuir um calor específico pequeno, ela se aquece e se resfria relativamente mais rápido. Como consequência, em regiões

Continua...

desérticas, os dias são excessivamente quentes, e as noites, excessivamente frias.

Diante dessas informações, é possível perceber como o desmatamento altera a temperatura ambiente e, por consequência, de todo o clima e do ecossistema de uma região.

## Variação da energia térmica e mudança de estado físico – Calor latente

Ao fornecer energia térmica a um sistema ou corpo, não necessariamente haverá variação de temperatura. Essa energia pode exercer a função de romper as interações entre as partículas que compõem o corpo, ocasionando uma mudança de estado físico. A essa energia transferida dá-se o nome de calor latente ( $\Delta Q_L$ ).

A quantidade de calor latente ( $\Delta Q_L$ ) necessária para promover uma mudança de estado físico depende da massa e do calor específico latente ( $L$ ), também designado apenas como calor latente, da substância que compõe o sistema. Para cada mudança de estado físico, uma substância terá um valor específico de calor latente.

$$\Delta Q_L = m \cdot L$$

Calores específicos latentes de fusão e vaporização de algumas substâncias a 1 atm:

Substância	Ponto de fusão (°C)	Calor latente de fusão (J/Kg)	Ponto de ebulição (°C)	Calor latente de vaporização (J/Kg)
Hélio	-269.65	$5.23 \times 10^3$	-268.93	$2.09 \times 10^4$
Nitrogênio	-209.97	$2.55 \times 10^4$	-195.81	$2.01 \times 10^5$
Oxigênio	-218.79	$1.38 \times 10^4$	-182.97	$2.13 \times 10^5$

Continua...

Álcool etílico	-114	$1.04 \times 10^5$	78	$8.54 \times 10^5$
Água	0.00	$3.33 \times 10^5$	100.00	$2.26 \times 10^6$
Enxofre	119	$3.81 \times 10^4$	444.60	$3.26 \times 10^5$
Chumbo	327.3	$2.45 \times 10^4$	1750	$8.70 \times 10^5$
Alumínio	660	$3.97 \times 10^5$	2450	$1.14 \times 10^7$
Prata	960.80	$8.82 \times 10^4$	2193	$2.33 \times 10^6$
Ouro	1063.00	$6.44 \times 10^4$	2660	$1.58 \times 10^4$
Cobre	1083	$1.34 \times 10^5$	1187	$5.06 \times 10^6$

## Exemplo

Uma amostra de 200 g de gelo está a  $-20^{\circ}\text{C}$ , sob pressão atmosférica normal. Calcule a quantidade de energia necessária para transformá-la em líquido a  $30^{\circ}\text{C}$ .

## Resolução

O calor específico da água é diferente nos diferentes estados físicos. Portanto, não é possível resolver o problema considerando, de modo simplificado,  $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$ . Há também uma etapa intermediária que envolve mudança de estado físico. O problema deve ser resolvido em etapas.

Inicialmente, o fornecimento de energia promove o aquecimento do gelo (água no estado sólido,  $c = 0,5 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ ) até  $0^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta Q_s = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$\Delta Q_s = 200 \cdot 0,5 \cdot (0 - (-20))$$

$$\Delta Q_s = 2000 \text{ cal}$$

desérticas, os dias são excessivamente quentes, e as noites, excessivamente frias.

Diante dessas informações, é possível perceber como o desmatamento altera a temperatura ambiente e, por consequência, de todo o clima e do ecossistema de uma região.

## Variação da energia térmica e mudança de estado físico – Calor latente

Ao fornecer energia térmica a um sistema ou corpo, não necessariamente haverá variação de temperatura. Essa energia pode exercer a função de romper as interações entre as partículas que compõem o corpo, ocasionando uma mudança de estado físico. A essa energia transferida dá-se o nome de calor latente ( $\Delta Q_L$ ).

A quantidade de calor latente ( $\Delta Q_L$ ) necessária para promover uma mudança de estado físico depende da massa e do calor específico latente ( $L$ ), também designado apenas como calor latente, da substância que compõe o sistema. Para cada mudança de estado físico, uma substância terá um valor específico de calor latente.

$$\Delta Q_L = m \cdot L$$

Calores específicos latentes de fusão e vaporização de algumas substâncias a 1 atm:

Substância	Ponto de fusão (°C)	Calor latente de fusão (J/Kg)	Ponto de ebulição (°C)	Calor latente de vaporização (J/Kg)
Hélio	-269.65	$5.23 \times 10^3$	-268.93	$2.09 \times 10^4$
Nitrogênio	-209.97	$2.55 \times 10^4$	-195.81	$2.01 \times 10^5$
Oxigênio	-218.79	$1.38 \times 10^4$	-182.97	$2.13 \times 10^5$

Continua...

e, a seguir, transforme-se em vapor. Assim, a água resfria o corpo em chamas. Não bastasse isso, como o vapor ocupa espaço dezenas de vezes maior que a mesma massa no estado líquido, ele envolve o corpo em chamas, dificultando a interação com o comburente (oxigênio do ar). Sem o oxigênio do ar, não há combustão.

## Trocas de calor em sistemas isolados

Dois corpos com diferentes temperaturas, que constituam um sistema termicamente isolado, trocam entre si energia térmica, de forma que o corpo quente transfere (cede) energia térmica para o corpo de menor temperatura, até que se estabeleça a condição de equilíbrio térmico.

$$Q_{\text{cedido}} + Q_{\text{recebido}} = 0$$

É fácil de perceber que tal situação pode ser expandida para sistemas isolados com mais de dois corpos.

### TESTE SEU SABER

**Dados:** *Calores específicos sensíveis*

Gelo: 0,5 cal/g°C

Água: 1 cal/g°C

Vapor-d'água: 0,5 cal/g°C

*Calores específicos latentes*

Água em fusão: 80 cal/g

Água em vaporização: 540 cal/g

Densidade da água: 1 g/cm<sup>3</sup>

1. (Fuvest-SP) Uma dona de casa, em Santos, precisa de uma xícara de água a 50 °C, para seguir a receita de um bolo. Embora bem aparelhada, a cozinha não tem termômetro. Como a dona de casa pode resolver o problema? Proponha qualquer procedimento correto, desde que não envolva o uso do termômetro.

2. (UnB) Um pedaço de 100 g de gelo, inicialmente à temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$ , é imerso em 400 g de água cuja temperatura é de  $25^{\circ}\text{C}$ . A mistura é agitada até que um estado final de equilíbrio seja alcançado. Supondo que não haja troca de energia térmica entre os elementos e o recipiente, qual a temperatura de equilíbrio térmico?
3. Para aquecer 500 g de uma substância de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$  foram necessárias 2000 cal. Qual o calor específico dessa substância?
4. Deseja-se converter um cubo de gelo de massa 30 g, inicialmente a  $-12^{\circ}\text{C}$ , em 30 g de água a  $70^{\circ}\text{C}$ . Qual a quantidade de calor necessária?
5. Dentro de um calorímetro, cuja capacidade térmica é desprezível, colocou-se um bloco de chumbo (calor específico 0,0306 cal/g C) de 4 kg a uma temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$ . O calorímetro contém 8 kg de água a  $30^{\circ}\text{C}$ . Qual a temperatura de equilíbrio térmico?
6. (Cesgrario-RJ) Duzentos (200) g de água à temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  são adicionados, em um calorímetro, a 100 g de água à temperatura inicial de  $80^{\circ}\text{C}$ . Desprezando as perdas, a temperatura final de equilíbrio térmico da mistura será:
- a)  $30^{\circ}\text{C}$       b)  $40^{\circ}\text{C}$       c)  $50^{\circ}\text{C}$       d)  $60^{\circ}\text{C}$       e)  $100^{\circ}\text{C}$
7. (Vunesp-SP) Num mesmo local e ocasião, massas diferentes de água pura são aquecidas lado a lado em dois recipientes abertos, desde a temperatura ambiente até começar a ferver. Assinale a alternativa correta em relação aos valores, para os dois recipientes, das: quantidades de calor recebidas pelas massas de água desde o início do aquecimento até começar a ferver (despreze quaisquer tipos de perdas); temperaturas finais atingidas pelas massas de água; e densidades (ou massas específicas) das massas de água.

	As quantidades de calor recebidas são	As temperaturas finais atingidas são	As densidades ou massas específicas são
A	iguais	iguais	iguais
B	diferentes	diferentes	diferentes
C	iguais	diferentes	diferentes

Continua...

D	diferentes	iguais	diferentes
E	diferentes	iguais	iguais

8. (Vunesp-SP) Massas iguais de cinco líquidos distintos, cujos calores específicos (em  $J/g^{\circ}C$ ) estão dados na tabela, encontram-se armazenadas, separadamente e à mesma temperatura, dentro de cinco recipientes com boa isolamento e capacidade térmica desprezível.

Líquido	Água	Petróleo	Glicerina	Leite	Mercúrio
Calor Específico	4,19	2,09	2,43	3,93	0,14

Se cada líquido receber a mesma quantidade de calor, suficiente apenas para aquecê-lo, mas sem alcançar seu ponto de ebulição, aquele que apresentará temperatura mais alta após o aquecimento será:

- a) A água.
  - b) O petróleo.
  - c) A glicerina.
  - d) O leite.
  - e) O mercúrio.
9. (ITA-SP) Num dia de calor, em que a temperatura ambiente era de  $30^{\circ}C$ , João pegou um copo com volume de  $200\text{ cm}^3$  de refrigerante à temperatura ambiente e mergulhou nele dois cubos de gelo de  $15\text{ g}$  cada um. Se o gelo estava à temperatura de  $-4^{\circ}C$  e derreteu por completo e supondo que o refrigerante tenha o mesmo calor específico e a mesma densidade que a água, a temperatura final da bebida de João ficou sendo aproximadamente de:
- a)  $15^{\circ}C$
  - b)  $25^{\circ}C$
  - c)  $0^{\circ}C$
  - d)  $12^{\circ}C$
  - e)  $20^{\circ}C$
10. (UFMG) Um bloco de gelo de 80 gramas foi colocado dentro de um calorímetro, bem isolado, com 50 gramas de água. Depois de várias horas, verificou-se uma situação final, na qual havia, ainda, 80 gramas de gelo no interior do calorímetro. Pode-se concluir, dessa experiência, que:
- a) A condutividade térmica do gelo é igual à da água.

- b) As quantidades de calor contidas na água e no gelo, na situação final, tornaram-se iguais.
- c) A temperatura final do gelo e da água era de 0 °C.
- d) O calor específico do gelo é igual ao calor específico da água.
- e) O calor latente de fusão do gelo é maior que a energia contida na água.

## *Descomplicando a Física*

Num dia de calor, você tira duas pedras de gelo iguais do congelador. Uma delas você coloca sobre a pia da cozinha e a outra dentro de um copo com água. Se a água do copo e a pia estão na mesma temperatura, onde o gelo derrete mais depressa? Explique.

### **Resolução**

A pedra de gelo colocada em água tem cerca de 90% de sua superfície em contato com a água, enquanto a pedra de gelo colocada sobre a pia tem a área de uma face em contato com a pia e as demais em contato com o ar. Qualquer que seja o material do qual é feita a pia, neste caso, o contato do gelo com o ar é mais significativo. Com base nesses fatos, a rapidez com que o gelo se funde está diretamente ligada aos calores específicos do ar e da água.

O gelo que vai se fundir mais rapidamente é aquele que está em contato com a substância de maior capacidade térmica, isto é, que absorve maior quantidade de calor por unidade de massa e por unidade de temperatura. O calor específico sensível da água (1 cal/g°C) é maior que o calor específico sensível do ar (0,24 cal/g°C, a 1 atm). Portanto, o gelo que derrete mais rapidamente é aquele que está imerso em água.

# 18 Termodinâmica

## Trabalho de uma transformação termodinâmica

Se um sistema gasoso submetido à pressão constante sofre uma variação de volume  $\Delta V$ , o trabalho realizado pelo sistema pode ser expresso:

$$\tau = p \cdot \Delta V$$

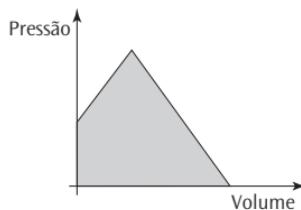
No SI,  $\tau$  é expresso em J (joule), a pressão em N/m<sup>2</sup> e  $\Delta V$  em m<sup>3</sup>.

Note que o trabalho e a variação de volume possuem o mesmo sinal, portanto:

- se a massa gasosa se expande,  $\Delta V > 0$ ,  $\tau > 0$ , e o sistema realiza trabalho sobre o ambiente externo à massa gasosa, o trabalho é realizado pelo sistema gasoso;
- se a massa gasosa se contrai,  $\Delta V < 0$ ,  $\tau < 0$ , e o sistema sofre ação de um agente externo, o trabalho é realizado sobre o sistema gasoso.

Para uma situação em que a pressão não é constante, pode-se determinar o trabalho com auxílio de um gráfico de pressão em função do volume da massa gasosa.

O trabalho é numericamente igual à área sob a curva. Se o volume do gás aumenta, o trabalho é positivo. Se o volume diminui, o trabalho é negativo.



## Exemplo

Em um sistema cilindro-pistão, um gás está sujeito a uma pressão constante de  $4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ . Considerando que o gás sofre uma expansão de volume de  $0,002 \text{ m}^3$ , determine:

- O trabalho a que o sistema está sujeito.
- A força média que atua sobre o pistão quando este se desloca de 20 cm.

## Resolução

- Como o trabalho ocorre à pressão constante, vale a expressão:

$$\tau = p \cdot \Delta V,$$

com  $\Delta V > 0$ , já que o gás sofre expansão:

$$\tau = 4 \cdot 10^5 \cdot 0,002$$

$$\tau = 2 \cdot 10^2 \text{ J} = 200 \text{ J}$$

- A força média pode ser calculada:

$$\tau = F \cdot d$$

$$200 = F \cdot 0,2$$

$$F = 1000 \text{ N}$$

## Energia interna

O conceito de temperatura tem por premissa o fato de que a matéria é constituída por partículas em movimento. A temperatura de um corpo está relacionada com a energia cinética média das partículas que o constitui, e a somatória das energias dessas partículas corresponde à energia interna do corpo ( $U$ ).

Consideremos uma amostra de gás monoatômico, como os gases nobres. Neste caso, a energia cinética média das partículas depende apenas da temperatura do gás. Podemos calcular a energia cinética média ( $E_c$ ) como sendo

$$U = \frac{3 \cdot N \cdot k \cdot T}{2}$$

Onde: N é o número de partículas;

T é a temperatura em Kelvin; e

k a constante de Boltzmann, cujo valor, no SI, é  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K.

Para n mol de partículas, a expressão acima toma a forma:

$$U = \frac{3 \cdot n \cdot R \cdot T}{2},$$

onde R é a constante universal dos gases perfeitos de valor igual a  $8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Quando o gás não é monoatômico, o fator constante deixa de ser 3/2, mas a relação de proporcionalidade direta continua válida, desde que se admita que o gás se comporte como ideal.

Como:  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$

$$U = \frac{3}{2} \cdot p \cdot V$$

## Primeiro Princípio da Termodinâmica

Do ponto de vista energético, o trabalho representa a fração da energia aproveitada em um processo, e a energia interna é a fração de energia não aproveitada. Considerando um processo em que há a transferência de uma quantidade de energia ( $\Delta Q$ ), na forma de calor, parte da energia é convertida em trabalho ( $\tau$ ) e o restante

resultará em uma variação da energia interna ( $\Delta U$ ) do sistema. O Primeiro Princípio da Termodinâmica pode ser expresso:

$$\Delta Q = \tau + \Delta U$$

Quando  $\Delta Q$  for positivo, o sistema recebe calor do meio externo, e quando é negativo, o sistema fornece calor ao meio externo.

Esse princípio estabelece que a energia total no universo se mantém constante, não estabelece nenhuma restrição às transformações de energia. Existem, no entanto, processos como a transferência de calor de um corpo quente para um corpo frio que ocorrem em um só sentido, isto é, um corpo quente é capaz de esquentar um corpo frio, mas o contrário não é possível. Este caráter de irreversibilidade de alguns processos não é restringido pelo primeiro princípio.

### Exemplo

Um sistema termodinâmico sofre um acréscimo de energia interna de 200 J.

- Qual a quantidade de calor envolvida quando o sistema realiza trabalho de 120 J?
- Em outra situação, se o sistema cede 60 J de calor para o meio externo, qual o trabalho realizado?

### Resolução

- O sistema realiza trabalho,  $\tau > 0$ , portanto:

$$\Delta Q = \tau + \Delta U$$

$$\Delta Q = 120 + 200$$

$$\Delta Q = 320 \text{ J}$$

Observe que, neste caso, o sistema absorveu calor ( $\Delta Q > 0$ ).

b)  $\Delta Q < 0$ , uma vez que o sistema cede calor para o meio externo:

$$\Delta Q = \tau + \Delta U$$

$$-60 = \tau + 200$$

$$\tau = -260 \text{ J}$$

O trabalho foi realizado sobre o sistema ( $\tau < 0$ ), isto é, algum agente externo comprimiu o sistema.

## Segundo Princípio da Termodinâmica – Máquinas térmicas

O Segundo Princípio da Termodinâmica vem resolver a inconsistência do caráter irreversível de algumas transformações, indicando o sentido das transformações de energia possíveis.

“É impossível para uma máquina térmica, operando em ciclos, converter integralmente calor em trabalho.”

Uma máquina térmica tem por finalidade realizar trabalho, isto é, converter energia de uma forma em outra.

### Rendimento de uma máquina térmica

Uma máquina térmica opera capturando energia ( $Q_1$ ) de uma fonte quente e devolvendo a parcela não aproveitada de energia ( $Q_2$ ) para uma fonte fria.

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Segundo Sadi Carnot (1796-1832), o rendimento máximo ( $\eta_{\max}$ ) de uma máquina térmica ocorre quando se executa uma sequência específica de transformações, denominada *ciclo de Carnot*.

O rendimento de uma máquina térmica é máximo quando todas as etapas do seu ciclo forem transformações reversíveis. A sequência de transformações consiste em uma expansão isotérmica (de A para B) do gás seguida de uma expansão adiabática (de B para C), uma compressão isotérmica (de C para D) e uma compressão adiabática (de D para A), fechando o ciclo.

Dessa forma, o rendimento máximo da máquina térmica depende exclusivamente das temperaturas da fonte fria ( $T_2$ ) e da fonte quente ( $T_1$ ) entre as quais a máquina opera, podendo ser calculado:

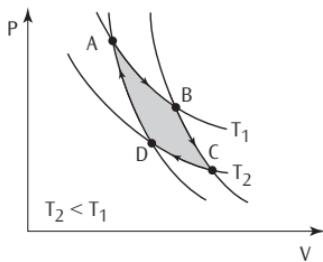
$$\eta_{\text{máx}} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

onde as temperaturas devem ser expressas na escala Kelvin.

### Exemplo

Uma máquina térmica recebe 5000 J de energia da fonte quente e cede 4000 J para a fonte fria a cada ciclo.

- Calcule o rendimento dessa máquina térmica.
- Considerando que a fonte quente possui temperatura de 227 °C e a fonte fria está a 27 °C, calcule o máximo rendimento possível dessa máquina.



### Resolução

- O rendimento pode ser calculado em função das quantidades de energia traçadas:

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{4000}{5000}$$

$$\eta = 1 - 0,8 = 0,2 = 20\%$$

- b) Nesse caso, a máquina térmica deveria operar segundo o ciclo de Carnot, e o rendimento depende exclusivamente das temperaturas das fontes fria e quente. Não devemos esquecer que a temperatura deve ser expressa na escala Kelvin.

$$T_1 = 227 + 273 = 500 \text{ K}$$

$$T_2 = 27 + 273 = 300 \text{ K}$$

$$\eta_{\text{máx}} = 1 - \frac{300}{500}$$

$$\eta_{\text{máx}} = 1 - 0,6$$

$$\eta_{\text{máx}} = 0,4 = 40\%$$

## Entropia

O Primeiro Princípio da Termodinâmica deu origem ao conceito de energia interna. O Segundo Princípio deu origem ao conceito de *entropia*.

Rudolf Clausius (1822-1888) contribuiu para a formulação do Segundo Princípio da Termodinâmica introduzindo o conceito de entropia como uma medida da quantidade de energia disponível que se transforma em energia não disponível. Quanto maior a entropia, menor a quantidade de energia disponível.

Em 1878, o conceito foi reformulado por Ludwig Boltzmann (1844-1906), como sendo uma medida da desordem do universo.

Em qualquer sistema físico, a tendência natural é o aumento da desordem; o restabelecimento da ordem só é possível mediante o consumo de energia.

Assim, para um sistema qualquer, o aumento da desorganização corresponde ao aumento de entropia.

Define-se entropia como sendo:

$$S = \frac{Q}{T}$$

Onde: S é a entropia do sistema (J/K);

Q é a quantidade de calor envolvida em um processo reversível (J); e

T é a temperatura expressa na escala termodinâmica.

Essa razão Q/T muitas vezes não pode ser calculada diretamente. Por conta disso, define-se a variação de entropia  $\Delta S$  de um sistema como sendo a razão entre a variação na quantidade de calor  $\Delta Q$  desse sistema e a temperatura T do sistema:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Em verdade, estamos admitindo que a variação de temperatura no processo é desprezível.

A variação de entropia de um sistema é positiva quando ele recebe calor do meio externo e negativa quando o sistema fornece calor ao ambiente.

Em qualquer transformação em um sistema isolado, a variação de entropia é nula ou positiva ( $\Delta S \geq 0$ ).

Com base no Segundo Princípio, podemos concluir que a entropia no universo não diminui, ela sempre aumenta ou, na melhor hipótese, fica constante. A essa conclusão está relacionado o sentido da grandeza tempo.

Pode-se demonstrar que a variação da entropia está relacionada à variação da energia interna de um sistema

$$\Delta S = \Delta U/T$$

## Transformações termodinâmicas de um gás

Analisadas por meio da Primeira Lei da Termodinâmica, as transformações isobáricas denunciam caracteristicamente a proporcionalidade direta entre o trabalho e a variação de volume do gás.

Nas transformações isocóricas, não há variação de volume, portanto, não há trabalho realizado. Isso indica que todo calor transferido é empregado na variação de energia interna do gás, com consequente aumento de temperatura.

Nas transformações isotérmicas não há variação de energia interna, isto é, todo calor absorvido (ou cedido) é empregado na realização de trabalho do sistema sobre o ambiente (ou do ambiente sobre o sistema).

Uma quarta possibilidade. As transformações podem ser de origem adiabática, isto é, aquelas em que não há troca de calor entre o sistema e o ambiente ( $\Delta Q = 0$ ). Elas podem ocorrer, por exemplo, quando um gás sofre uma compressão ou expansão muito rápida. Nesse caso, a Primeira Lei da Termodinâmica nos mostra que a variação da energia interna aumenta quando se realiza trabalho sobre o sistema.

$$\Delta U = -\tau$$

## Moto-perpétuo

Denomina-se moto-perpétuo ou moto-contínuo, uma máquina que transformaria integralmente calor em trabalho. Uma máquina que reutilizaria indefinidamente a energia gerada por seu próprio movimento, ou seja, uma máquina que opere continuamente sem consumo de energia.

Considere uma máquina constituindo um sistema ideal que não troca calor com o meio externo ( $\Delta Q = 0$ ) e que não realiza trabalho ( $\tau = 0$ ). Então,

$$\Delta Q = \tau + \Delta U$$

$$\Delta U = 0$$

$$U_{\text{final}} = U_{\text{inicial}}$$

e a energia interna do sistema permanece constante.

Em um sistema real, no entanto, ainda que não haja realização de trabalho ( $\tau \geq 0$ ), há perdas de energia para o ambiente ( $\Delta Q < 0$ ) e, portanto,

$$\Delta Q = \tau + \Delta U$$

$$\Delta U = \Delta Q - \tau$$

$$\Delta U < 0$$

$$U_{\text{final}} < U_{\text{inicial}},$$

representando o fato de que, a cada ciclo de operação da máquina, a energia interna do sistema diminui, até que o sistema pare de operar.

As conclusões a que se chega são: se o sistema realizasse trabalho, ele pararia, pelo fato de consumir energia; se funcionasse sem parar, não realizaria trabalho; ou, ainda, o sistema operaria fornecendo ao exterior mais energia (sob a forma de trabalho ou calor) do que aquela que consome. Sistemas como esses são denominados motos-perpétuos ou motos-contínuos de primeira espécie.

Um moto-contínuo de primeira espécie é uma máquina de movimento perpétuo que viola a Primeira Lei da Termodinâmica. O moto-contínuo de primeira espécie não existe.

Um moto-contínuo de segunda espécie é uma máquina de movimento perpétuo que viola a Segunda Lei da Termodinâmica, tendo um rendimento de 100%. Visto que o moto-contínuo é um processo cíclico, seria necessário que em todas as etapas do ciclo, todas as transformações de energia tivessem também um rendimento de 100%, no entanto, a Segunda Lei da Termodinâmica postula que não é possível a transformação completa do calor fornecido por uma fonte em trabalho.

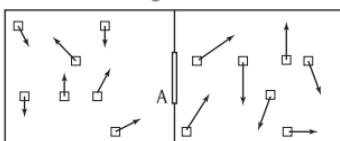
---

## TESTE SEU SABER

---

1. (IME-RJ) Durante um processo são realizados 100 kJ de trabalho sobre um sistema, observando-se um aumento de 55 kJ em sua energia interna. Determine a quantidade de calor trocada pelo sistema, especificando se foi adicionado ou retirado.
2. Um inventor afirma ter construído uma máquina térmica de rendimento 50% trabalhando entre duas fontes de temperaturas: 27 °C e 227 °C. Isso é possível? Justifique sua resposta.
3. (UFU) Um gás está confinado em um cilindro provido de um pistão. Ele é aquecido, mas seu volume não é alterado. É possível afirmar que:
  - a energia interna do gás não varia.
  - b) O trabalho realizado nessa transformação é nulo.
  - c) O pistão sobe durante o aquecimento.
  - d) A força que o gás exerce sobre o pistão permanece constante.
  - e) A energia cinética média das partículas do gás diminui.
4. (UFRN) Um sistema termodinâmico realiza um trabalho de 40 kcal quando recebe 30 kcal de calor. Nesse processo, a variação de energia interna desse sistema é de:
  - a) -10 kcal
  - b) zero
  - c) 10 kcal
  - d) 20 kcal
  - e) 35 kcal
5. (UFV) Um folheto explicativo sobre uma máquina térmica afirma que ela, ao receber 1000 cal de uma fonte quente, realiza 4186 J de trabalho. Sabendo que 1 cal equivale a 4,186 J e com base nos dados fornecidos pelo folheto, você pode afirmar que esta máquina:
  - a) Viola a 1<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica.
  - b) Viola a 2<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica.
  - c) Possui rendimento nulo.
  - d) Possui rendimento de 10%.
  - e) Funciona de acordo com o ciclo de Carnot.
6. Um colega lhe pergunta: – É possível ceder calor a um gás e sua temperatura não sofrer variação? Você deverá responder corretamente: Sim, porque esse calor pode aparecer em forma de aumento de energia interna do gás.

- a) Não, porque sempre que se cede calor a um corpo sua temperatura aumenta.
- b) Sim, porque o gás pode realizar um trabalho sobre sua vizinhança exatamente igual ao calor fornecido a ele.
- c) Não, porque o calor é uma forma de energia e a energia sempre se conserva.
- d) Sim, porque este calor pode ser empregado no aumento da energia cinética das moléculas do gás.
7. São comuns filmes de aventuras como “*De volta para o futuro*” e outros que exploram viagens ao passado. De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, ao menos da forma como são apresentadas, essas viagens são inviáveis. Explique, por meio da termodinâmica, essa impossibilidade.
8. Um motor trabalhando segundo o ciclo de Carnot entre as temperaturas de 225 K e 750 K recebe a cada ciclo 800000 J de calor. Calcule:
- O rendimento do motor.
  - Qual o trabalho do motor a cada ciclo.
  - Quanto calor o motor perde a cada ciclo.
9. (UFSCar-SP) Maxwell, notável físico escocês da segunda metade do século XIX, inconformado com a possibilidade da morte térmica do universo, consequência inevitável da Segunda Lei da Termodinâmica, criou o “demônio de Maxwell”, um ser hipotético capaz de violar essa lei. Essa fictícia criatura poderia selecionar as moléculas de um gás que transitassesem entre dois compartimentos controlando a abertura (A) que os divide, como ilustra a figura.



Por causa dessa manipulação diabólica, as moléculas mais velozes passariam para um compartimento, enquanto as mais lentas passariam para o outro. Se isso fosse possível:

- Esse sistema nunca entraria em equilíbrio térmico.
- Esse sistema estaria em equilíbrio térmico permanente.
- O Princípio da Conservação da Energia seria violado.
- Não haveria troca de calor entre os dois compartimentos.
- Haveria troca de calor, mas não haveria troca de energia.

## Descomplicando a Física

(ITA-2003) Considerando um buraco negro como um sistema termodinâmico, sua energia interna  $U$  varia com a sua massa  $M$  de acordo com a famosa relação de Einstein:  $\Delta U = \Delta M \cdot c^2$ .

Stephen Hawking propôs que a entropia  $S$  de um buraco negro depende apenas de sua massa e de algumas constantes fundamentais da natureza. Dessa forma, sabe-se que uma variação de massa acarreta uma variação de entropia dada por:  $\Delta S / \Delta M = 8\pi GM kB/h c$ .

Supondo que não haja realização de trabalho com a variação de massa, assinale a alternativa que melhor representa a temperatura absoluta  $T$  do buraco negro.

- a)  $T = h c^3 / GM k_B$ .
- b)  $T = 8\pi M c^2 / k_B$ .
- c)  $T = M c^2 / 8\pi k_B$ .
- d)  $T = h c^3 / 8\pi GM k_B$ .
- e)  $T = 8\pi h c^3 / GM k_B$ .

Resposta correta: Alternativa D.

### Resolução

Supondo-se que a temperatura absoluta do buraco negro seja constante, sua variação de entropia ( $\Delta S$ ) em função de sua variação de energia interna ( $\Delta U$ ) é:  $\Delta U = T \cdot \Delta S$ . Substituindo-se, na equação anterior, as expressões de  $\Delta S$  e  $\Delta U$  dadas no enunciado, segue:

$$\Delta M \cdot c^2 = T \cdot [\Delta M \cdot (8\pi GM kB/h c)]$$

$$T = \frac{M \cdot c^2}{M \cdot (8\pi GM kB/hc)}$$

$$T = h \cdot c^3 / (8\pi GM kB).$$

# 19 Oscilações

## Oscilador massa-mola

Um oscilador massa-mola consiste em uma massa  $m$  presa à extremidade de uma mola de constante elástica  $k$ , conforme as figuras ao lado:

Na situação representada em **A**, a mola está com sua conformação original (nem distendida nem comprimida), tendo fixado em uma de suas extremidades um corpo de massa  $m$ . Dizemos que o corpo está em posição de equilíbrio. Por conveniência, vamos adotar, nesta situação, a origem do eixo das abscissas (0 m) no centro de massa do bloco.

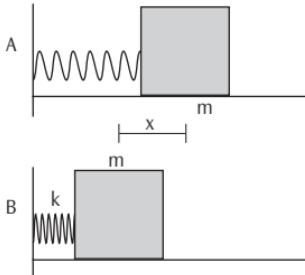
Na situação representada em **B**, a mola está comprimida, sendo que  $x$  representa o valor da deformação sofrida pela mola. A coordenada do centro de massa do bloco é negativa ( $-x$ ), e o bloco exerce uma força ( $-F$ ), cujo módulo é dado pela Lei de Hooke:

$$F = k \cdot x,$$

e a mola, por reação, exerce sobre o bloco uma força ( $+F$ ). A origem do movimento é esta última força.

Consideremos o sistema livre da ação de forças dissipativas.

Ao ser solta, a mola empurra o bloco, fazendo-o passar pela posição de equilíbrio; a mola atingirá a distensão máxima (quando a coordenada do centro de massa for ( $+x$ ), situação em que a força da mola sobre o bloco tem módulo máximo, porém negativo ( $-F$ )).



Observe que, para as situações em que a deformação da mola é máxima ( $-x$  e  $+x$ ), a força da mola possui sinal oposto à coordenada da mola ( $+F$  e  $-F$ ). Diz-se tratar de uma *força elástica restauradora*, e sua expressão matemática é:

$$F = -k \cdot x$$

A partir da situação B, portanto, sendo solto o corpo de massa  $m$ , ele se moverá em torno da posição de equilíbrio, descrevendo um movimento retilíneo e periódico de oscilação chamado *movimento harmônico simples* (MHS).

## Movimento harmônico simples

Associando a expressão da força elástica restauradora à Segunda Lei de Newton, obtemos a expressão da aceleração do MHS,

$$m \cdot a = -k \cdot x$$

$$a = \frac{-k}{m} \cdot x,$$

de fundamental importância, uma vez que através dela pode-se definir se um movimento é, ou não, harmônico simples.

No MHS, tomando um plano cartesiano como referência, a abscissa, que indica a posição do corpo oscilante em função do tempo, medida a partir do ponto de equilíbrio, denomina-se *elongação*. O valor máximo da elongação recebe o nome de *amplitude* ( $A$ ). Nas situações de amplitude máxima, os valores de  $x$  podem ser expressos por:

$$x = -A \text{ e } x = +A$$

Semelhantemente ao movimento circular e uniforme, em função da periodicidade do movimento, pode-se definir duas grandezas relacionadas ao tempo de oscilação: a frequência ( $f$ ) e o período do movimento ( $T$ ). Por frequência entende-se o número de ciclos

que se repetem por unidade de tempo. O período representa o tempo de uma oscilação. Assim sendo, temos as relações:

$$f = \frac{\text{número de oscilações}}{\Delta t} \quad \text{e} \quad f = \frac{1}{T}$$

A unidade de período no SI é o segundo (s).

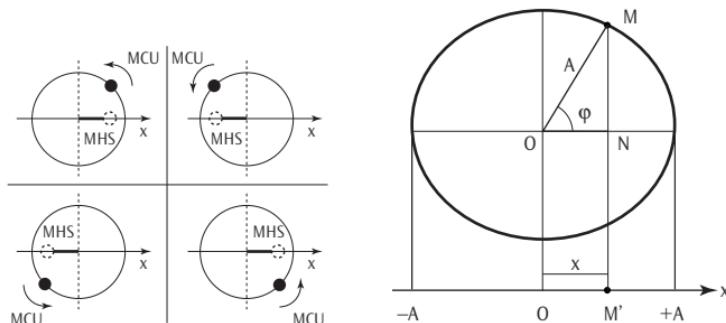
A unidade de frequência no SI é o hertz (Hz), que equivale a  $s^{-1}$ . É comum, ainda, unidades como *rpm* (rotações por minuto) ou *rps* (rotações por segundo).

Para o MHS, podemos ainda escrever a relação:

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

A grandeza  $\omega$  denomina-se, no MHS, frequência angular ou pulsação, e sua unidade no SI é radianos por segundo (rad/s).

Quando um móvel descreve um movimento circular e uniforme (MCU) com velocidade angular  $\omega$  (não confundir com a pulsação), sua projeção sobre um dos diâmetros descreve um MHS.



Da figura anterior, define-se a relação válida para o triângulo OMN:

$$x = A \cdot \cos \varphi$$

Como o ângulo  $\varphi$  vale  $\varphi = (\omega \cdot t + \varphi_0)$ , em que  $\varphi_0$  é denominada fase inicial, temos:

$$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0),$$

que é a função horária das posições do MHS.

No SI, a unidade da fase inicial é o radiano (rad).

### Exemplo

Um sistema massa-mola oscila com amplitude 0,60 m tendo  $\varphi_0 = \pi$  rad. Considere que o período de oscilação do corpo é de 0,04 s e calcule a função horária do MHS em questão.

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

como  $f = \frac{1}{T}$  surge:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{0,04} = 50\pi \text{ rad/s}$$

### Resolução

A função horária será:

$$x = 0,60 \cos(50\pi t + \pi)$$

## A velocidade e a aceleração no MHS

No MHS, a velocidade é uma função do tempo dada por:

$$v = -\pi \cdot A \cdot \sin(\pi \cdot t + \varphi_0)$$

Nos extremos da oscilação, a velocidade é nula e há inversão do sentido de movimento. A velocidade é máxima nos instantes em que a abscissa é nula, ou seja, no ponto médio de oscilação, onde  $\sin(\omega \cdot t + \varphi_0) = 1$

$$v_{\max} = \omega \cdot A \text{ ou } v_{\max} = -\omega \cdot A$$

No MHS, a aceleração é uma função do tempo dada por:

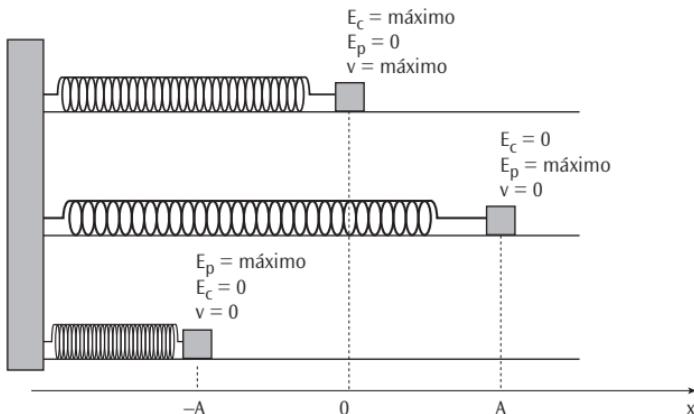
$$a = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

Relacionando essa expressão com a da elongação,  $x = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$ , obtemos:

$$a = -\omega^2 \cdot x$$

Logo, a aceleração é nula onde a elongação é nula, isto é, no ponto médio da trajetória. A elongação é máxima onde a aceleração é mínima, e vice-versa.

$$a = -\omega^2 \cdot A$$



## Exemplo

Considere um MHS representado pela expressão:

$$x = 0,4 \cos(\pi \cdot t - \pi/2).$$

Represente as equações horárias da velocidade e da aceleração do movimento.

## Resolução

Da expressão proposta, tem-se:

$$A = 0,4 \text{ m}; \omega = \pi \text{ rad/s}; \varphi_0 = -\pi/2 = 3\pi/2$$

A equação da velocidade será:  $v = -\pi \cdot 0,4 \sin(\pi \cdot t - \pi/2)$ .

A equação da aceleração será:  $a = -\pi^2 \cdot 0,4 \cos(\pi \cdot t - \pi/2)$ .

## Período de sistemas oscilantes

Entre vários tipos de sistemas oscilantes, temos o sistema massa-mola e o pêndulo simples.

No sistema massa-mola, a força atuante é de natureza elástica e obedece a Lei de Hooke:

$$F = -k \cdot x$$

A aceleração no MHS (a) é dada por:  $a = -\omega^2 \cdot x$ , e associando-a à Segunda Lei de Newton, surge:  $k = m \cdot \omega^2$ .

A pulsação no MHS pode ser expressa por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Portanto:  $k = m \cdot (2\pi/T)^2$

$$T = 2\pi \cdot (m/k)^{1/2}$$

O período depende exclusivamente da massa do corpo e da constante elástica da mola.

O movimento de um pêndulo simples não é um MHS, posto que a trajetória do corpo oscilante não é retilínea, no entanto, por boa aproximação, para ângulos pequenos em relação à vertical, menores que  $5^\circ$ , podemos considerá-lo retilíneo e tratá-lo como MHS. Pode-se demonstrar que, neste caso, o período de oscilação é expresso por:

$$T = 2\pi \cdot (L/g)^{1/2}$$

Onde: L é o comprimento do fio do pêndulo e g é a gravidade local.

Vê-se, portanto, que para o pêndulo simples, o período não depende da massa do corpo suspenso.

---

### TESTE SEU SABER

---

1. (Unimes) Um MHS (movimento harmônico simples) é descrito pela função horária  $x = 5 \cos(\pi t/2 + 3\pi/2)$ , com x em metros e t em segundos. É correto afirmar que:
  - A amplitude do movimento é 10 m.
  - A velocidade angular é  $5\pi/2$  rad/s.
  - A frequência do movimento é 0,25 Hz.
  - O período do movimento é 0,50 s.
  - A fase inicial é  $3\pi$  radianos.
2. (Mack-SP) Uma partícula descreve um movimento harmônico simples segundo a equação:  
$$x = 0,3 \cdot \cos[(\pi/3) + 2t]$$
 (unidades do SI)  
O módulo da máxima velocidade atingida por esta partícula é:  
a) 0,3 m/s    b) 0,1 $\pi$  m/s    c) 0,6 m/s    d) 0,2 $\pi$  m/s    e)  $(\pi/3)$  m/s
3. Uma partícula realiza um MHS, cuja elongação é dada pela expressão:  
$$x = 5 \cdot \cos[(\pi/2)t + \pi/3]$$
 (unidades do SI)  
Sobre esse movimento, considere as seguintes afirmações:  
I - A amplitude do movimento é 10 m.

II - O período do movimento é 4 s.

III - A trajetória do movimento é uma senoide.

Pode-se afirmar que:

- a) Somente I é correta.
- b) Somente II é correta.
- c) Somente III é correta.
- d) Somente I e II são corretas.
- e) I, II e III são corretas.

4. (Fatec-SP) O período de oscilação de um pêndulo simples pode ser calculado por:

$T = 2\pi \sqrt{L/g}$ , onde L é o comprimento do pêndulo e g a aceleração da gravidade do local onde o pêndulo se encontra. Um relógio de pêndulo marca, na Terra, a hora exata. É correto afirmar que, se esse relógio for levado para a Lua:

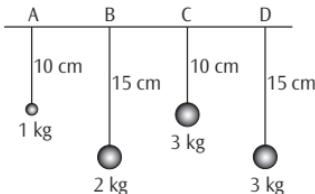
- a) Atrasará, pois o campo gravitacional lunar é diferente do terrestre.
  - b) Não haverá alteração no período de seu pêndulo, pois o tempo na Lua passa da mesma maneira que o tempo na Terra.
  - c) Seu comportamento é imprevisível, sem o conhecimento de sua massa.
  - d) Adiantará, pois o campo gravitacional lunar é diferente do terrestre.
  - e) Não haverá alteração de seu período, pois o campo gravitacional lunar é igual ao campo gravitacional terrestre.
5. Um pêndulo simples posto a oscilar, com pequenas oscilações, gasta 36 s para efetuar 20 oscilações completas num lugar onde  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ . Determine:
- a) O comprimento do pêndulo.
  - b) O período de oscilação desse pêndulo se estivesse na Lua, onde  $g = 1,7 \text{ m/s}^2$ .
6. A função da velocidade de um ponto material com MHS, no SI, é

$$v = -0,080\pi \cdot \sin(0,40\pi t).$$

Determine:

- a) A fase inicial, a velocidade angular e a amplitude.
- b) A função da posição em relação ao tempo.
- c) A função da aceleração em relação ao tempo.

7. Um corpo realiza um MHS tal que sua velocidade máxima é 2 m/s e sua aceleração máxima é de  $5 \text{ m/s}^2$ . Qual a amplitude do movimento? Qual a frequência do movimento?
8. Para determinar o valor da aceleração da gravidade num determinado local, um grupo de estudantes construiu um pêndulo simples de 1,20 m de comprimento. Posto a oscilar, com pequenas oscilações, o grupo verificou que o pêndulo gastou 43,80 s para efetuar 20 oscilações completas. Determine:
- O período do movimento do pêndulo.
  - A aceleração da gravidade no local.
9. (UFSC) Observando os quatro pêndulos da figura abaixo, pode-se afirmar que:



- O pêndulo A oscila mais devagar que o pêndulo B.
- O pêndulo A oscila mais devagar que o pêndulo C.
- O pêndulo B e o pêndulo D possuem a mesma frequência de oscilação.
- O pêndulo B oscila mais devagar que o pêndulo D.
- O pêndulo C e o pêndulo D possuem a mesma frequência de oscilação.

### Descomplicando a Física

(ITA) Uma técnica muito empregada para medir o valor da aceleração da gravidade local é aquela que utiliza um pêndulo simples. Para se obter a maior precisão no valor de  $g$  deve-se:

- usar uma massa maior;
- usar comprimento menor para o fio;

Continua...

- c) medir um número maior de períodos;
- d) aumentar a amplitude das oscilações;
- e) fazer várias medidas com massas diferentes.

A expressão  $T = 2 \pi \cdot (L/g)^{1/2}$  mostra que a massa não interfere no período de um pêndulo simples. Esta relação é válida para pequenas amplitudes; não se deve, pois, aumentar a amplitude.

Pode-se então pensar em usar um fio de comprimento *maior* ou medir (cronometrar) um número maior de oscilações do pêndulo para se ter um valor mais preciso do período (T).

# 20 Ondas

## Movimento ondulatório

A essência da ondulatória consiste no transporte de energia sem que haja transporte de matéria. Isto pode ser percebido quando, por exemplo, em um lago, formam-se pequenas ondas que se propagam pela superfície da água, e uma folha que flutua sobre a água executa movimento descendente e ascendente, não sendo levada pela onda para outra região do lago.

Um meio material e todos os pontos que o constituem podem ser descritos por grandezas físicas.

Diz-se que há uma perturbação quando pelo menos uma das grandezas físicas que descreve os pontos do meio material é alterada.

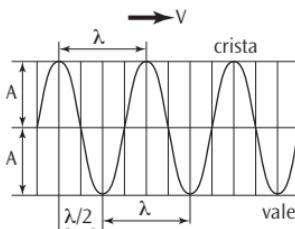
A perturbação sofrida pelo meio poderá se propagar através desse mesmo meio.

Define-se onda como sendo uma perturbação oscilante de alguma grandeza física no espaço e periódica no tempo.

Uma onda tem como característica os parâmetros: comprimento de onda ( $\lambda$ ), frequência ( $f$ ) e amplitude ( $A$ ) – esses dois últimos já definidos anteriormente no estudo do movimento harmônico simples (MHS).



Photodisc



Define-se frente de onda como o conjunto de pontos do meio que são alcançados no mesmo instante pela mesma fase de uma onda. Podemos dizer que a frente de onda separa a região “perturbada” da região não perturbada.

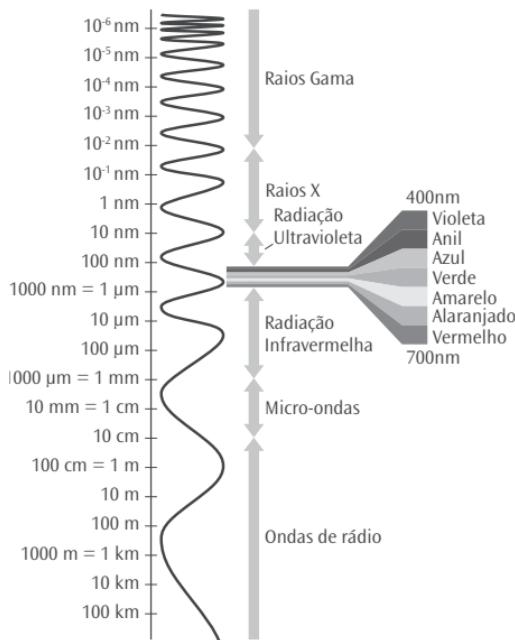
## Tipos de ondas

### Quanto à natureza da onda

Onda mecânica: originária da perturbação de um meio material (ondas na superfície de líquidos, onda sonora, ondas numa corda esticada etc.). A onda mecânica depende da existência do meio material e, portanto, não se propaga no vácuo.



Pdiaz/Dreamstime



Eduardo Borges

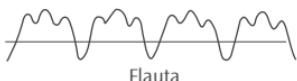
**Onda eletromagnética:** originária de cargas elétricas aceleradas (ondas luminosas, raios gama, raios X etc.). Em função de sua natureza, a onda eletromagnética não depende da existência de um meio material e, portanto, é capaz de se propagar, também, no vácuo.

## Quanto à direção de propagação

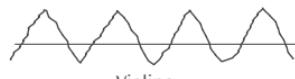
**Onda transversal:** a vibração do meio é perpendicular à direção de propagação (ondas luminosas, ondas em uma corda tensa etc.).



Diapasão



Flauta



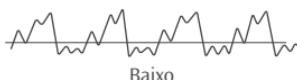
Violino



Vocal "a" (voz)



Clarinete



Baixo



Oboé



Vocal "o" (voz)



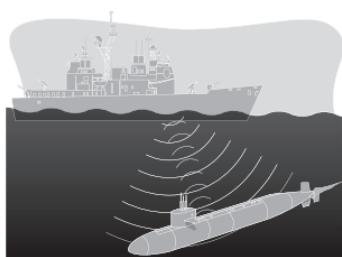
Corneta



Piano

Eduardo Borges

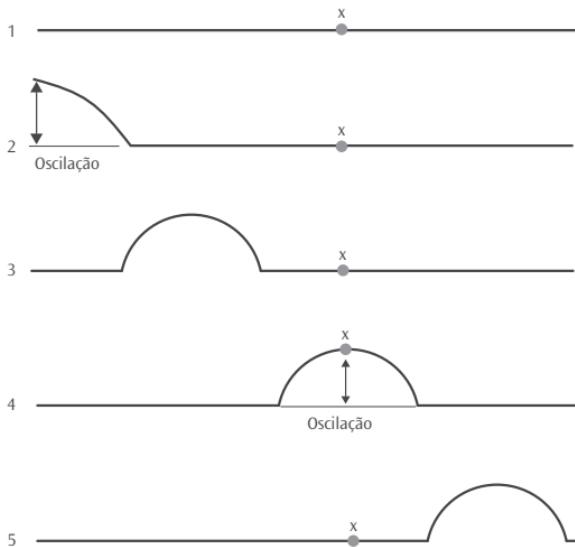
**Onda longitudinal:** a vibração do meio ocorre na mesma direção que a propagação (por exemplo: onda sonora, onda se propagando em uma mola perturbada com um impulso longitudinal em sua extremidade etc.).



Eduardo Borges

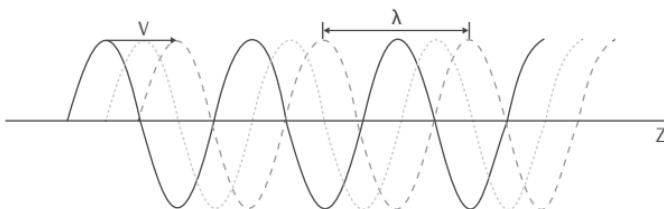
## Velocidade de propagação de uma onda

Considere um pulso propagando-se por uma corda esticada, caracterizando uma onda unidimensional e transversal, conforme a representação abaixo (direção de movimento do ponto x perpendicular à direção de propagação da onda).



Eduardo Borges

A velocidade de propagação da onda pode ser calculada em função do deslocamento da frente de onda (posição da perturbação) em um dado intervalo de tempo.



Eduardo Borges

## Exemplo

Uma pequena pedra cai verticalmente sobre a superfície de um lago de águas calmas, formando um conjunto de ondas circulares. Considere que 0,2 s após a queda da pedra, uma onda circular deslocou-se, com velocidade constante, 10 cm em relação ao local da queda da pedra. Pede-se:

- Calcule a velocidade de propagação da onda.
- A que distância do local da queda a onda estará passados 0,8 s de movimento.

## Resolução

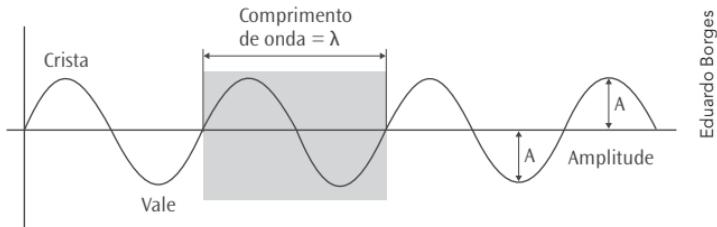
- Com 0,2 s de movimento, a onda deslocou-se 10 cm. Portanto, através da definição de velocidade média, calcula-se a velocidade de propagação da onda:

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{10 \text{ cm}}{0,2 \text{ s}} = 50 \text{ cm/s}$$

- Com 0,8 s de movimento, a onda circular estará a uma distância  $d$  de seu centro:

$$d = 50 \text{ cm/s} \cdot 0,8 \text{ s} = 40 \text{ cm}$$

A representação abaixo se refere a uma onda periódica propagando-se em uma corda esticada:



onde:  $\lambda$  – comprimento de onda: menor distância entre dois pontos que possuem o mesmo movimento no mesmo instante (pontos em fase).

$A$  – amplitude: máximo deslocamento de um ponto do meio em relação à sua posição de equilíbrio.

Sabemos que:  $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

Para uma unidade de onda  $\Delta s = \lambda$  e  $\Delta t = T$ .

Então, a expressão da velocidade pode ser reescrita:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

e como a frequência é o inverso do período, surge:

$$v = \lambda \cdot f$$

### Exemplo

Uma emissora de rádio opera em uma frequência de 1000 kHz. Determine o período, o comprimento de onda e a velocidade de propagação das ondas (no vácuo) geradas pela emissora.

Sendo a frequência da onda gerada de 1.000.000 Hz (1000 kHz =  $10^6$  Hz =  $10^6$  s $^{-1}$ ), temos:

$$f = \frac{1}{T}$$

$$1.000.000 = \frac{1}{T}$$

$$T = 0,000001 \text{ s} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Toda e qualquer onda de natureza eletromagnética, no vácuo, tem velocidade igual à velocidade da luz, isto é,  $v = 300.000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

## Resolução

O comprimento de onda pode ser calculado:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = \lambda \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda = 300 \text{ m}$$

Saiba



### *Forno de micro-ondas*

O forno de micro-ondas é uma grande invenção do século XX. Milhões de pessoas atualmente em todo o mundo possuem um. Sua grande popularidade vem do fato de este utensílio tornar muito prático o aquecimento dos alimentos.

As micro-ondas propriamente ditas são ondas de rádio, que no caso do forno de micro-ondas têm frequência que varia em torno de 2500 megahertz. As micro-ondas nesta frequência têm como característica serem absorvidas pela água, pelos açúcares e pelas gorduras, e não por plásticos, vidros ou cerâmicas. Por esse motivo, utensílios desses materiais são recomendados para o cozimento de alimentos, enquanto o alumínio e outros metais são desaconselhados, pelo fato destes últimos refletirem as micro-ondas.

No forno de micro-ondas os alimentos são aquecidos pelas ondas que penetram até seu interior, enquanto nos fornos convencionais o calor fica em torno dos alimentos e “migra” para seu interior depois. Assim, se o calor for muito intenso, você corre o risco de ter seu alimento queimado por fora e cru por dentro.

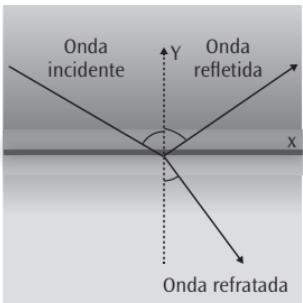


Adrian Hillman/PhotoXpress

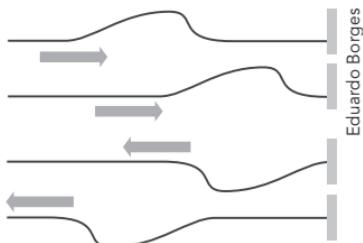
## Reflexão de ondas

Uma onda, ao encontrar uma fronteira com outro meio, pode sofrer reflexão, refração ou absorção.

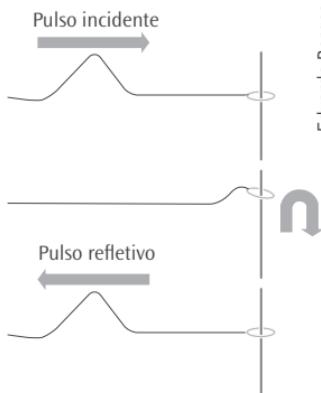
Ao executarmos uma perturbação numa corda fixa em uma de suas extremidades, o pulso gerado se propaga através da corda até atingir a extremidade fixa e retorna (reflete) invertida em relação ao pulso incidente.



Eduardo Borges



Diz-se que a onda sofreu inversão de fase.

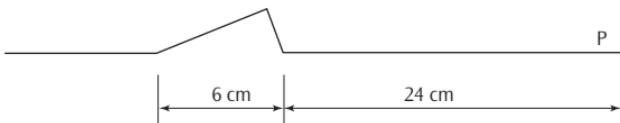


Caso a extremidade da corda não seja fixa e, portanto, possa se deslocar livremente em uma haste vertical, conforme a figura anterior, o pulso, ao atingir o ponto P, refletirá sem que haja inversão de fase.

O fenômeno de reflexão de onda não promove alteração dos parâmetros comprimento de onda, frequência e velocidade de propagação da onda.

### Exemplo

Considere um pulso de onda propagando-se em uma corda que está atrelada a uma parede, em P, conforme figura abaixo. Da posição representada, leva 0,4 s para que a onda atinja o extremo da corda fixo na parede.



Calcule a velocidade de propagação da corda e determine sua posição 2,6 s após a reflexão, considerando que:

- A extremidade da corda está devidamente amarrada na parede (extremidade fixa).
- A extremidade da corda, com o auxílio de um dispositivo, possui liberdade para oscilar, subir e descer conforme a incidência da onda (extremidade livre).

A velocidade de propagação da onda pode ser calculada:

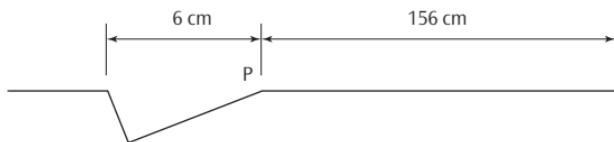
$$v = \frac{24 \text{ cm}}{0,4 \text{ s}} = 60 \text{ cm/s}$$

## Resolução

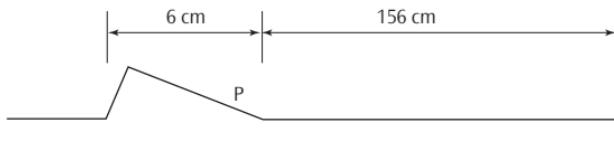
Em ambas as situações, a e b, após 2,6 s da reflexão (a onda terá se deslocado durante 3,0 s a partir da situação inicial representada), a onda terá percorrido:

$$D = 60 \text{ cm/s} \cdot 2,6 \text{ s} = 156 \text{ cm.}$$

A extremidade da corda está devidamente amarrada na parede (extremidade fixa).



A extremidade da corda, com o auxílio de um dispositivo, possui liberdade para oscilar, subir e descer, conforme a incidência da onda (extremidade livre).



Saiba



### Sonar

Até há pouco tempo não se sabia muito sobre a parte líquida da crosta terrestre de nosso planeta: os oceanos.

Sabe-se hoje em dia que o fundo dos oceanos possui inúmeras cadeias montanhosas e enormes cânions, muitas vezes maiores dos que observamos na superfície da Terra.

Uma das tecnologias utilizadas para traçar o perfil do fundo oceânico é o sonar. Pelo fato de a água do mar ser quase transparente às ondas

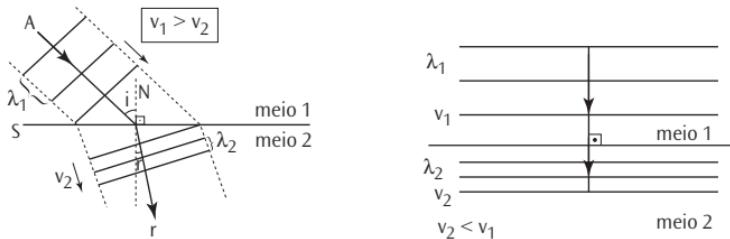
Continua...

sonoras, é possível emitir um pulso sonoro utilizando um transmissor normalmente colocado em navios ou submarinos. Sabendo-se o intervalo de tempo entre a transmissão e a recepção do eco proveniente do fundo oceânico, pode-se calcular a profundidade de determinado local.

## Refração das ondas

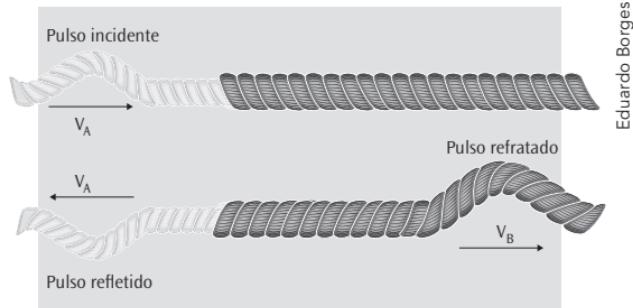
A refração é um fenômeno que ocorre sempre que uma onda atravessa a superfície de separação de dois meios, tendo como característica típica a mudança ou desvio na direção de propagação.

Embora a velocidade de propagação varie de um meio para outro, o desvio de trajetória só ocorre quando a incidência é oblíqua à superfície.



Em uma refração, há alteração no comprimento de onda, mas a frequência da onda não se altera.

Considere uma associação de duas cordas, uma de menor e outra de maior densidade linear (maior seção transversal) tensionadas por uma força  $F$ .



Produzindo um pulso no conjunto, ele se propagará segundo a expressão:

$$v = (F/(d \cdot S))^{1/2}$$

Onde:  $d$  é a densidade do material da corda; e

$S$  é a área da seção transversal da corda.

Na figura anterior, observa-se que o pulso se propaga da corda de seção transversal (corda fina, I) para a corda de maior seção transversal (corda grossa, II):

$$S_{II} > S_I \text{ e } v_{II} < v_I$$

Como a frequência é constante, tem-se:

$$f = \frac{v_I}{\lambda_I} = \frac{v_{II}}{\lambda_{II}}$$

Logo, a onda refratada tem menor comprimento de onda que a incidente:

$$\lambda_{II} < \lambda_I$$

Observe também que ocorrem dois fenômenos: refração e reflexão.

Quando o pulso passa de uma corda mais fina para uma corda mais grossa, "parte do pulso" passa para a corda mais grossa – pulso refratado – enquanto outra "parte do pulso", invertida, se reflete.

Quando o pulso passa de uma corda mais grossa para uma corda mais fina, "parte do pulso" passa para a corda mais fina – pulso refratado – enquanto outra "parte do pulso" se reflete, sem inversão de fase.

Em ambos os casos, a energia do pulso se distribui, parte é refratada e outra parte é refletida. Essa é uma característica da refração nos movimentos ondulatórios.

## Exemplo

Considere uma onda de frequência 50 Hz que se propaga com velocidade 8 m/s por uma corda devidamente esticada. A partir de determinado ponto, a densidade da corda muda. Pede-se:

- Calcule o comprimento da onda original.
- Calcule a velocidade de propagação da onda refratada no segundo trecho da corda. Considere que, neste segundo trecho, o comprimento de onda se altera para 20 cm.

## Resolução

- O comprimento original pode ser calculado:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$8 \text{ m/s} = \lambda_1 \cdot 50 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_1 = 0,16 \text{ m}$$

- Após refração, a velocidade será:

$$v_{||} = \lambda_{||} \cdot f$$

A frequência não se altera e, portanto,

$$v_{||} = 0,2 \text{ m} \cdot 50 \text{ s}^{-1}$$

$$v_{||} = 10 \text{ m/s}$$

Analizando o comportamento das grandezas físicas envolvidas no problema, pode-se perceber que, após a refração, o comprimento de onda e a sua velocidade de propagação aumentaram. Isto indica que a onda passou de uma região da corda de maior densidade (corda mais grossa) para uma região de menor densidade (corda mais fina).



## Ultrassom

São vibrações que variam em frequência acima de 20 kHz e produzem efeitos variados em sólidos, líquidos e gases. São utilizadas desde 1940 em inúmeras aplicações industriais, biológicas e médicas. A ultrassonografia é extensamente utilizada na medicina como auxiliar em diagnósticos. As ondas sonoras são transmitidas para o corpo e refletidas pelos tecidos internos e, por sua vez, são detectadas e exibidas na forma de imagens móveis em dispositivos de vídeo.

## Interferência

Denomina-se interferência o fenômeno que ocorre quando há sobreposição de duas ou mais ondas. Quando ondas se sobrepõem, o efeito resultante é dado pela soma dos efeitos que cada uma delas produziria separadamente. A sobreposição em si não altera as características das ondas, isto é, após a sobreposição cada onda mantém sua forma e características originais.

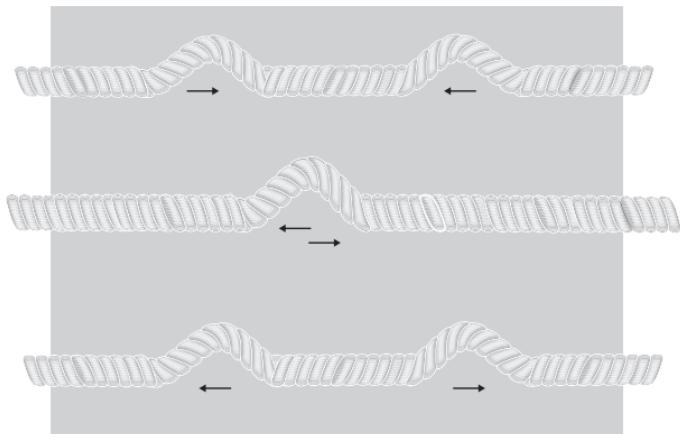
O fenômeno de interferência pode ser classificado como construtivo ou destrutivo.

Denomina-se *interferência construtiva* a situação em que uma onda amplia o efeito da outra.



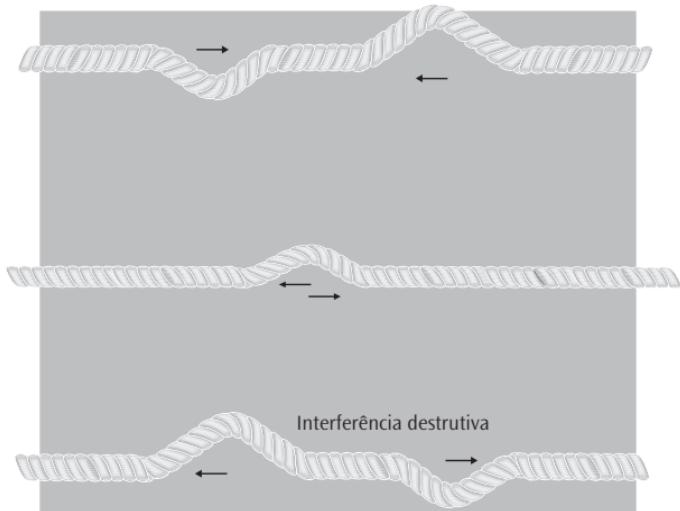
Pdiaz/Dreamstime

Interferência de ondas. Situação em duas dimensões.



Eduardo Borges

Denomina-se *interferência destrutiva* a situação em que uma onda atenua o efeito da outra.

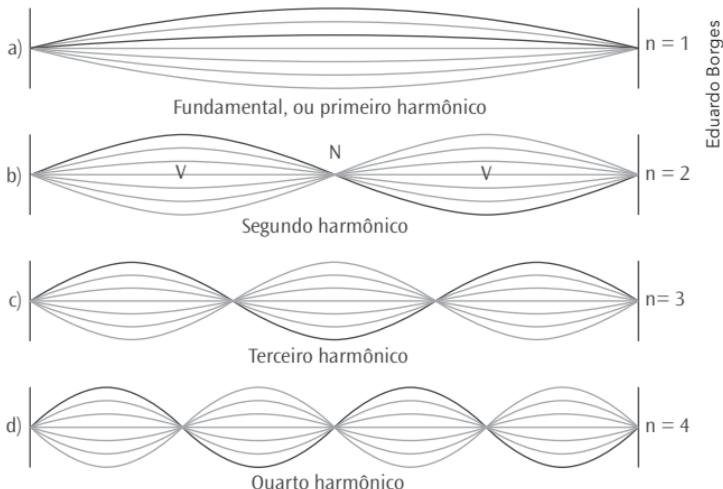


Eduardo Borges

## Ondas estacionárias

A onda estacionária caracteriza-se pela ocorrência de duas ondas de mesma frequência, comprimento de onda e amplitude que se propagam em uma mesma direção, porém, de sentidos contrários.

Considere uma corda presa em ambas as extremidades – como em um violão – e colocada a vibrar por efeito de uma força. Em determinadas intensidades da força aplicada, a corda passa a vibrar formando um único ventre – pontos onde a amplitude é máxima – entre dois nós – pontos onde a amplitude é nula. Diz-se, então, que a corda entra em ressonância.



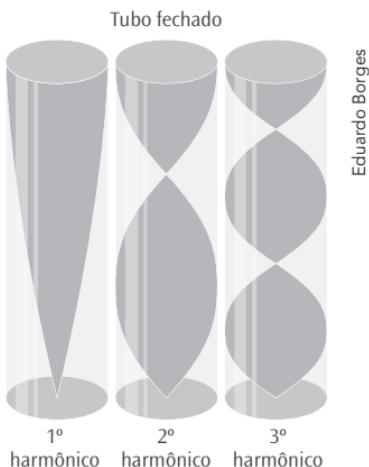
A cada situação de ressonância corresponde uma frequência de ressonância. Para casos em que as extremidades da corda estão fixas, essas frequências podem ser calculadas:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Onde:  $n$  representa o número de ventres;  
 $L$  é o comprimento da corda;  
 $F$  é a força aplicada sobre a corda; e  
 $\mu$  é a densidade linear da corda.

Esta expressão se aplica a instrumentos musicais de cordas.

Para instrumentos de sopro, a expressão toma outra forma. A maioria dos instrumentos de sopro são tubos onde uma extremidade é fechada, e a outra, aberta. Comumente se denomina este tipo de tubo como *tubo fechado*. Na extremidade fechada surge um nó, e na extremidade aberta, um ventre.

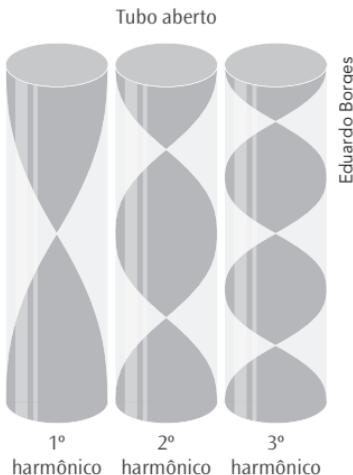


Nesses tubos, as frequências das ondas estacionárias podem ser expressas:

$$f_n = \frac{nv}{4L}$$

Onde:  $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ;  
 $v$  é a velocidade da onda sonora no interior do tubo; e  
 $L$  é o comprimento do tubo.

Para tubos abertos, temos um ventre em cada extremidade,



e a expressão, neste caso, é

$$f_n = \frac{nv}{2L}$$

Com  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

### Exemplo

Considere uma corda de densidade linear 0,012 kg/m e comprimento 0,5 m fixa nas extremidades. A corda é submetida a uma força de 30 N e vibra de modo a se observar 5 ventres. Calcule:

- O comprimento de onda e a frequência da onda estacionária.
- A frequência fundamental ( $n = 1$ ).

### Resolução

- O comprimento da corda  $L = 0,50$  m equivale a 5 ventres (5 meias-ondas)

$$L = n \cdot \lambda/2$$

$$0,5 = 5 \cdot \lambda/2$$

$$\lambda = 0,20 \text{ m}$$

Sendo  $n = 5$ ,  $L = 0,50$ ,  $F = 30\text{N}$  e  $\mu = 0,012 \text{ kgh/m}$ , a frequência será:

$$f_5 = (5/1) \cdot (30/0,012)^{1/2}$$

$$f_5 = 250 \text{ Hz}$$

b) A frequência fundamental pode ser calculada:

$$f_n = n \cdot f_1$$

$$f_5 = 5 \cdot f_1$$

$$250 = n \cdot f_1$$

$$f_1 = 50 \text{ Hz}$$

## Difração

O fenômeno de difração pode ser entendido como a capacidade de uma onda contornar obstáculos. Esse fenômeno ocorre com ondas bidimensionais e tridimensionais.

A difração é explicada com base no Princípio de Huygens:

“Cada ponto de uma frente de onda se comporta como nova fonte de onda”.

Assim, por exemplo, quando estamos em casa, no quarto, podemos ouvir sons que venham de um lugar da casa ou mesmo de fora dela.

## O som

O som é uma onda tridimensional, mecânica e longitudinal.

Por ser uma onda mecânica, o som não se propaga no vácuo. A velocidade do som depende do meio em que ele se propaga: no ar toma-se como padrão a velocidade de 340 m/s, mas isto pode variar conforme a temperatura e a composição do ar.

O ouvido humano consegue captar sons cujas frequências se situam na faixa de 20 Hz a 20 kHz.

São três as qualidades do som: *altura*, *timbre* e *intensidade*.

A altura permite caracterizar o som como grave ou agudo; está relacionada com a frequência, de forma que, quanto maior a frequência, maior a altura, mais agudo é o som.

Timbre é a qualidade de som que permite ao ouvido humano distinguir dois sons de mesma altura e intensidade emitidos por instrumentos diferentes; está relacionado com a forma da onda sonora.

Intensidade: permite classificar o som como forte ou fraco; está relacionada com a energia transportada pela onda.

A intensidade média do som pode ser dada pela relação entre a potência média ( $P_m$ ) emitida pela fonte e a área ( $S$ ) que o som atravessa num determinado instante:

$$I_m = \frac{P_m}{S}$$

A unidade de intensidade, no SI, é  $\text{W/m}^2$ .

A menor intensidade audível é  $I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$  (para a frequência de 1000 Hz).

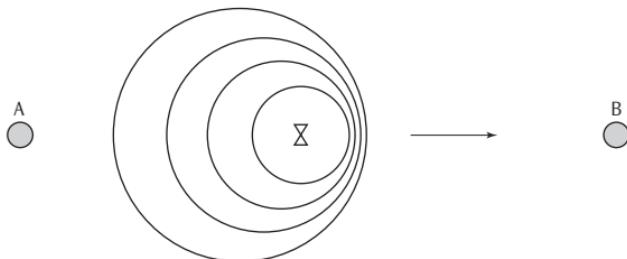
Relacionado à intensidade sonora, define-se *nível de intensidade* ou *nível sonoro* ( $\beta$ ) a uma grandeza voltada especificamente ao ser humano:

$$\beta = \log (I/I_0)$$

A unidade de nível sonoro é o bel, embora se use mais comumente o decibel (db).

## Efeito Doppler

Quando um observador se move em direção a uma fonte sonora, a frequência do som percebida aumenta e quando ele se afasta, a frequência diminui. Esse fenômeno é denominado Efeito Doppler.



Efeito Doppler: uma fonte sonora se afasta do observador A e se aproxima do observador B. O observador A vai ouvir um som mais grave (menor frequência, maior comprimento de onda) que o real, e o observador B ouvirá um som mais agudo (maior frequência, menor comprimento de onda) que o real.

A frequência ( $f_{obs}$ ) ouvida pelo observador pode ser expressa por:

$$f_{obs} = f \cdot \frac{v_{\text{som}} \pm v_{\text{obs}}}{v_{\text{som}} \pm v_{\text{fonte}}} ,$$

onde:  $f$  é a frequência real da fonte;

$v_{\text{som}}$  é a velocidade da onda;

$v_{\text{obs}}$  é a velocidade do observador (sinal positivo ao se aproximar da fonte, negativo ao se afastar); e

$v_{\text{fonte}}$  é a velocidade da fonte (sinal positivo ao se afastar, negativo ao se aproximar do observador).

## Exemplos

- Uma ambulância passou por uma pessoa parada. O som ouvido pelo observador em um determinado instante quando da aproximação da ambulância é de 1080 Hz. Após a passagem da ambulância, quando ela já está se afastando do observador, em determinado instante ouve-se um som de frequência 900 Hz. Considerando a velocidade do som no ar de 340 m/s, calcule a velocidade da ambulância e a frequência real da fonte.

## Resolução

A frequência ouvida em um momento durante a aproximação é 1080 Hz. Logo:

$$f_{obs} = f \cdot \frac{v_{som} \pm v_{obs}}{v_{som} \pm v_{fonte}}$$

$$1080 = f \cdot \frac{340 + 0}{340 - v_{fonte}}$$

Para a situação de afastamento, tem-se:

$$900 = f \cdot \frac{340 + 0}{340 + v_{fonte}}$$

Dividindo uma equação pela outra,

$$\frac{1080}{900} = \frac{340 / (340 - v_{fonte})}{340 / (340 + v_{fonte})}$$

$$1,2 = \frac{(340 + v_{fonte})}{(340 - v_{fonte})}$$

$$1,2 \cdot (340 - v_{fonte}) = (340 + v_{fonte})$$

$$v_{\text{fonte}} = 30,9 \text{ m/s} = 111 \text{ km/h} \text{ (aproximadamente).}$$

A frequência da fonte vale:

$$1080 = f \cdot \frac{340 + 0}{340 - 30,9}$$

$$f = 981,8 \text{ Hz}$$

2. A frequência do som emitido por uma fonte vale 3000 Hz. Se a fonte se aproxima do observador com velocidade 50 m/s, em relação à Terra, e este se aproxima da fonte com velocidade 5 m/s, também em relação à Terra, calcule a frequência por ele ouvida. Considere que a velocidade do som é 340 m/s no local.

### Resolução

$$f_{\text{obs}} = f \cdot \frac{v_{\text{som}} + v_{\text{obs}}}{v_{\text{som}} - v_{\text{fonte}}}$$

$$f_{\text{obs}} = 3000 \cdot \frac{340 + 5,0}{340 - 50,0}$$

$$f_{\text{obs}} = 3569 \text{ Hz.}$$

Esse fenômeno não é exclusivo de ondas sonoras. Quando ocorre com ondas luminosas, à medida que o observador se aproxima da fonte, a frequência da luz percebida aumenta – diz-se que há um “desvio para o azul”. Se observador e fonte se afastam, ocorre um “desvio para o vermelho” – a frequência da onda decresce.

O Efeito Doppler com a luz é de grande importância nos estudos astrofísicos. Com base neles, é possível detectar se uma galáxia está se afastando ou se aproximando do Sistema Solar ou da Via Láctea, por exemplo. Basta analisar o espectro eletromagnético da luz emitida pelas estrelas de certa região do espaço. Isso permite

identificar as substâncias que constituem essas estrelas. De posse dessas informações, compara-se, em termos de frequência, o espectro obtido com o espectro “padrão” da mesma substância quando emitido aqui na Terra. As variações nas frequências indicam, não só se a galáxia está se afastando ou se aproximando da Terra, como também é possível determinar o módulo dessa velocidade.

## TESTE SEU SABER

1. Um conjunto de ondas periódicas transversais, de frequência 20 Hz, propaga-se em uma corda. A distância entre uma crista e um vale adjacente é de 2 m. Determine:
  - a) O comprimento de onda.
  - b) A velocidade do movimento ondulatório.
2. O ouvido humano é capaz de perceber ondas sonoras de frequências entre 20 e 20000 Hz, aproximadamente. Entretanto, sabe-se que alguns animais são capazes de perceber ondas longitudinais de frequências maiores, os ultrassons. Um cachorro, por exemplo, pode perceber ultrassons de até 50000 Hz. A partir dessas informações, se um apito produz, no ar (velocidade do som no ar é 340 m/s), ondas longitudinais de comprimento de 10 mm, por quem elas são ouvidas? Justifique.
3. (Unesp-SP) Nas últimas décadas, o cinema tem produzido inúmeros filmes de ficção científica com cenas de guerras espaciais, como *Guerra nas estrelas*. Com exceção de *2001, uma odisseia no espaço*, estas cenas apresentam explosões com estrondos impressionantes, além de efeitos luminosos espetaculares, tudo isso no espaço interplanetário. Comparando *Guerra nas estrelas*, que apresenta efeitos sonoros de explosão, com *2001, uma odisseia no espaço*, que não os apresenta, qual deles está de acordo com as leis da Física? Justifique.  
E quanto aos efeitos luminosos que todos apresentam? Justifique.
4. (Fuvest-SP) A Rádio USP opera na frequência de 93,7 MHz. Considerando-se que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na atmosfera é igual a 300000 km/s, qual o comprimento de onda emitida pela Rádio USP?

5. (UEM-PR) Duas pessoas estão nas margens opostas de um lago de águas tranquilas. Para comunicar-se com a outra, uma delas coloca um bilhete dentro de uma garrafa que, depois de arrolhada, é abandonada na água, sem velocidade inicial. A seguir, a pessoa aciona a água periodicamente, produzindo ondas que se propagam. Desta maneira, pensa, à medida que os pulsos atingirem a garrafa, ela será transportada para a outra margem. Em relação a esse fato, podemos afirmar:
- a) Se a pessoa provocar ondas de grandes amplitudes, a garrafa será transportada mais depressa.
  - b) O tempo de transporte dependerá do peso da garrafa.
  - c) Quanto maior for o comprimento de onda, mais depressa se fará o transporte da garrafa.
  - d) A garrafa não vai ser transportada, porque o que se propaga é a perturbação e não o meio.
  - e) Qualquer que seja a frequência da onda, o tempo que a garrafa gasta para atingir a outra margem será o mesmo.
6. Uma onda de sonar (ultrassom) é emitida com velocidade de 300 m/s. Recebem-se como respostas dois ecos com intervalos de tempo de 2,0 s e 6,0 s, respectivamente. Pode-se dizer que os objetos refletores estão a:
- a) 600 m e 1200 m.
  - b) 600 m e 900 m.
  - c) 300 m e 900 m.
  - d) 300 m e 600 m.
  - e) 150m e 300 m.
7. Com relação ao som e à luz, assinale a alternativa errada:
- a) O brilho do Sol, que vemos na lataria de um automóvel, é proveniente da reflexão da luz solar na superfície polida do automóvel.
  - b) O eco do barulho de uma explosão provém da reflexão, em algum anteparo, das ondas sonoras provocadas pela explosão.
  - c) A onda luminosa precisa de um meio para se propagar.
  - d) A onda sonora só se propaga em meio material.
  - e) O fenômeno de polarização não ocorre em ondas sonoras.
8. (PUC-SP) Para determinar a profundidade de um poço de petróleo, um cientista emitiu com uma fonte, na abertura do poço, ondas sonoras de frequência 220 Hz. Sabendo-se que o comprimento de onda, durante o

- percurso, é de 1,5 m e que o cientista recebe como resposta um eco após 8 s, a profundidade do poço é:
- a) 2640 m.    b) 1440 m.    c) 2880 m.    d) 1320 m.    e) 330 m.
9. (Fuvest-SP) Uma onda eletromagnética propaga-se no ar com velocidade praticamente igual à da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s), enquanto o som propaga-se no ar com velocidade aproximada de 330 m/s. Deseja-se produzir uma onda audível que se propague no ar com o mesmo comprimento de onda daquelas utilizadas para transmissões de rádio em frequência modulada (FM) de 100 MHz. A frequência da onda audível deverá ser aproximadamente de:
- a) 110 Hz.    b) 1033 Hz.    c) 11000 Hz.    d)  $10^8$  Hz.    e)  $9 \times 10^{13}$  Hz.
10. (UEL-PR) A velocidade de propagação  $v$  de um pulso transversal numa corda depende da força de tração  $T$  com que a corda é esticada e de sua densidade linear  $d$  (massa por unidade de comprimento):  $v = (T/d)^{1/2}$ . Um cabo de aço, com 2,0 m de comprimento e 200 g de massa, é esticado com uma força de tração de 40 N. A velocidade de propagação de um pulso nesse cabo é, em m/s:
- a) 1,0    b) 2,0    c) 4,0    d) 20,0    e) 40,0
11. (Cesgranrio-RJ) Em uma festa no clube, uma pessoa observa que, quando se encontra mergulhada na água da piscina, ela ouve a música que está sendo tocada no mesmo tom que ouvia quando estava fora da piscina. Considere a velocidade de propagação, o comprimento de onda e a frequência como sendo, respectivamente,  $v_1$ ,  $\lambda_1$  e  $f_1$  para o som ouvido fora da piscina e  $v_2$ ,  $\lambda_2$  e  $f_2$  para o som ouvido dentro da água. Assinale a opção que apresenta uma relação correta entre essas grandezas:
- a)  $v_1 = v_2$     b)  $v_1 > v_2$     c)  $f_1 = f_2$     d)  $f_1 > f_2$     e)  $\lambda_1 = \lambda_2$
12. (UECE) Uma mocinha chamada Clara de Assis deixa cair, lentamente, um pequeno pedaço de cortiça sobre o centro de um vaso cilíndrico, de diâmetro 60 cm, quase completamente cheio de água. Forma-se, então, ondas concêntricas, que se propagam com velocidade de 2 cm/s. Assinale a alternativa correta:
- a) A cortiça permanece em repouso.  
b) A cortiça chega à parede do vaso em 15 s.  
c) A cortiça chega à parede do vaso em 30 s.

- d) A cortiça não se desloca até a parede do vaso.  
e) Nenhuma das alternativas anteriores é correta.
- 13.** (Fuvest-SP) A luz solar penetra numa sala através de uma janela de vidro transparente. Abrindo-se a janela, a intensidade da radiação solar no interior da sala:  
a) Permanece constante.  
b) Diminui, graças à convecção que a radiação solar provoca.  
c) Diminui, porque os raios solares são concentrados na sala pela janela de vidro.  
d) Aumenta, porque a luz solar não sofre mais difração.  
e) Aumenta, porque parte da luz não mais se reflete na janela.
- 14.** (UFMG) As seis cordas de um violão têm espessuras diferentes e emitem sons que são percebidos pelo ouvido de forma diferente. No entanto, com boa aproximação, pode-se afirmar que todas elas emitem ondas sonoras que, no ar, têm:  
a) A mesma altura.  
b) A mesma frequência.  
c) A mesma intensidade.  
d) A mesma velocidade.  
e) O mesmo comprimento de onda.
- 15.** (Vunesp-SP) Pesquisadores da Unesp, investigando os possíveis efeitos do som no desenvolvimento de mudas de feijão, verificaram que os sons agudos podem prejudicar o crescimento dessas plantas, enquanto sons mais graves, aparentemente, não interferem no processo. (*Ciência e Cultura* 42 (7): 180-1, jul. 1990). Nesse experimento o interesse dos pesquisadores fixou-se principalmente na variável física:  
a) Velocidade.  
b) Umidade.  
c) Temperatura.  
d) Frequência.  
e) Intensidade.

- 16.** (UFRS) Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do parágrafo a seguir.

Cada modo de oscilação da onda estacionária que se forma em uma corda esticada pode ser considerado o resultado da \_\_\_\_\_ de duas ondas senoidais idênticas que se propagam \_\_\_\_\_.

- a) interferência - sentidos contrários.
- b) interferência - no mesmo sentido.
- c) polarização - no mesmo sentido.
- d) dispersão - no mesmo sentido.
- e) dispersão - sentidos contrários.

- 17.** A voz humana é produzida pela vibração de duas membranas – as cordas vocais – que entram em vibração quando o ar proveniente dos pulmões é forçado a passar pela fenda existente entre elas. As cordas vocais das mulheres vibram, em geral, com frequência mais alta que as dos homens, determinando que elas emitam sons agudos (voz “fina”) e eles, sons graves (voz “grossa”).

A propriedade do som que nos permite distinguir o som agudo de um grave é denominada:

- a) Intensidade.
- b) Amplitude.
- c) Velocidade.
- d) Timbre.
- e) Altura.

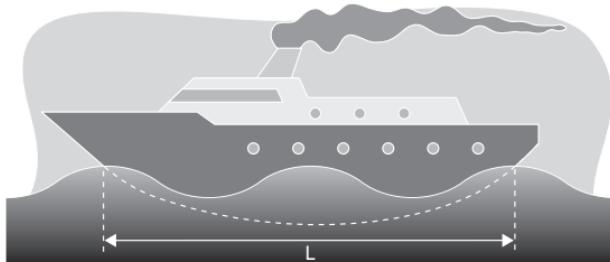
- 18.** (Ufam) Existe uma variedade muito grande de fenômenos ondulatórios na natureza. Olhos e ouvidos são belos exemplos de receptores de ondas luminosas e sonoras, respectivamente.

Na propagação de uma onda há transporte de:

- a) Massa e quantidade de movimento.
- b) Quantidade de movimento e energia.
- c) Energia e massa.
- d) Partículas e vibrações.

- 19.** (Fuvest) Um navio parado em águas profundas é atingido por uma crista de onda (elevação máxima) a cada  $T$  segundos. A seguir o navio é posto em movimento, na direção e no sentido de propagação das ondas e com a mesma velocidade delas. Nota-se, então (veja a figura adiante) que ao

longo do comprimento  $L$  do navio cabem exatamente 3 cristas. Qual é a velocidade do navio?



Eduardo Borges

- a)  $L/3T$       b)  $L/2T$       c)  $L/T$       d)  $2L/T$       e)  $3L/T$

## Descomplicando a Física

(ITA-2007) Considere uma sala à noite iluminada apenas por uma lâmpada fluorescente. Assinale a alternativa correta.

- a) A iluminação da sala é proveniente do campo magnético gerado pela corrente elétrica que passa na lâmpada.
- b) Toda potência da lâmpada é convertida em radiação visível.
- c) A iluminação da sala é um fenômeno relacionado a ondas eletromagnéticas originadas da lâmpada.
- d) A energia de radiação que ilumina a sala é exatamente igual à energia elétrica consumida pela lâmpada.
- e) A iluminação da sala deve-se ao calor dissipado pela lâmpada.

Resposta correta: Alternativa C.

### Resolução e comentário

Uma lâmpada incandescente opera por aquecimento de um fio, transformando energia elétrica em energia térmica e energia luminosa.

A lâmpada fluorescente possui maior eficiência por emitir mais energia eletromagnética em forma de luz do que em calor. Uma lâmpada fluorescente, no entanto, não possui eficiência de 100%. Seu funcionamento se baseia em fazer passar uma corrente elétrica em um gás à baixa pressão. Quando isso ocorre, há emissão de radiação que se converte em luz visível em função de uma camada de material à base de fósforo depositado na parte interna do corpo da lâmpada.

# 2.1 Princípios da óptica geométrica

## Diferença entre luz e visão

A visão nos proporciona a percepção de toda a diversidade de eventos que ocorre à nossa volta. Em uma fração de segundo, este sentido nos permite a absorção e assimilação de uma grande variedade de informações.

O fenômeno da visão resulta da combinação de dois elementos: a luz e o olho.

A luz é uma forma de energia que se propaga pelo espaço e, por ser uma radiação eletromagnética, ela independe da existência de meio material para se propagar. Isso quer dizer que a luz é capaz de se propagar tanto no meio material como no vácuo.

A óptica geométrica tem como ênfase o estudo da geometria dos raios de luz, sem se preocupar em justificar a trajetória por ele descrita.

## Fontes e velocidade da luz

Para que possamos ver um objeto é necessário que ele seja uma fonte de luz, isto é, que raios de luz possam ser emitidos ou refletidos a partir de sua superfície. Uma fonte de luz pode ser *puntiforme* ou *extensa*.

A fonte luminosa é denominada *puntiforme* quando suas dimensões podem ser desprezadas em relação às distâncias que a separam de outros corpos; caso contrário, é denominada *fonte extensa*.

Uma estrela, facilmente observável em noite de céu limpo, pode ser considerada fonte de luz *puntiforme*. A lâmpada de seu quarto, acesa durante seus estudos, deve ser considerada uma fonte de luz *extensa*, ao passo que, no mesmo instante, a referida lâmpada,

vista através da janela por alguém posicionado do outro lado da rua, por exemplo, pode ser tomada como uma fonte puntiforme.

Observe que toda fonte de luz pode também ser classificada como primária ou secundária. Uma fonte primária de luz emite luz própria, ou seja, é um corpo luminoso como o Sol ou uma lâmpada acesa.



Fototeca Internacional



Piccaya/PhotoXpress

Fontes de luz primárias.

Fonte secundária de luz, por sua vez, é um corpo que reflete a luz que recebe, isto é, necessita ser iluminado para ser visto, como a maioria dos corpos. São exemplos de fonte secundária: mesa, livro, garfo, lâmpada apagada ou queimada, pessoa, a Lua, entre outros.



NASA



Martini/PhotoXpress

Fontes de luz secundárias.

A luz se propaga com uma velocidade constante. A velocidade da luz depende do meio de propagação. No vácuo, a velocidade de propagação da luz ( $c$ ) corresponde a 300000 km/s, sendo menor em um meio material qualquer.

### Exemplo

Calcule o tempo que leva para a luz do Sol incidir sobre:

- A superfície do planeta Terra (distância aproximada Terra-Sol:  $1,5 \cdot 10^{11}$  m).
- A superfície de Plutão (distância aproximada Plutão-Sol:  $6 \cdot 10^{12}$  m).

### Resolução

- Para atingir a Terra, a luz do Sol levará,

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$$3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = \frac{1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}}{\Delta t}$$

$$\Delta t = 500 \text{ s}$$

e, portanto, quando olhamos o Sol, estamos observamos algo que já é passado, há 8 minutos e 20 segundos.

- Para atingir Plutão, a luz do Sol levará,

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$$3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = \frac{6,0 \cdot 10^{12} \text{ m}}{\Delta t}$$

$$\Delta t = 20000 \text{ s}$$

ou 5,5 horas, aproximadamente.

## Princípios da óptica geométrica

Princípio da propagação retilínea da luz: a luz se propaga em linha reta em meios homogêneos e transparentes.



Photodisc

Princípio da reversibilidade dos raios de luz: a trajetória de um raio de luz não depende do seu sentido de propagação.



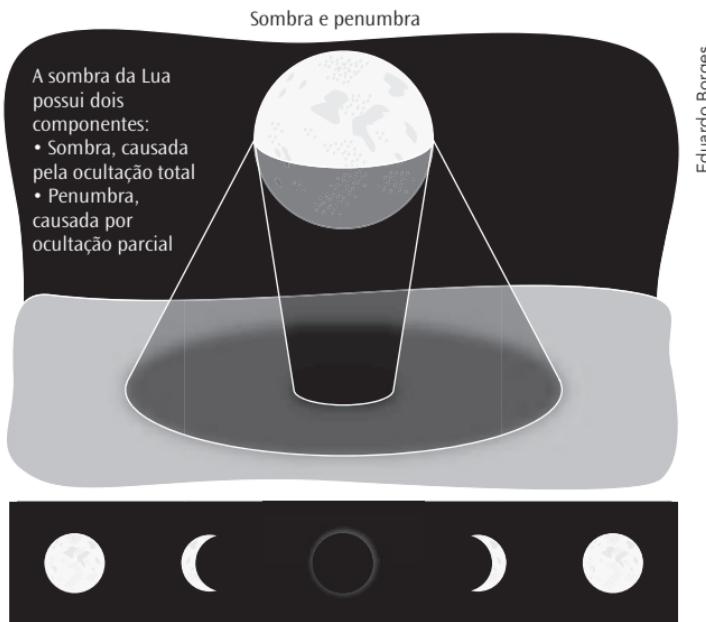
Arkady Chubykin/PhotoXpress

Princípio da independência dos raios de luz: cada raio de luz se propaga independentemente dos demais. Quando dois raios de luz se cruzam, um não afeta a direção de propagação do outro, eles o fazem sem que haja desvio de suas trajetórias originais.

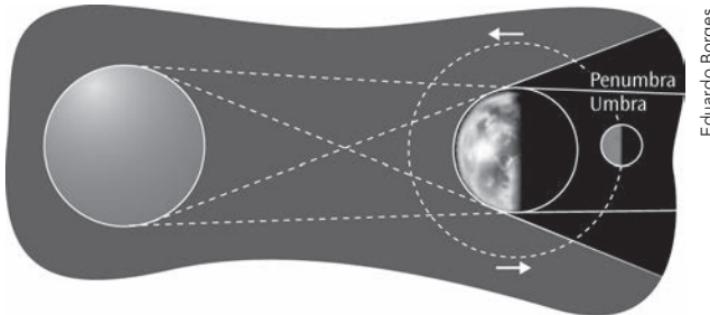


Imre Forgo/Dreamstime

Os fenômenos de sombra e penumbra representam exemplos do princípio da propagação retilínea da luz.



Observe a diferença entre sombra (umbra) e penumbra.





## Eclipses

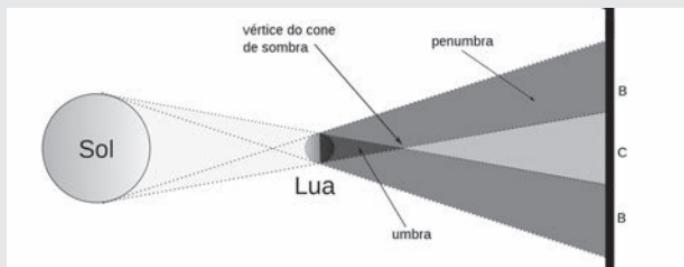
Os eclipses são fenômenos baseados na propagação retílinea da luz.

Para que haja um eclipse, é necessário que a Terra, a Lua e o Sol estejam alinhados. O eclipse pode ser total ou parcial dependendo de o alinhamento ser mais ou menos exato e da posição relativa em que o observador se encontra na Terra.

Quando a Lua está posicionada entre o Sol e a Terra, ocorre o que denominamos eclipse do Sol. Esse tipo de eclipse ocorre na Lua Nova.

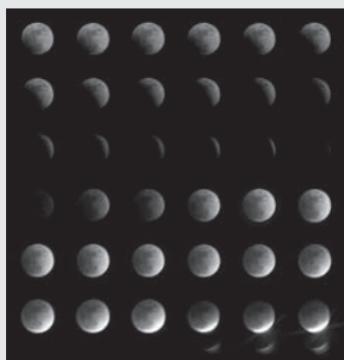


NASA



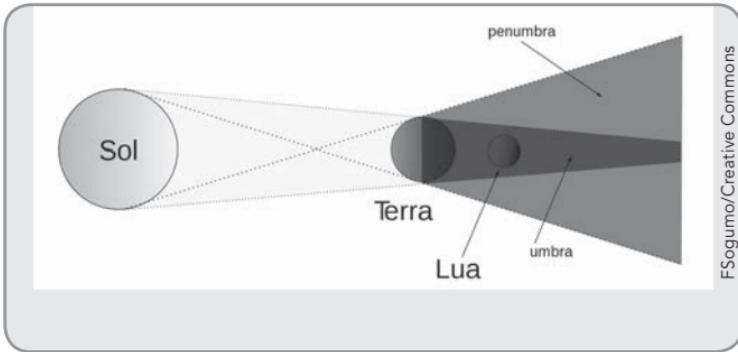
FSogumo/Creative Commons

Quando a Terra está posicionada entre o Sol e a Lua, temos o eclipse da Lua. Esse tipo de eclipse ocorre na Lua Cheia.



Ahmad Van der Breggen/Creative Commons

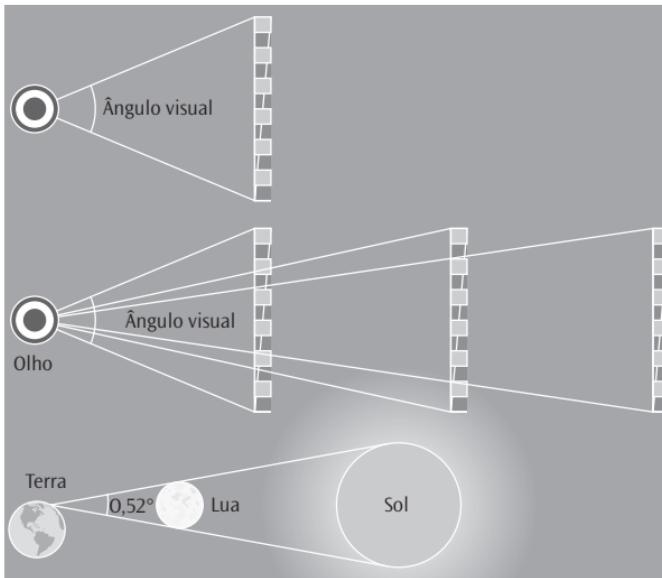
Continua...



FSogumo/Creative Commons

## Ângulo visual

As dimensões aparentes de um corpo dependem do ângulo de que é visto. O ângulo visual é uma consequência da propagação retilínea da luz.



Eduardo Borges

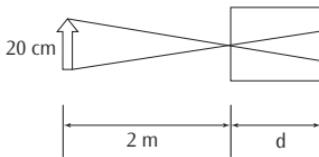
## Exemplo

Um objeto de 20 cm está a 2 m de uma câmara escura de orifício. A imagem deste objeto possui 4 cm de altura. Qual a largura da câmara escura?

## Resolução

A questão pode ser resolvida por semelhança de triângulo:

$$\frac{20 \text{ cm}}{2 \text{ m}} = \frac{4 \text{ cm}}{d}$$



$$d = \frac{2 \cdot 4}{20}$$

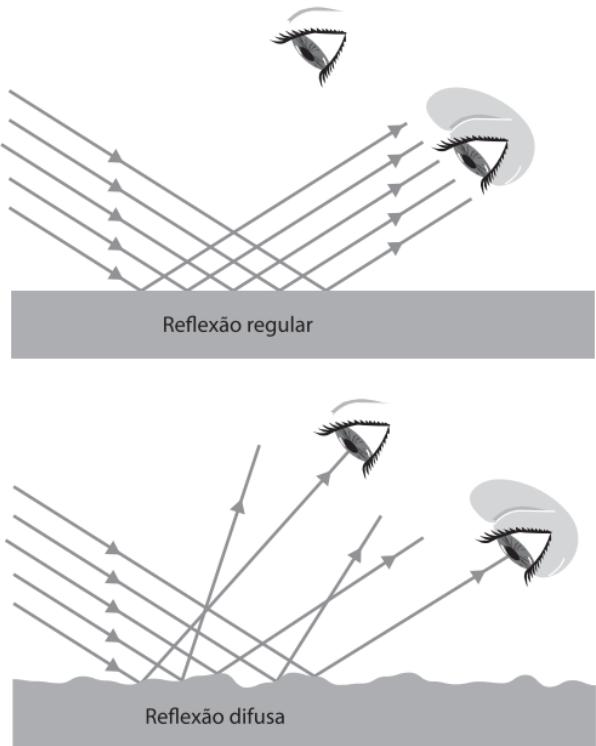
$$d = 0,4 \text{ m}$$

## Reflexão

Quando a luz, que se propaga por um meio, atinge uma superfície (não a atravessa, nem tampouco é absorvida por ela) e volta, permanecendo no meio em que estava, dizemos que a luz sofre *reflexão*.

Um feixe de raios de luz que atinge uma superfície perfeitamente polida, plana e regular, é refletido preservando a condição de paralelismo dos raios luminosos. Nesse caso, dizemos que a reflexão é *regular* ou *especular*.

Caso o feixe de raios luminosos atinja uma superfície não regular, será refletido sem que a condição de paralelismo seja mantida, refletindo-os nas mais variadas direções. Nesse caso, dizemos que a reflexão é *difusa*. Esse tipo de reflexão é que torna os corpos iluminados, transformando-os em fontes de luz, e, portanto, podem ser perceptíveis ao olho.

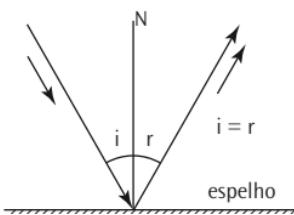


Eduardo Borges

A reflexão da luz é regida por duas leis:

*Primeira* – O raio incidente, o raio refletido e a reta normal à superfície de fronteira entre os dois meios estão no mesmo plano, ou seja, são coplanares.

*Segunda* – O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência.



## Eselho plano

Denomina-se *eselho plano* toda superfície que tem a capacidade de refletir a luz de forma regular. Uma superfície metálica

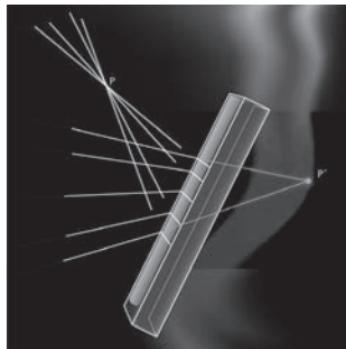
extremamente polida pode, por exemplo, ser considerada um espelho plano. Nos espelhos comuns, a superfície de vidro não é a responsável pela reflexão da imagem, e sim a camada metálica por trás dele depositada.

Se um ponto luminoso  $P$  é disposto diante de um espelho plano, os raios de luz originários do ponto ou que passam pelo ponto serão refletidos pelo espelho. Caso um observador esteja olhando para o espelho, ele terá a impressão de que a luz refletida tem origem no ponto  $P'$  (como se a luz estivesse saindo de dentro do espelho).

O ponto  $P'$  é denominado *ponto imagem virtual*, visto que ele é obtido pelo prolongamento dos raios refletidos pelo espelho. O ponto luminoso  $P$  é denominado *ponto objeto real*.

Em um espelho plano, têm-se as seguintes características:

- as distâncias do ponto objeto ( $P$ ) ao espelho e do ponto imagem ( $P'$ ) ao espelho, são iguais;
- objeto e imagem possuem o mesmo tamanho;
- considerando um corpo extenso, a imagem é enantiomorfa em relação ao objeto.



## Enantiomorfismo

Simetria de dois objetos que não podem ser sobrepostos, tal como a mão direita em relação à mão esquerda.



Raquel Ranieri

## *O que é virtualidade?*

Algo que seja virtual é irreal? Ou real?

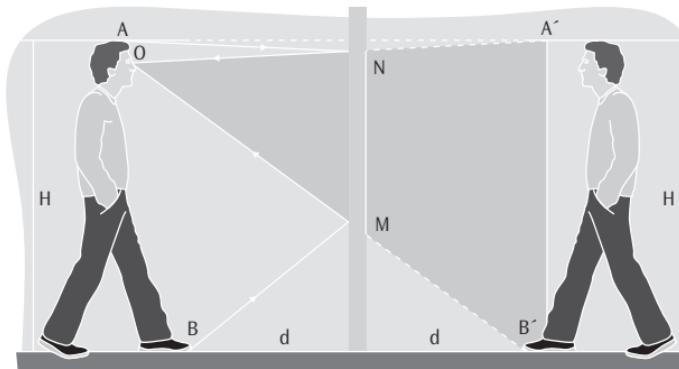
A internet é real ou virtual?

Há muitas interpretações para o conceito de virtualidade. De uma maneira simples, tomando como exemplos imagens em espelhos e também a internet, poderíamos dizer que virtual é algo que existe em um espaço físico que não existe. Dessa forma, virtual não é sinônimo de real nem de irreal, como também não se opõe nem a um nem a outro.

### Exemplo

Considere uma pessoa de 1,80 m diante de um espelho plano colocado na posição vertical. Calcule a altura mínima que deve ter o espelho para que a pessoa veja sua imagem de corpo inteiro.

## Resolução



A partir da figura, pode-se observar que os triângulos  $OMN$  e  $OA'B'$  são semelhantes, então,

$$\frac{H}{MN} = \frac{2d}{d}$$

$$MN = H/2$$

$$MN = 0,90 \text{ m}$$

Ou seja, o tamanho mínimo para que uma pessoa se veja de corpo inteiro em um espelho deve ser metade da altura da pessoa.

Observe que a altura mínima do espelho não depende da distância da pessoa ao espelho ( $d$ ). À medida que a pessoa se afasta do espelho, sua imagem também se afasta daquele. Devido ao ângulo visual, a impressão que se tem é que ela parece menor, mas a imagem continua sempre do mesmo tamanho que o objeto e ajustada ao tamanho do espelho.

Pode-se demonstrar, também por semelhança de triângulos, que a distância em que a borda inferior do espelho deve estar do chão equivale à metade da distância dos olhos do indivíduo ao chão.



## Fases da Lua

A Lua não possui luz própria. Podemos vê-la porque a luz do Sol incide sobre sua superfície e é refletida, chegando aos nossos olhos. Em suma, só podemos observar a face da Lua que é iluminada pelo Sol.

Em função da posição relativa dos três astros – Lua, Terra e Sol – temos as fases da Lua, evento periódico cujo ciclo se repete a cada 29,5 dias, aproximadamente.

A fase Lua Nova ocorre quando a face da Lua voltada para a Terra apresenta-se para nós inteiramente escura. Isto ocorre porque a Lua se encontra posicionada entre a Terra e o Sol. Nesta situação pode ocorrer o que denominamos eclipse do Sol.

A partir de então, à medida que o tempo passa, o sistema Terra-Lua se altera de posição em relação ao Sol e há um aumento gradual da região iluminada da Lua. Surge então a fase Lua Crescente e, a seguir, a Lua Cheia, situação esta em que a face da Lua voltada para a Terra está completamente iluminada – neste caso, a Terra está colocada entre a Lua e o Sol, situação em que ocorrem os eclipses lunares.



Eduardo Borges

Continua...

Após a fase Lua Cheia, a Lua volta a ficar gradativamente menos iluminada, ocorrendo o que é denominado Lua Minguante, até atingir a fase Lua Nova, e um novo ciclo se inicia.

Quando vista do hemisfério sul, na fase crescente, a Lua parece um C e, na fase minguante, ela parece um D; no hemisfério norte ocorre o contrário.



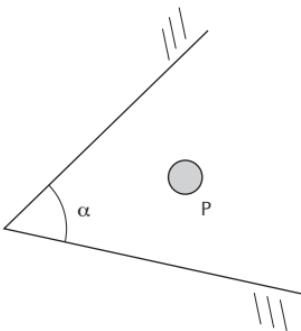
Patrônio Designs/  
Shutterstock

Fases da Lua vista do hemisfério sul.

## Associação de espelhos planos

Considere dois espelhos planos posicionados segundo um ângulo  $\alpha$  e um objeto A colocado entre eles, conforme representação ao lado.

O número de imagens (n) gerado pela associação pode ser calculado:



$$n = \frac{360}{\alpha} - 1,$$

onde, sendo par o parâmetro  $360/\alpha$ , o objeto pode estar situado em qualquer posição entre os espelhos ou, sendo ímpar, o objeto tem de estar equidistante dos dois espelhos.

---

## TESTE SEU SABER

---

1. Num eclipse total do Sol, o disco lunar cobre exatamente o disco solar, o que comprova que o ângulo sob o qual vemos o Sol é o mesmo sob o qual vemos a Lua. Considerando que o raio da Lua é 1738 km e que a distância da Lua ao Sol é 400 vezes a da Terra à Lua, calcule o raio do Sol.
2. Uma pessoa de 1,80 m de altura encontra-se a 2,0 m do orifício de uma câmara escura de 20 cm de comprimento. Qual a altura da imagem formada?
3. Admita que o Sol subitamente “morresse”, ou seja, sua luz deixasse de ser emitida. Vinte e quatro horas após este evento, um eventual sobrevivente, olhando para o céu, sem nuvens, veria:
  - a) A Lua e as estrelas.
  - b) Somente a Lua.
  - c) Somente as estrelas.
  - d) Uma completa escuridão.
  - e) Somente os planetas do Sistema Solar.
4. O menor tempo possível entre o eclipse do Sol e o da Lua é de aproximadamente:
  - a) 12 horas.
  - b) 24 horas.
  - c) 1 semana.
  - d) 2 semanas.
  - e) 1 mês.
5. Dois raios de luz, que se propagam num meio homogêneo e transparente, se interceptam em certo ponto. A partir deste ponto, pode-se afirmar que:
  - a) Os raios luminosos se cancelam.
  - b) Mudam a direção de propagação.
  - c) Continuam se propagando na mesma direção e sentido que antes.
  - d) Se propagam em trajetórias curvas.
  - e) Retornam em sentidos opostos.
6. Uma criança aproxima-se de um espelho plano com velocidade  $v$ , na direção da normal ao espelho. Podemos afirmar que sua imagem:

- a) Afasta-se do espelho com velocidade  $v$ .
  - b) Aproxima-se do espelho com velocidade  $v$ .
  - c) Afasta-se do espelho com velocidade  $2v$ .
  - d) Aproxima-se do espelho com velocidade  $2v$ .
  - e) Afasta-se do espelho com velocidade  $v/2$ .
7. Um objeto está a 2 m de uma câmara escura de orifício. A imagem deste objeto possui um terço de sua altura. Qual a largura da câmara escura?

## Descomplicando a Física

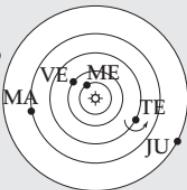
(ITA) Numa certa data, a posição relativa dos corpos celestes do Sistema Solar era, para um observador fora do Sistema, a seguinte: O sentido de rotação da Terra está indicado na figura. A figura não está em escala. Do diagrama apresentado, para um observador terrestre não muito distante do Equador, pode-se afirmar que:

- I. Marte e Júpiter eram visíveis à meia-noite.
- II. Mercúrio e Vênus eram visíveis à meia-noite.
- III. Marte era visível a oeste ao entardecer.
- IV. Júpiter era visível à meia-noite.

- a) Somente a IV é verdadeira.
- b) III e IV são verdadeiras.
- c) Todas são verdadeiras.
- d) I e IV são verdadeiras.
- e) Nada se pode afirmar com os dados fornecidos.

Resposta correta: Alternativa B.

ME = Mercúrio  
VE = Vênus  
TE = Terra  
MA = Marte  
JU = Júpiter



### Resolução

Mercúrio e Vênus não são visíveis por estarem posicionados atrás do Sol. Com base no movimento de rotação da Terra representado, Marte pode ser visto ao amanhecer e também ao entardecer. À meia-noite o observador está em oposição ao Sol, com o planeta Júpiter sobre sua cabeça.

# 22

# Espelhos esféricos

Espelho esférico consiste em uma superfície esférica que é capaz de promover uma reflexão regular em uma das faces. Quando a face refletora é a parte interna da superfície esférica, o espelho é denominado côncavo. Quando a face refletora é a parte externa, o espelho é denominado convexo.



Espelho convexo.

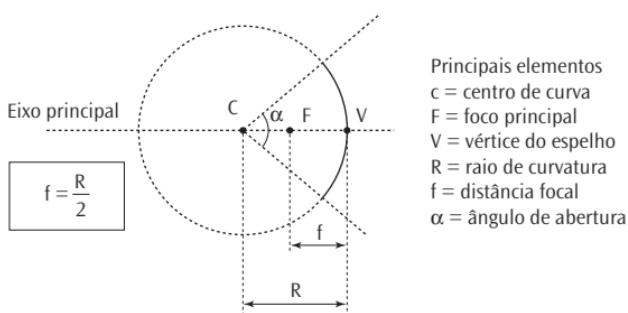
Hans Klamml/Dreamstime



Espelho côncavo.

Joël Beur/Fotolia

Na figura abaixo, vemos os elementos geométricos mais importantes de um espelho esférico:



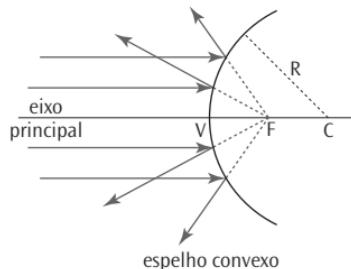
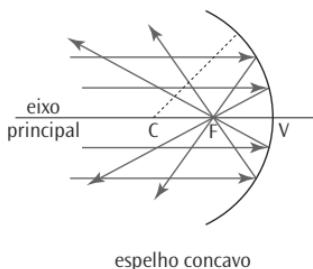
O estudo de espelhos esféricos só se justifica nas condições em que ele possa ser considerado estigmático, isto é, um ponto objeto fornece um único ponto imagem. Para que um espelho esférico seja estigmático, duas condições devem ser respeitadas: seu ângulo de abertura deve ser menor que  $10^\circ$ , e os raios incidentes, paraxiais, isto é, a inclinação em relação ao eixo principal deve ser nula ou a menor possível.

Respeitando essas condições, o espelho deve fornecer imagens nítidas.

O foco de um espelho esférico é um ponto do eixo principal pelo qual passam os raios refletidos ou seus prolongamentos, quando esses incidem no espelho, paralelamente ao eixo principal do espelho, nas proximidades do vértice.

Para o espelho convexo, o foco é um ponto imagem virtual. Isso ocorre porque o foco é definido pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios refletidos. Para o espelho côncavo, o foco é um ponto imagem real, definido pelo cruzamento dos raios luminosos refletidos.

A distância entre o foco ( $F$ ) e o vértice ( $V$ ) do espelho é denominada *distância focal* ( $f$ ).



Para os espelhos esféricos, temos:

$$R = 2 \cdot f,$$

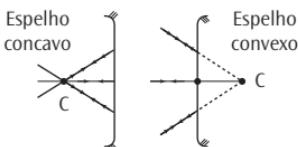
sendo  $R$  o raio de curvatura do espelho.

# Estudo das imagens nos espelhos esféricos

Todo raio de luz que incide sobre um espelho esférico obedece as leis da reflexão, tal como em um espelho plano. Para fins didáticos, algumas situações particulares:

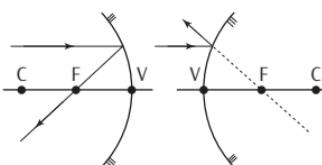
## Situação 1

Todo raio que incide passando pelo centro de curvatura reflete sobre si mesmo.



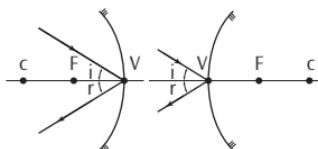
## Situação 2

Todo raio que incide paralelamente ao eixo principal reflete passando pelo foco.



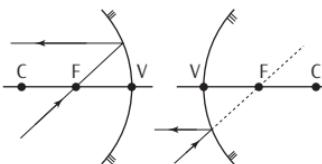
## Situação 3

Todo raio que incide no vértice de um espelho reflete de tal forma que o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são iguais em relação ao eixo principal.



## Situação 4

Todo raio que incide passando pelo foco reflete paralelamente ao eixo principal.

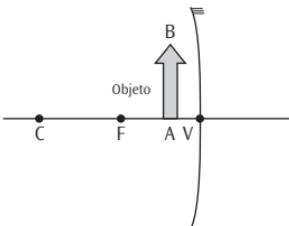


A situação 4 é inversa em relação à situação 2, coerente com o princípio da reversibilidade do raio de luz.

### Exemplo

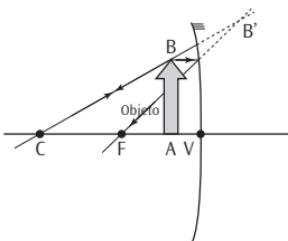
Considere um espelho esférico côncavo e um objeto localizado entre o foco e o vértice do espelho.

Represente a construção gráfica da imagem.



### Resolução

Para construir a imagem referente à extremidade B do objeto AB, devemos representar dois raios de luz que se cruzam em B. Podemos representar um dos raios conforme descrito na situação 1 e o outro conforme descrito na situação 2. Dessa forma, por uma questão de semelhança de triângulos, a representação dos raios refletidos devem se cruzar na posição em que se encontra o ponto imagem B'. Procedimento análogo deveria ser feito com a extremidade A ou qualquer outro ponto do objeto AB. Por uma facilidade gráfica, já que o ponto A encontra-se sobre o eixo principal do espelho, o ponto imagem A' deve situar-se também sobre o eixo principal, à mesma distância do vértice do espelho.

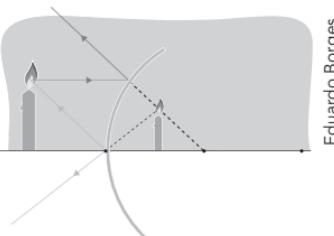
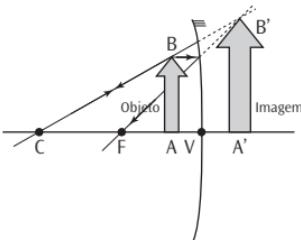


Obtemos, assim, uma imagem de B, o ponto B', que é virtual, por ser obtida pelo prolongamento dos raios refletidos. Para obter a imagem A' referente ao ponto A, basta traçar uma perpendicular ao eixo principal, passando por B'.

Obtém-se, assim, uma imagem do objeto AB com as seguintes características: direita (não invertida), virtual e ampliada.

As características da imagem fornecida por um espelho esférico côncavo variam conforme a posição do objeto.

Espelhos convexos, no entanto, fornecem imagem sempre virtual, direita e menor que o objeto.

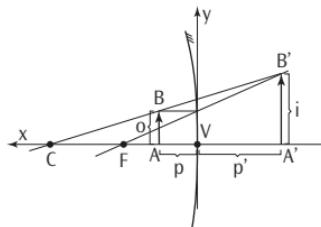


Eduardo Borges

Imagen virtual, direita e menor

## Relações algébricas para imagens nos espelhos esféricos

Para determinação algébrica de imagens em espelhos esféricos, costuma-se adotar o sistema de referência de Gauss, conforme mostra o esquema:



$p$  = abscissa do objeto

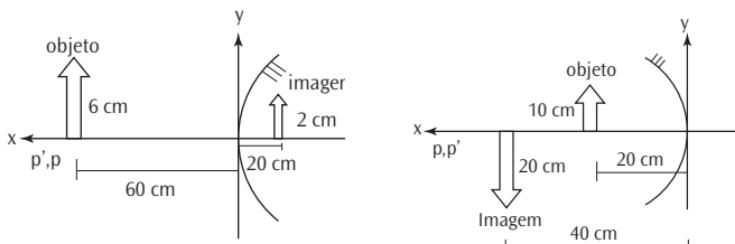
$p'$  = abscissa da imagem

$o$  = ordenada do objeto

$i$  = ordenada da imagem

Referencial de Gauss. Observe a orientação dos eixos x e y que deve ser coerente com o espaço físico em que os raios de luz de fato se deslocam.

Como exemplo, a figura a seguir apresenta as características do objeto e da imagem desse objeto com base no sistema de referência de Gauss.



Note que a imagem real tem abscissa positiva, e a imagem virtual, negativa.

imagem real:  $p' > 0$

imagem virtual:  $p' < 0$

Admitindo-se  $p$  e  $o$  sempre positivos, com respeito à imagem,  $p'$  terá sempre sinal contrário ao de  $i$ .

Logo:

Uma imagem real é sempre invertida em relação ao objeto, portanto:  $p' > 0$  e  $i < 0$ .

Uma imagem virtual é sempre direita em relação ao objeto, portanto:  $p' < 0$  e  $i > 0$ .

Sendo  $R$  o raio de curvatura do espelho, temos:

Espelho côncavo:  $f = R/2$

Espelho convexo:  $f = -R/2$

Para as abscissas  $p$  e  $p'$  e as ordenadas  $o$  e  $i$ , vale a relação:

$$i/o = -p'/p$$

A relação entre as ordenadas  $i$  e  $o$  é chamada *aumento linear transversal* da imagem (A).

$$A = i/o$$

Nas condições apresentadas, é válida a equação:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

Essa equação é chamada *equação de Gauss* ou *equação dos pontos conjugados*. A equação relaciona as abscissas com a distância focal do espelho.

### Exemplo

Considere um espelho esférico côncavo estigmático de raio de curvatura 200 cm e um objeto de 20 cm de altura, colocado sobre o eixo principal, a 120 cm do espelho. Determine a posição relativa da imagem e o seu tamanho.

### Resolução

A distância focal do espelho é:

$$f = \frac{R}{2}$$

$$f = \frac{200 \text{ cm}}{2}$$

$$f = 100 \text{ cm}$$

Aplicando a equação dos pontos conjugados, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

$$\frac{1}{100} = \frac{1}{120} + \frac{1}{p'}$$

$$p' = 600 \text{ cm}$$

O tamanho da imagem pode ser obtido pela relação:

$$\frac{p'}{p} = \frac{-i}{o}$$

$$i = -100 \text{ cm}$$

Os resultados calculados informam que a imagem é invertida ( $i < 0$ ), maior que o objeto e também real ( $p' > 0$ ).

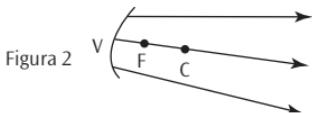
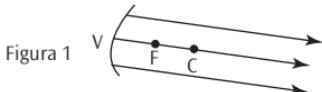
---

### TESTE SEU SABER

---

1. O raio de curvatura de um espelho côncavo vale 60 cm. Um objeto luminoso linear, de comprimento 2 cm, está disposto perpendicularmente ao seu eixo principal e à distância de 90 cm do seu vértice. Determine:
  - a) As características da imagem.
  - b) O aumento linear transversal.
2. Um objeto é colocado entre o centro de curvatura e o foco de um espelho esférico. Quais as características da imagem que esse objeto proporciona? Qual o tipo de espelho? Essa imagem pode ser projetada numa tela? Por quê?
3. A imagem de um objeto forma-se a 40 cm de um espelho côncavo com distância focal de 30 cm. A imagem formada situa-se sobre o eixo principal do espelho, é real, invertida e tem 3 cm de altura. Determine a posição do objeto.

4. É possível ver uma imagem virtual? E real? Dê exemplos.
5. O espelho retrovisor do lado direito do motorista é, quase sempre, convexo. Por quê?
6. De um objeto real obtém-se uma imagem triplicada. Sendo a distância do objeto ao espelho 1 m, determine os possíveis raios de curvatura.
7. Um espelho côncavo tem 80 cm de raio. Um objeto real é colocado a 30 cm do espelho. A imagem produzida será:
- Virtual, direta e menor que o objeto.
  - Virtual, direta e maior que o objeto.
  - Real, inversa e menor que o objeto.
  - Real, inversa e maior que o objeto.
  - Real, inversa e do tamanho do objeto.
8. Um jovem estudante, para fazer a barba mais eficientemente, resolve comprar um espelho esférico que aumente duas vezes a imagem do seu rosto quando ele se coloca a 50 cm dele. Que tipo de espelho ele deve usar e qual o raio de curvatura?
- Convexo com raio de 50 cm.
  - Côncavo com raio de 200 cm.
  - Côncavo com raio de 33,3 cm.
  - Convexo com raio de 67 cm.
  - Um espelho diferente dos mencionados.
9. (Ufmg) O farol de um automóvel é constituído de um espelho côncavo e de uma lâmpada com dois filamentos I e II. Nas figuras 1 e 2, V, F e C são, respectivamente, o vértice, o foco e o centro de curvatura do espelho. Quando o farol está em “luz baixa”, apenas o filamento I está ligado, e a luz é refletida no espelho paralelamente ao seu eixo óptico, como na figura 1. Quando o farol está em luz alta, apenas o filamento II está ligado, e o feixe de luz refletido é um pouco divergente, como na figura 2. Para que o farol funcione de acordo com essas descrições, a posição dos filamentos deve ser:

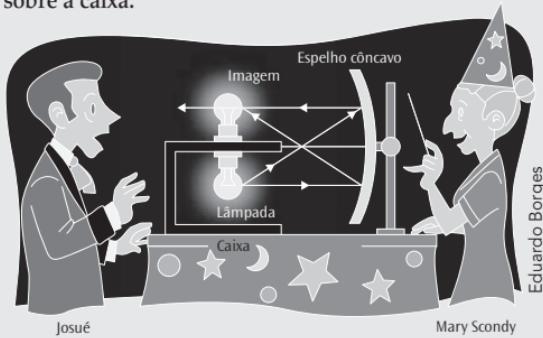


- a) O filamento I em C e o filamento II à direita de C.
- b) O filamento I em C e o filamento II entre C e F.
- c) O filamento I em F e o filamento II entre F e C.
- d) O filamento I em F e o filamento II entre F e V.
- e) O filamento I em V e o filamento II entre V e F.

## Descomplicando a Física

(UFRN) Mary Scondy, uma ilusionista amadora, fez a mágica conhecida como lâmpada fantasma.

Instalou uma lâmpada incandescente no interior de uma caixa, aberta em um dos lados. A parte aberta da caixa estava voltada para a frente de um espelho côncavo, habilmente colocado para que a imagem da lâmpada pudesse ser formada na parte superior da caixa, conforme representado esquematicamente na figura abaixo. A lâmpada tinha uma potência de 40 W e inicialmente estava desligada. Quando Mary ligou o interruptor escondido, a lâmpada acendeu, e Josué, um dos espectadores, tomou um susto, pois viu uma lâmpada aparecer magicamente sobre a caixa.



Continua...

Com base na figura e no que foi descrito, pode-se concluir que, ao ser ligada a lâmpada, ocorreu a formação de:

- a) Uma imagem real, e a potência irradiada era de 40 W.
- b) Uma imagem real, e a potência irradiada era de 80 W.
- c) Uma imagem virtual, e a potência irradiada era de 40 W.
- d) Uma imagem virtual, e a potência irradiada era de 80 W.

Resposta correta: Alternativa A.

### Resolução

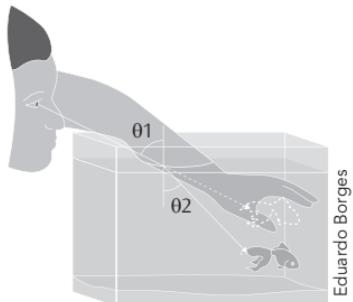
Para que a imagem seja do mesmo tamanho que o objeto, este deve estar posicionado no centro de curvatura de um espelho côncavo. Nesta condição, a imagem será também real e invertida em relação ao objeto. A potência da lâmpada não é afetada pelo fenômeno de reflexão.

# 23

## Refração da luz

Um raio de luz que incide sobre uma superfície de separação de dois meios atravessa essa superfície, passando a se propagar no novo meio. Diz-se que o raio de luz sofreu refração. Se a incidência é perpendicular à superfície, não há mudança de direção em sua propagação no novo meio, porém, em qualquer outra inclinação, haverá alteração da direção de propagação.

Uma grande variedade de fenômenos ópticos pode ser explicada com base na refração da luz. Por exemplo: um peixe nunca está exatamente no lugar onde é visto, ou um pincel imerso na água aparenta estar “quebrado”.



Eduardo Borges



Timur1970/PhotoXpress

### Índice de refração

A velocidade da luz é dependente do meio material no qual ela se propaga. No vácuo, a velocidade da luz é constante e vale 300000 km/s. Em outro meio qualquer, a velocidade da luz é menor, porém, continua a ser constante. Como consequência, a velocidade de um raio de luz muda no momento em que ele sofre refração.

Define-se índice de refração ( $n$ ) do meio 1 em relação ao meio 2 como:

$$n_{1,2} = v_1/v_2$$

onde  $v_1$  e  $v_2$  são as velocidades de propagação de uma radiação luminosa em dois meios transparentes 1 e 2.

O índice de refração é dito absoluto quando em relação ao vácuo. Os índices de refração absolutos de dois meios genéricos 1 e 2 podem ser expressos respectivamente:

$$n_1 = c/v_1 \text{ e } n_2 = c/v_2,$$

o que resulta em:  $n_1 \cdot v_1 = n_2 \cdot v_2 = c$ ,

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

A partir da relação  $n_1 \cdot v_1 = n_2 \cdot v_2$ ,

resulta que  $n_{1,2} = n_1/n_2$ ,

onde  $n_{1,2}$  é denominado o índice de refração relativo do meio 1 em relação ao meio 2.

Por ser uma relação entre velocidades, o índice de refração é uma grandeza adimensional.

O índice de refração para os meios materiais é sempre maior que 1.

Apresentamos agora alguns valores de índices de refração absolutos para a luz caracterizada em frequência média da faixa visível pelo olho humano.

#### Valores de índices de refração de alguns meios materiais

Meio material	Índice de refração (n)	Meio material	Índice de refração (n)
Ar	1,000	Gelo	1,310
Água	1,330	Vidro crown	1,523
Glicerina	1,470	Vidro high lite	1,701

Meio material	Índice de refração (n)	Meio material	Índice de refração (n)
Vidro	1,500 a 1,900	Policarbonato	1,590
Diamante	2,420	Super high lite (lantânio)	1,800
Acrílico	1,490	Hiper high lite (lantânio)	1,900

### Exemplo

Uma luz de determinada frequência tem velocidade  $2,25 \times 10^8$  m/s na água e velocidade  $2 \times 10^8$  m/s em uma solução X. Calcule:

- O índice de refração absoluto da substância X.
- O índice de refração de X em relação à água.

### Resolução

a)  $n = c/v$

$$n = \frac{3,0 \cdot 10^8}{2,0 \cdot 10^8}$$

$$n = 1,5$$

b)  $n = \frac{2,25 \cdot 10^8}{2,0 \cdot 10^8}$

$$n = 1,125$$

### Lei de Snell-Descartes

A Lei de Snell-Descartes descreve matematicamente o fenômeno de refração.

Numa refração, vale a relação:

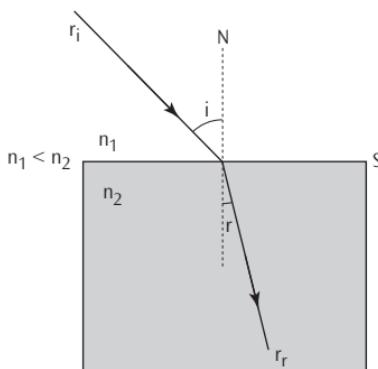
$$n_1 \cdot \operatorname{sen} i = n_2 \cdot \operatorname{sen} r$$

Onde:  $n_1$  = índice de refração do meio 1;

$n_2$  = índice de refração do meio 2;

$i$  = ângulo de incidência; e

$r$  = ângulo de refração.



Quando um raio de luz sofre refração de um meio para outro de maior índice de refração, o raio de luz aproxima-se da normal.

Ao passar de um meio para outro de menor índice de refração, o raio de luz se refrata, afastando-se da normal.

Se um raio luminoso incidir perpendicularmente à superfície de separação, ele não sofre desvio de trajetória.

### Exemplo

Um raio de luz refrata-se segundo um ângulo de incidência de  $30^\circ$  ao passar do ar ( $n = 1,00$ ) para o plástico ( $n = 1,80$ ). Calcule o ângulo de refração.

## Resolução

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$$

$$1 \cdot \sin 30^\circ = 1,8 \cdot \sin r$$

$$1 \cdot 0,5 = 1,8 \cdot \sin r$$

$$\sin r = 0,2777$$

$$r = 16,12^\circ$$

## Reflexão total

O fenômeno de refração de um raio de luz não ocorre isoladamente. A refração sempre ocorre acompanhada de reflexão.

Quando um raio de luz passa de um meio para outro de menor índice de refração, pelo fato do raio de luz afastar-se da normal, existe um limite para o ângulo de incidência a partir do qual deixa de haver refração. Este ângulo é denominado ângulo limite ( $L$ ) e, deixando de haver refração, haverá reflexão total. Neste caso, vale a relação:

$$\sin L = \frac{n_{menor}}{n_{maior}}$$

## Exemplo

Um raio de luz monocromática atravessa a superfície de separação entre o ar ( $n = 1,0$ ) e a água ( $1,33$ ), passando da água para o ar. Determine o ângulo limite a partir do qual se verifica reflexão total.

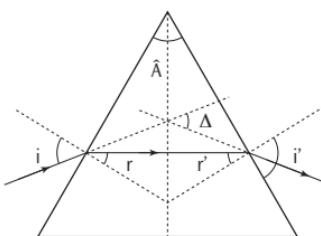
$$\sin L = \frac{1,00}{1,33}$$

$$\sin L = 0,752$$

$$L = 48,8^\circ$$

## Prisma

O prisma óptico é um arranjo constituído de duas superfícies de separação planas associadas e não paralelas, que formam entre si um ângulo diferente de zero, conhecido como ângulo de refringência ( $\hat{A}$ ).



$\hat{A}$  = ângulo de refringência

$i$  = ângulo de incidência na primeira face ( $s_1$ )

$r$  = ângulo de refração na primeira face ( $s_1$ )

$r'$  = ângulo de incidência na segunda face ( $s_2$ )

$i'$  = ângulo de refração na segunda face ( $s_2$ )

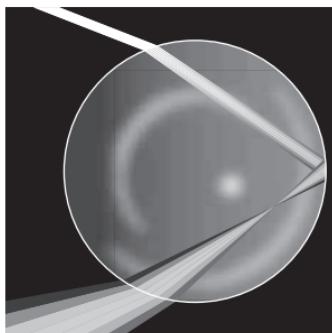
$D$  = desvio angular

No prisma, temos:

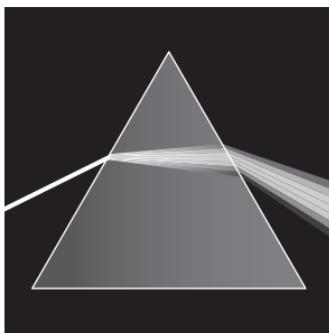
$$\hat{A} = r + r' \text{ e } \Delta = i + i'$$

## Dispersão da luz

A luz do Sol, considerada branca, ao atravessar um prisma ou uma gota de chuva, sofre um fenômeno denominado dispersão, dando origem às sete cores do arco-íris.



Dispersão da luz numa gota



Dispersão da luz num prisma

Eduardo Borges

Cada cor está relacionada com uma frequência de onda. A dispersão da luz branca ocorre porque, para cada frequência, um meio material apresenta um índice de refração diferente.

#### Cores do espectro visível

Cor	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)
Vermelho	625 a 740	480 a 405
Laranja	590 a 625	510 a 480
Amarelo	565 a 590	530 a 510
Verde	500 a 565	600 a 530
Ciano	485 a 500	620 a 600
Azul	440 a 485	680 a 620
Violeta	380 a 440	790 a 680



## Por que se utiliza a cor vermelha para sinalizar a parada de trâfego?

Ondas de menor comprimento se dispersam mais na atmosfera.

Os raios de luz vermelha, por terem maior comprimento de onda, dispersam-se menos nas partículas suspensas no ar do que os de outras cores. Por essa razão, os raios de luz vermelha podem ser vistos a uma distância maior.

Aproveitando a oportunidade, vemos o céu azul porque o comprimento de onda referente à cor azul se dispersa mais que as demais cores.

### A cor de um objeto

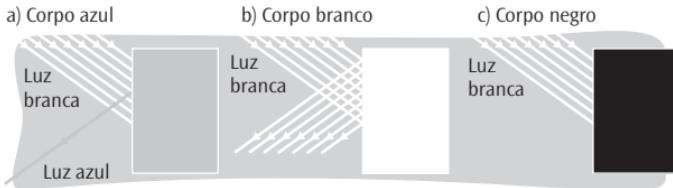
Quando iluminado por luz branca – como a do Sol – um objeto verde reflete a onda referente à cor verde e absorve as demais; a onda refletida incide no nosso olho trazendo a informação: por isso o vemos verde.

Um objeto ou superfície branca, quando iluminado por luz branca, reflete todas as frequências que recebe, não absorvendo praticamente nenhuma luz.

Um objeto ou superfície preta absorve toda a luz, não refletindo nenhuma frequência ou cor. Por isso, não chega a informação a nossos olhos.



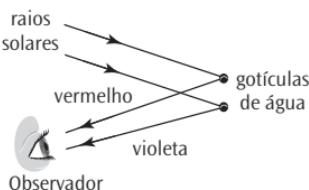
Eduardo Borges



## TESTE SEU SABER

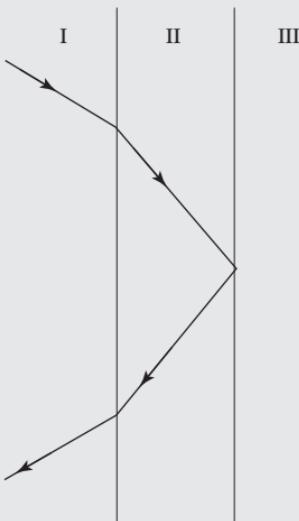
1. Um raio luminoso monocromático passa do vácuo para um meio material, onde o índice de refração é  $5/3$ . Sendo a velocidade da luz no vácuo igual a  $300000$  km/s, qual a velocidade da luz no meio material?
2. Um raio de luz passa do ar para um líquido transparente, com ângulo de incidência de  $60^\circ$  e ângulo de refração  $30^\circ$ . Qual o índice de refração do meio?
3. Se um pescador quiser fisgar um peixe lançando obliquamente um arpão, ele deve arremessá-lo acima ou abaixo da posição em que vê o peixe? Explique com base em argumentos físicos.
4. A velocidade de propagação da luz em determinado líquido é 80% daquela verificada no vácuo. O índice de refração desse líquido é:  
 a) 1,50      b) 1,25      c) 1      d) 0,80      e) 0,20
5. Durante uma viagem, você já deve ter visto, a certa distância do carro, uma misteriosa “poça-d’água” sobre o asfalto, que desaparece quando o carro se aproxima dela. A poça era uma miragem. Tanto neste caso como no do brilho de um anel de diamante está presente um fenômeno físico denominado reflexão total. É possível ocorrer reflexão total quando a luz passa do ar para a água? Justifique sua resposta.
6. (ITA) Uma gaivota pousada na superfície da água, cujo índice de refração em relação ao ar é 1,3, observa um peixinho que está exatamente abaixo

- dela, a uma profundidade de 1 m. Que distância, em linha reta, o peixinho deverá nadar para sair do campo visual da gaivota?
- a) 0,84 m
  - b) 1,2 m
  - c) 1,6 m
  - d) 1,4 m
  - e) O peixinho não conseguirá fugir do campo visual da gaivota.
7. Durante a final da Copa do Mundo, um cinegrafista, desejando alguns efeitos especiais, gravou cena em um estúdio completamente escuro, onde existia uma bandeira da "Azurra" (azul e branca) que foi iluminada por um feixe de luz amarela monocromática. Quando a cena foi exibida ao público, a bandeira apareceu:
- a) Verde e branca.
  - b) Verde e amarela.
  - c) Preta e branca.
  - d) Preta e amarela.
  - e) Azul e branca.
8. Três copos, x, y e z, são, respectivamente, vermelho, branco e verde, quando expostos e colocados em ambiente iluminado com luz branca. Qual a cor de cada um quando transportados para um ambiente iluminado com a luz verde?
9. Escolha a opção que relacione fenômenos ópticos envolvidos na formação do arco-íris.
- a) Difração, refração, reflexão.
  - b) Refração, reflexão, dispersão.
  - c) Dispersão, interferência, polarização.
  - d) Reflexão, difração, dispersão.
  - e) Difração, interferência, polarização.



## Descomplicando a Física

(UFMG) A figura mostra a trajetória de um feixe de luz que vem de um meio I, atravessa um meio II, é totalmente refletido na interface dos meios II e III e retorna ao meio I.



Sabe-se que o índice de refração do ar é menor que o da água e que o da água é menor que o do vidro. Nesse caso, é CORRETO afirmar que os meios I, II e III podem ser, respectivamente,

- a) Ar, água e vidro.
- b) Vidro, água e ar.
- c) Água, ar e vidro.
- d) Ar, vidro e água.

Resposta correta: Alternativa B.

### Resolução

Ao passar do meio I para o meio II, o raio de luz se afasta da normal, indicando que o meio I possui índice de refração maior que o do meio II. Portanto, I não pode ser ar. Na interface entre o meio II e o meio III, há reflexão total, e para isso o meio II deve ter índice de refração maior que o

Continua...

do meio III. Portanto, II não pode ser ar. Assim, obrigatoriamente, I deve ser vidro, II deve ser água e III deve ser ar. De fato, quando o raio de luz sofre refração do meio II de volta para o meio I, ele se aproxima da normal, indicando que o meio I tem índice de refração maior que o do meio II.

Saiba



## O arco-íris

Quando um feixe de luz branca atinge a superfície de separação entre dois meios, como o ar e a água, ao se refratar, ele sofre dispersão, originando as várias cores.

Esse fenômeno ocorre devido aos diferentes índices de refração de cada uma das cores.

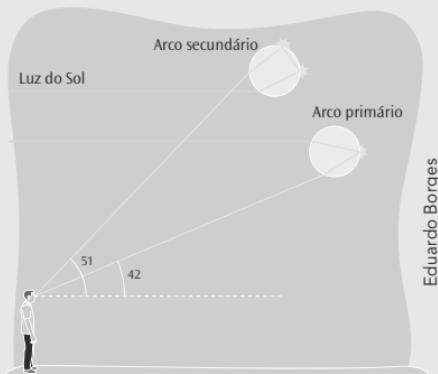
Ao comparar as cores do arco-íris, observamos que a cor violeta possui o maior índice de refração, e a cor vermelha, o menor índice de refração, uma vez que a velocidade de propagação da onda referente à cor vermelha é maior que a da cor violeta.

A dispersão da luz do Sol em gotículas de água suspensas no ar e sua posterior reflexão no interior da gota acarretam a formação do arco-íris.



Museu Daniele/Morguefile

Arco-íris primário e arco-íris secundário. Note que o segundo é externo em relação ao primeiro e possui imagem mais tênue.

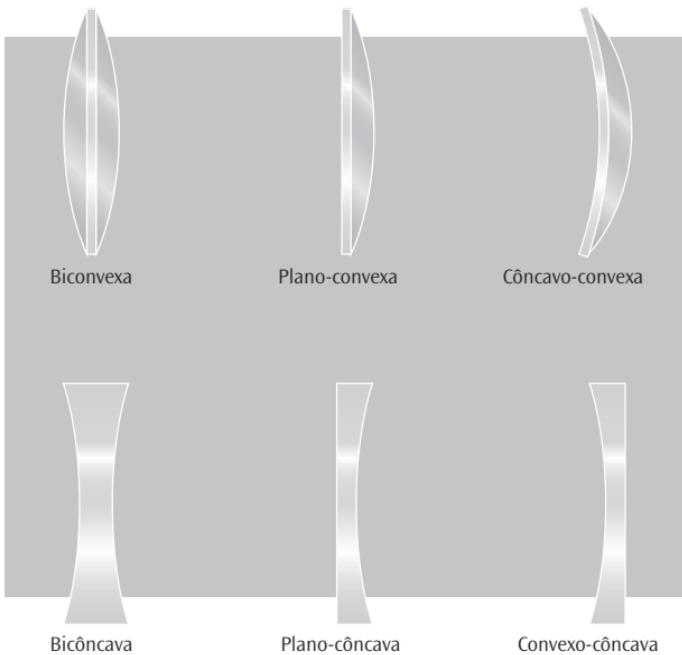


Formação do arco-íris primário e do arco-íris secundário.

# 24 Lentes

## Lentes esféricas

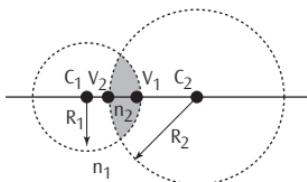
Lentes esféricas constituem meios homogêneos e transparentes, nos quais a luz pode se propagar. Possuem pelo menos uma das faces esférica. Podem apresentar dois comportamentos ópticos: convergente e divergente.



Eduardo Borges

As lentes são utilizadas em inúmeros instrumentos ópticos, como em lunetas, óculos, binóculos, lupas e microscópios.

Os principais elementos geométricos das lentes são mostrados a seguir.



$V_1$  e  $V_2$  = vértices

$C_1$  e  $C_2$  = centros de curvatura das faces

$R_1$  e  $R_2$  = raios de curvatura das faces

Os pontos  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $V_1$  e  $V_2$  situam-se sobre o eixo principal da lente.

## Tipos de lentes esféricas

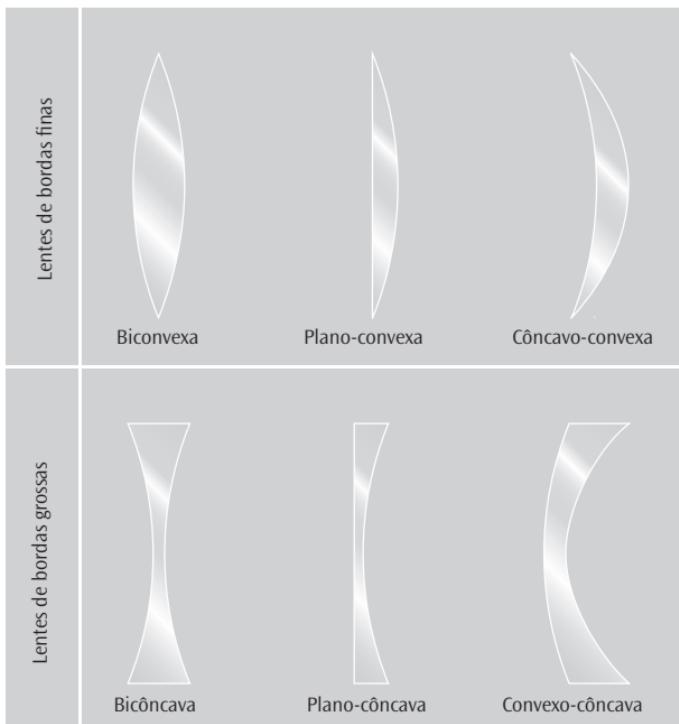
Há dois tipos de lentes esféricas, as *lentes convergentes*, que convergem o feixe luminoso incidente paralelo ao eixo principal, e as *lentes divergentes*, que divergem o feixe incidente paralelo ao eixo principal.

As lentes esféricas ainda podem ser classificadas segundo o tipo de bordo: bordos finos ou delgados e bordos espessos.

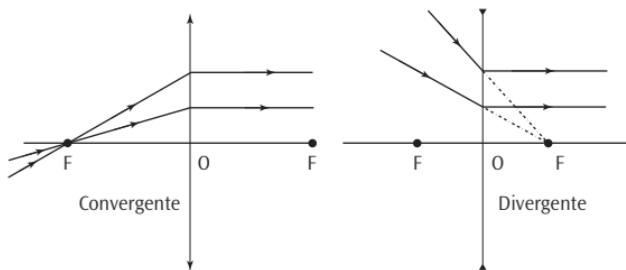
Denominam-se lentes *delgadas* (ou *finas*) as que possuem o bordo com espessura menor que sua parte central. Entretanto, as lentes de bordos *espessos* (ou *grossos*) são mais finas em sua parte central.

As lentes esféricas de bordos *delgados*, quando imersas no ar, ou em um meio cujo índice de refração é menor que o do material que constitui a lente, são convergentes, e as de bordos *espessos* são divergentes.

Quando a lente é muito espessa, ou os raios incidentes estão muito afastados do eixo principal da lente, a imagem que é produzida não é nítida, originando uma superfície de pontos (*cáustica*). Somente as lentes *delgadas* produzem imagens nítidas; são *estigmáticas*.



Representamos as lentes da seguinte maneira:



Observe a representação dos bordos da lente: à esquerda uma lente convergente, e à direita, uma lente divergente.

O ponto de interseção da lente com o eixo principal é denominado centro óptico (0).

## Focos de uma lente esférica

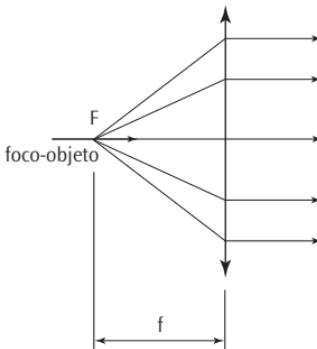
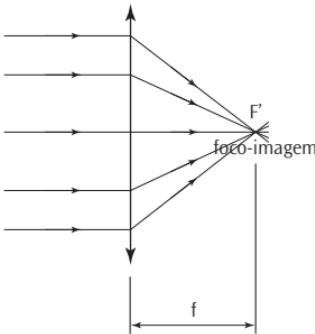
O comportamento de um raio de luz, ao incidir em uma lente, é semelhante ao do raio diante de um espelho esférico.

Fazendo incidir, paralelamente ao eixo principal, um feixe de luz sobre uma lente convergente, os raios de luz atravessam-na e convergem para um ponto denominado foco ( $F'$ ) da lente, situado sobre o próprio eixo principal. Esse ponto, por ser fruto do cruzamento dos raios emergentes da lente, é denominado foco-imagem da lente. A distância entre o foco e a lente é a distância focal da lente ( $f$ ).

Analogamente, pelo princípio da reversibilidade dos raios de luz, um feixe de luz que emerge paralelamente ao eixo principal de uma lente convergente, assim o faz por estar associado a raios de luz que concorrem a um ponto, antes de incidirem sobre a lente. Esse ponto, por ser fruto do cruzamento dos raios incidentes sobre a lente, é denominado foco-objeto ( $F$ ) da lente.

Ainda pelo princípio da reversibilidade dos raios de luz:

$$f = f'$$



## Vergência de uma lente

Por definição, vergência ou convergência (C) de uma lente é dada pelo inverso de sua distância focal (f).

$$C = \frac{1}{f}$$

A unidade de vergência é a dioptria (di), que corresponde ao inverso do metro ( $\text{m}^{-1}$ ).

Numa lente convergente, a vergência tem valor positivo, bem como a distância focal; porém, numa lente divergente, a vergência e a distância focal são valores negativos.

### Exemplo

Calcule a distância focal de uma lente de 4 di.

### Resolução

$$C = \frac{1}{f}$$

$$4 = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ m}$$

Podemos calcular a vergência em função dos raios de curvatura das duas faces,  $R_1$  e  $R_2$ , dos índices de refração da lente ( $n_2$ ) e do meio que a envolve ( $n_1$ ), pela seguinte equação:

$$C = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Nessa equação, convencionava-se que a face convexa tem raio positivo, e a face côncava, raio negativo.

## Determinação geométrica de imagens em lentes

O comportamento dos raios de luz que partem do objeto situado à frente de uma das faces de uma lente e a atravessam vai determinar a posição e as características da imagem fornecida.

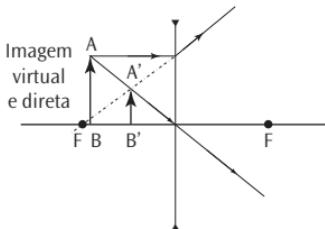
Considere um objeto AB colocado sobre o eixo principal de uma lente qualquer (convergente ou divergente). A determinação de imagens em lentes, obtidas por representação geométrica, segue procedimento semelhante ao de espelhos esféricos.

O desenho ao lado ilustra o procedimento para se determinar graficamente a imagem A'B' referente a um objeto AB.

Representamos a trajetória de dois raios luminosos que se cruzam na extremidade A do objeto. Um deles, por exemplo, propagando-se paralelamente ao eixo principal, ao incidir sobre a lente, sofre refração, emergindo da lente na direção do foco. Outro que, ao incidir sobre a lente na direção do centro óptico, é refratado, não alterando a direção de sua trajetória. Na figura, temos a representação do que foi descrito, considerando uma lente divergente.

A imagem de um objeto real obtida a partir de uma lente divergente é sempre virtual, direita e menor que o objeto.

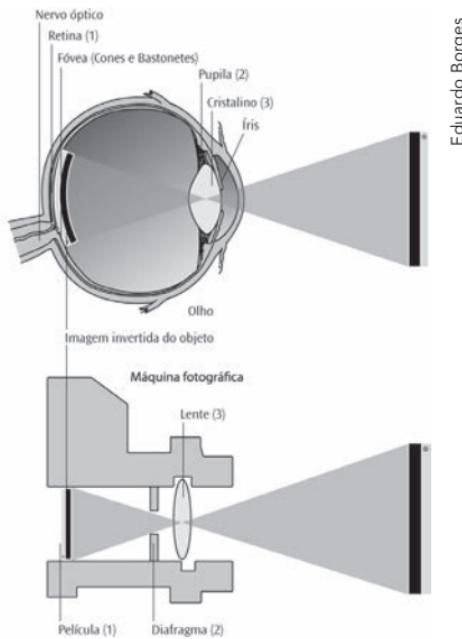
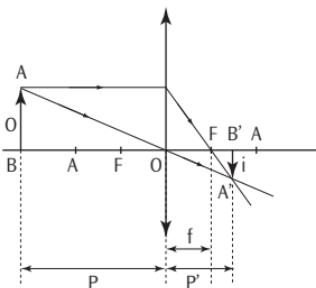
No caso de lentes convergentes, dois pontos referenciais, A e A', denominados ponto antiprincipal-objeto e ponto antiprincipal-imagem, respectivamente, situados sobre o eixo principal da lente, e a uma distância que vale o dobro da distância focal, servem de referência para a construção da imagem.



Em máquinas fotográficas e filmadoras, que se utilizam de lentes convergentes, o objeto está posicionado antes do ponto antiprincipal-objeto, formando uma imagem real, invertida e menor que o objeto, que é projetada sobre o filme fotográfico.

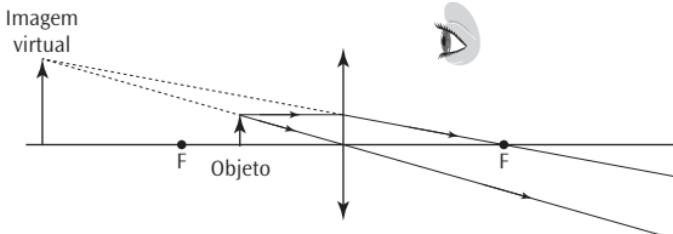
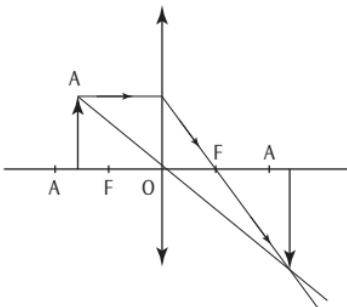
Observe que apenas as imagens reais podem ser projetadas.

O globo ocular opera de modo semelhante. O cristalino funciona como uma espécie de lente convergente, orientando a passagem da luz até a retina, que é composta por células nervosas que levam a imagem através do nervo óptico para que o cérebro as interprete.



As máquinas de projeção de slides e os projetores cinematográficos produzem imagem real, invertida e maior que o objeto. Para tanto, o objeto deve estar posicionado entre o ponto anti-principal-objeto e o foco da lente.

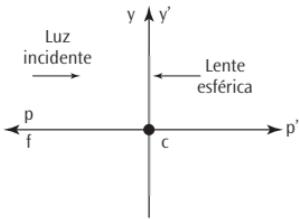
A lupa ou lente de aumento consiste em uma lente convergente em que o objeto está colocado entre o foco-objeto e a lente. A imagem obtida é virtual, direita e maior que o objeto.



## Relações algébricas de imagens em lentes

A posição e as características da imagem fornecida por uma lente podem ser determinadas por meio de cálculo. Para tanto, empregamos o sistema de referência de Gauss, semelhante ao adotado para os espelhos esféricos.

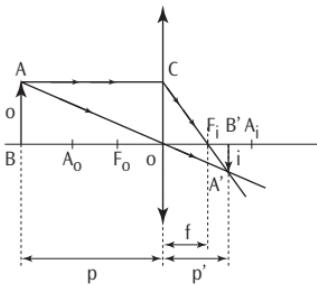
- Sistema de coordenadas para os objetos: os objetos localizados do lado da luz incidente são reais e têm abscissa positiva; aqueles localizados no lado oposto da luz incidente são virtuais e têm abscissa negativa.
- Sistema de coordenadas para imagens: as imagens localizadas do lado oposto da luz incidente são reais e têm abscissa positiva; aquelas localizadas no lado da luz incidente são virtuais e têm abscissa negativa.



Referencial de Gauss para lentes.

Observe a orientação do eixo das abscissas: crescente em um sentido para os objetos e no sentido oposto para as imagens.

Considere a figura abaixo:



Dessa figura, por semelhança entre os triângulos AOB e A'OB', podemos obter a relação:

$$\frac{i}{o} = \frac{-p}{p}$$

A relação entre as ordenadas do objeto e da imagem define o aumento linear transversal da imagem:

$$A = i/o$$

As abscissas do objeto e da imagem relacionam-se com a distância focal da lente pela equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

## Exemplo

Normalmente, as câmeras fotográficas possuem, próximo à lente, uma inscrição indicativa da distância focal do conjunto óptico. É muito comum máquinas que utilizam objetiva de 35 mm. Calcule a posição da objetiva quando a máquina está regulada para fotografar um objeto a uma distância muito grande e para um objeto que esteja a 1 m de distância.

## Resolução

O conjunto óptico de uma máquina fotográfica consiste em uma lente convergente, e a imagem deve se formar sobre o filme. Portanto,  $f = 35$  mm.

Para um objeto a grande distância, diz-se que ele está localizado no infinito, e como  $p$  é muito maior que a distância focal, a parcela  $1/p$  pode ser desprezada. A equação de Gauss, neste caso, pode ser reduzida a  $1/f = 1/p'$ , o que faz com que  $p' = f = 35$  mm, e a objetiva deve ficar a 35 mm do filme.

Para um objeto colocado a 1 m de distância,  $p'$  pode ser calculado pela equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

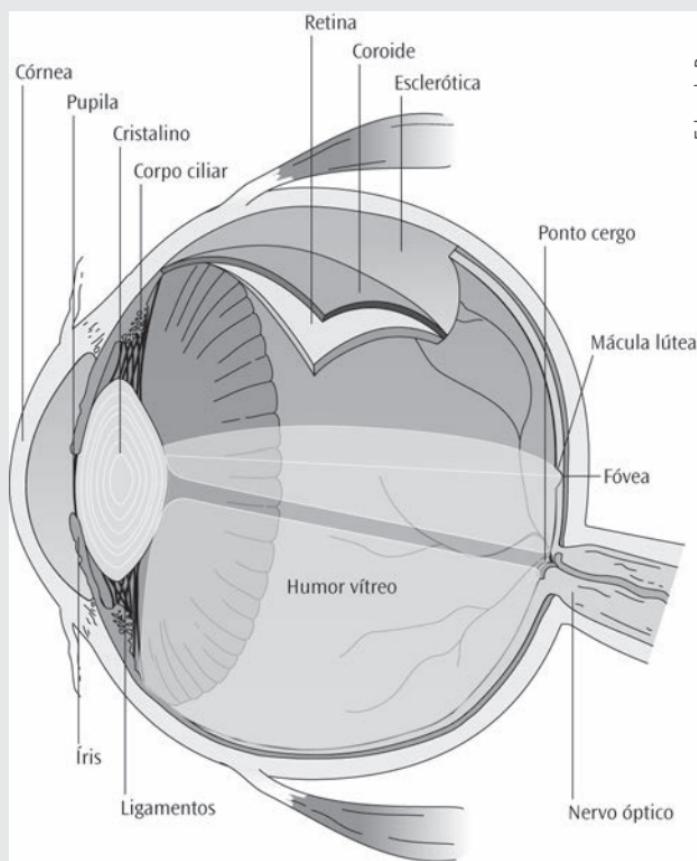
$$\frac{1}{35} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{p'}$$

$$p' = 36,3 \text{ mm (aproximadamente).}$$



## A visão humana e seus defeitos

Eduardo Borges



Na figura acima temos a representação do olho humano. A luz atravessa a pupila – uma abertura de tamanho variável – e, a seguir, o cristalino – que funciona como lente convergente. O cristalino produz uma imagem real, invertida e reduzida que se forma sobre a retina. Um conjunto de células nervosas transforma os sinais luminosos recebidos em impulsos elétricos, que são transmitidos ao cérebro, e este último os interpreta.

Continua...

Os meios transparentes do globo ocular são representados por uma lente convergente delgada, situada a 5mm do centro óptico e a 15 mm da retina.

O olho possui a propriedade de acomodação visual, que permite enxergar nitidamente objetos distantes ou próximos. Para objetos distantes, o músculo ciliar sofre relaxamento, alterando a distância focal do cristalino, que fica igual à profundidade do globo ocular. A posição mais afastada do globo ocular que uma pessoa pode ver nitidamente é denominada *ponto remoto*.

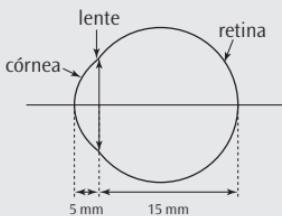
Para objetos próximos, o músculo ciliar se contrai e o cristalino se espessa, diminuindo a distância focal; a posição mais próxima do globo ocular que uma pessoa pode ver nitidamente é denominada *ponto próximo*. Para um olho emétreope – que não necessita de nenhuma compensação visual – esta distância é de cerca de 25 cm.

### Miopia

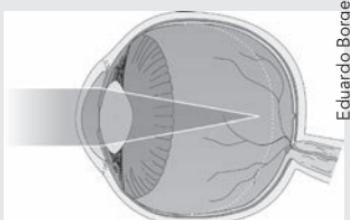
O comprimento do globo ocular é maior que a máxima distância focal do cristalino. As imagens de objetos distantes se formam antes da retina, fazendo com que objetos distantes não tenham imagens nítidas. A correção se faz com lentes divergentes.

### Hipermetropia

O comprimento do globo ocular é menor que a distância focal do cristalino. As imagens de objetos distantes se formam após a retina. O hipermetrópico enxerga mal os objetos próximos. A correção se faz com lentes convergentes.



Olho reduzido. Uma representação simplificada do olho humano.



Continua...

### Presbiopia (vista cansada)

Com a idade, diminui a capacidade de acomodação do globo ocular, pois os músculos não conseguem comprimir adequadamente o cristalino. Embora a visão de objetos distantes permaneça normal, o ponto próximo se afasta e as imagens de objetos próximos não são nítidas. A correção se faz com lentes convergentes.

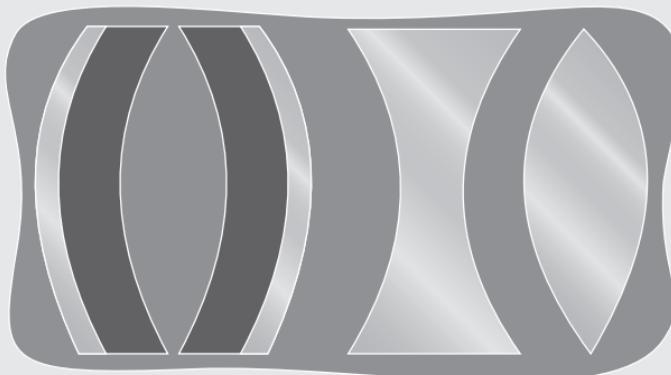
## TESTE SEU SABER

1. O que se costuma chamar de “grau” de uma lente se denomina, em Física, dioptria. Assim, uma lente de 2 graus é, a rigor, uma lente de duas dioptrias, cuja distância focal é de:  
a) 10 cm      b) 20 cm      c) 30 cm      d) 40 cm      e) 50 cm
2. Uma lente divergente possui uma distância focal de 100 cm e fornece uma imagem de 2 cm de altura e está situada a 20 cm da lente. Determine:
  - a) A posição do objeto, sabendo que ele é real.
  - b) O tamanho do objeto.
3. (ITA-SP) Um objeto de 20 cm de altura está situado a uma distância de 30 cm de uma lente. Esse objeto produz uma imagem virtual de 40 cm de altura. Determine a distância da imagem à lente, a distância focal e o tipo de lente.
4. (PUCC-SP) Um objeto real é disposto perpendicularmente ao eixo principal de uma lente convergente de distância focal 30 cm. A imagem obtida é direita e duas vezes maior que o objeto. Nessas condições, a distância entre o objeto e a imagem, em cm, vale:  
a) 75      b) 45      c) 30      d) 15      e) 5
5. (UFRS) A distância focal de uma lente convergente é 10 cm. A que distância da lente deve ser colocada uma vela para que sua imagem seja projetada, com nitidez, sobre um anteparo situado a 0,5 m da lente?  
a) 5,5 cm      b) 12,5 cm      c) 30 cm      d) 50 cm      e) 60 cm

6. (MACK-SP) A 60 cm de uma lente convergente de 5 di, coloca-se, perpendicularmente ao seu eixo principal, um objeto de 15 cm de altura. A altura da imagem desse objeto é:  
a) 5 cm      b) 7,5 cm      c) 10 cm      d) 12,5 cm      e) 15 cm
7. (UFSCar-SP) Na máquina fotográfica, a distância da objetiva ao filme é de 25 cm. A partir das especificações dadas a seguir, assinale a que corresponde a uma lente que poderia ser a objetiva dessa máquina:  
a) Convergente, de convergência +4 di.  
b) Convergente, de convergência +25 di.  
c) Convergente, de convergência +40 di.  
d) Divergente, de convergência -25 di.  
e) Divergente, de convergência -4 di.
8. (Vunesp-SP) Assinale a alternativa correta:  
a) Quando alguém se vê diante de um espelho plano, a imagem que observa é real e direta.  
b) A imagem formada sobre o filme, nas máquinas fotográficas, é virtual e invertida.  
c) A imagem que se vê quando se usa uma lente convergente como "lente de aumento" (lupa) é virtual e direita.  
d) A imagem projetada sobre uma tela por um projetor de *slides* é virtual e direita.  
e) A imagem de uma vela formada na retina de um olho humano é virtual e invertida.
9. (Fatec-SP) A imagem de um objeto, fornecida por uma lente divergente, é  
a) Real, invertida e maior que o objeto.  
b) Real, direita e menor que o objeto.  
c) Virtual, direita e maior que o objeto.  
d) Real, invertida e menor que o objeto.  
e) Virtual, direita e menor que o objeto.

## Descomplicando a Física

(UFMG-1998) As figuras representam, de forma esquemática, espelhos e lentes.



Eduardo Borges

Para se projetar a imagem de uma vela acesa sobre uma parede, pode-se usar:

- a) O espelho E<sub>1</sub> ou a lente L<sub>2</sub>.
- b) O espelho E<sub>1</sub> ou a lente L<sub>1</sub>.
- c) O espelho E<sub>2</sub> ou a lente L<sub>2</sub>.
- d) O espelho E<sub>2</sub> ou a lente L<sub>1</sub>.

Resposta correta: Alternativa A.

### Resolução

Para que uma imagem possa ser projetada, ela necessariamente deve ser real. Portanto, se for utilizado um espelho, ele obrigatoriamente deve ser côncavo. Se for utilizada uma lente, ela deve ser convergente.

Qual a essência dos fenômenos elétricos? Como funciona um circuito elétrico? O que é corrente elétrica? O que vem a ser um isolante elétrico? Eletricidade tem massa?

Os fenômenos de natureza elétrica são conhecidos há séculos. Na Grécia antiga, Tales de Mileto observou que o âmbar (substância resinosa, amarela e fossilizada) é capaz de adquirir carga elétrica por meio de fricção e sugeriu a palavra grega *elektron* dando origem à palavra eletricidade.

Eletricidade é um fenômeno que ocorre devido à passagem de cargas elétricas em um condutor, a energia elétrica, e não possui massa.

A massa é uma propriedade da matéria. Os elétrons, os prótons e os nêutrons possuem massa.

## Carga elétrica

A matéria, a partir das partículas que constituem o átomo, possui duas importantes propriedades: massa e carga elétrica. A primeira está relacionada à força gravitacional e a segunda, de modo semelhante, está relacionada à força elétrica.

Define-se carga elétrica como sendo a propriedade que os corpos possuem de, quando atritados, manifestar a ação de atrair outros corpos.

A unidade de carga elétrica no SI é o Coulomb (C).



Claudiu Fabian Milea/Dreamstime

## Carga elétrica elementar

Todos os corpos são formados por átomos, que por sua vez são constituídos de prótons, elétrons e nêutrons. O nêutron é assim denominado exatamente por não possuir carga elétrica, o que nos leva, em particular, a analisar, mais detalhadamente, o comportamento de prótons e elétrons.

O núcleo atômico possui carga elétrica positiva devido à presença dos prótons. Ao redor do núcleo orbitam os elétrons que têm carga elétrica negativa.

O átomo é eletricamente neutro, ou seja, tem quantidades iguais de carga elétrica negativa e positiva, isto é, de elétrons e prótons.

Os prótons compõem, juntamente com os nêutrons, a estrutura nuclear dos átomos e encerram praticamente toda a massa do átomo, devido ao fato de o próton e o nêutron possuírem massa, aproximadamente, duas mil vezes maior que a do elétron. Em função dessa característica é que a maioria dos fenômenos elétricos está relacionada ao movimento de elétrons.

A carga elétrica de um elétron é numericamente igual à de um próton e possui módulo igual a  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C, denominada carga elétrica elementar (e) ou unidade eletrostática de carga (uec).

$$1 \text{ uec} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Os corpos dotados de carga elétrica (q) possuem valor de carga múltiplos inteiros da carga elétrica elementar (e), o que equivale a dizer que a carga elétrica é uma grandeza quantificada.

Logo,

$$q = n \cdot e,$$

onde: n pode se referir ao número de prótons, ao número de elétrons ou à diferença entre o número de prótons e de elétrons do corpo, conforme a situação descrita.

# Tipos de eletrização

## Por atrito

Eletrizar é fazer com que um corpo, inicialmente neutro, adquira carga elétrica.

Para todo corpo ou matéria não eletrizada, o número de prótons é igual ao número de elétrons. Dizemos que o sistema, corpo ou matéria é eletricamente neutro.

Tome como exemplo um bastão de vidro e um pedaço de seda, ambos eletricamente neutros. Quando os corpos são atritados, um contra o outro, elétrons do vidro passam para a seda. Em consequência, a seda fica eletrizada negativamente, e o vidro, positivamente.

Deve-se observar que o atrito apenas estabelece o contato para que possa ocorrer a transferência de elétrons de um material para outro, não sendo a causa da eletrização.

Nem todo corpo pode ser eletrizado.

## Por contato

Se colocarmos em contato dois condutores, um neutro

Saiba



### Série triboelétrica

Em grego, tribo significa ação de esfregar. A série triboelétrica relaciona os materiais por meio da tendência que um material tem de capturar elétrons de outro. Por exemplo: atritando-se pele de gato contra o âmbar, o primeiro ficará eletrizado positivamente, e a resina, negativamente.

#### Materiais

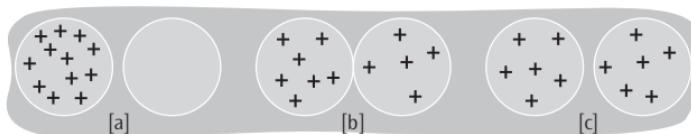
Pele humana seca	+
Pele de coelho	
Vidro	
Cabelo humano	
Fibra sintética (nylon)	
Lã	
Chumbo	
Pele de gato	
Seda	
Alumínio	
Papel	
Algodão	
Aço	
Madeira	
Âmbar	
Borracha dura	
Níquel	
Cobre	
Latão	
Prata	
Ouro	
Platina	
Poliéster	
Isopor	
Filme PVC	
Poliuretano	
Poliétileno "fita adesiva"	
Polipropileno	
Vinil	
Silicone	
Teflon	

Tendência em capturar elétrons

e outro eletrizado, ambos ficarão eletrizados, isto é, parte da carga elétrica do condutor eletrizado é transferida para o corpo inicialmente neutro, de modo que ambos entrem em equilíbrio de cargas elétricas.

Desse fato, resulta o *princípio da conservação da carga elétrica*: num sistema eletricamente isolado, a soma algébrica das cargas elétricas é constante.

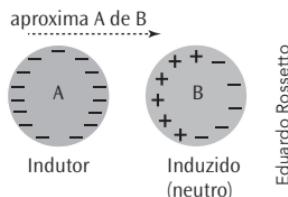
Caso os corpos sejam rigorosamente iguais, sendo a carga inicial do corpo A igual a  $q$ , a carga final dos corpos após o contato será  $q/2$ .



Eduardo Borges

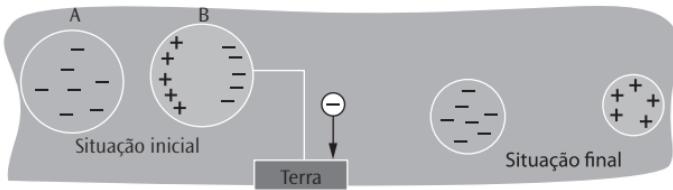
## Por indução

Diferentemente dos casos anteriores, o fenômeno de indução se baseia no fato de que a eletrização deve ocorrer sem que o corpo neutro entre em contato físico direto com o corpo eletrizado. Tomando-se um corpo (A) eletrizado (indutor) e aproximando-o de um corpo (B) neutro (induzido), notamos uma separação de cargas no corpo B, conforme mostra a figura a seguir.



Eduardo Rossetto

Quando o corpo induzido está ligado temporariamente à Terra (ou a um corpo maior com que possa trocar elétrons), o induzido adquire cargas elétricas opostas às do indutor.



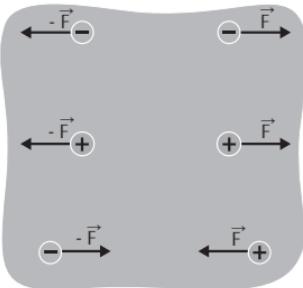
Eduardo Borges

## Lei de Du Fay

Corpos puntiformes ou partículas, sejam cargas elétricas ou não, são corpos que possuem dimensões desprezíveis em comparação às dimensões do sistema em que eles estão inseridos. Em fenômenos elétricos, essa comparação é feita comumente entre o tamanho do corpo e as distâncias que os separam de outros corpos eletrizados.

Consideremos duas cargas puntiformes colocadas próximas uma da outra. Três situações são possíveis, como mostram as figuras a seguir.

Uma carga elétrica exerce atração sobre a outra. Em qualquer um dos casos, elas obedecem ao princípio da ação e reação e, portanto, têm mesma intensidade e direção e sentidos opostos. Não se anulam porque atuam em corpos distintos.



Eduardo Borges

Cargas de sinais iguais se repelem, cargas de sinais opostos se atraem.

## Lei de Coulomb

Charles Coulomb, em 1780, provou experimentalmente que:

O módulo da força de interação entre duas cargas elétricas puntiformes é diretamente proporcional ao produto do módulo de suas cargas elétricas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

A expressão matemática da Lei de Coulomb é:

$$|F| = \frac{K \cdot |q_1| \cdot |q_2|}{d^2}$$

Onde:  $F$  é a intensidade da força elétrica entre os corpos;

$K$  é uma constante de proporcionalidade, denominada constante eletrostática, e depende do meio material no qual as cargas estão dispostas;

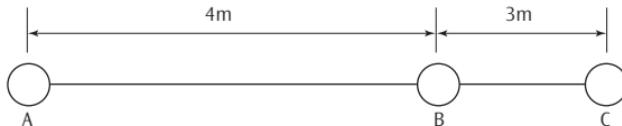
$|q_1|$  e  $|q_2|$  representam o módulo das cargas elétricas; e  $d$  representa a distância que as separa.

No vácuo, a constante eletrostática, admite  $K = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-1}$  (SI)

### Exemplo

Considere três cargas elétricas puntiformes A, B e C, no vácuo, onde  $q_A = 8 \text{ mC}$ ,  $q_B = 10 \text{ mC}$  e  $q_C = -6 \text{ mC}$ . A carga B encontra-se a 4 m de A e, sobre a mesma linha de ação, a carga C está posicionada a 3 m de B e a 7 m de A. Calcule a intensidade da força resultante sobre a carga B.

### Resolução



As cargas A e B são positivas, e a força de interação entre elas será de repulsão:

$$|F| = \frac{K \cdot |q_A| \cdot |q_B|}{d^2}$$

$$F_{AB} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 8 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{4,0^2}$$

$$F_{AB} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

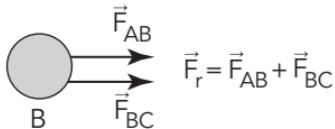
As cargas B e C são de sinais opostos, e a força de interação entre elas será de atração:

$$|F| = \frac{K \cdot |q_B| \cdot |q_C|}{d^2}$$

$$F_{BC} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{3^2}$$

$$F_{BC} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

A força resultante sobre B será dada pela soma vetorial devido às duas interações:



$$F_r = F_{AB} + F_{BC} = 4,5 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot 10^{-2} = 10,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

---

### TESTE SEU SABER

---

1. Como devemos variar a distância entre duas pequenas esferas eletrizadas para mantermos constante o valor da força elétrica sobre elas, se triplicamos a quantidade de carga elétrica de cada uma?

2. Três esferas, M, N e P, estão suspensas por fios isolantes. Quando se aproxima N de P, nota-se uma repulsão entre as esferas; quando se aproxima N de M, nota-se uma atração. Das possibilidades apontadas na tabela, quais são compatíveis com as observações?

Possibilidades	M	N	P
1 <sup>a</sup>	+	+	-
2 <sup>a</sup>	-	-	+
3 <sup>a</sup>	Nula	-	Nula
4 <sup>a</sup>	-	+	+
5 <sup>a</sup>	+	-	-

3. A força de repulsão entre duas cargas elétricas puntiformes, que estão a 20 cm uma da outra, é 0,030 N. Essa força aumentará para 0,060 N se a distância entre as cargas for alterada para aproximadamente:
- a) 5 cm      b) 10 cm      c) 14 cm      d) 28 cm      e) 40 cm
4. Três bolas metálicas podem ser carregadas eletricamente. Observa-se que cada uma das três bolas atrai cada uma das outras duas. Três hipóteses são apresentadas:
- I - Apenas uma das bolas está carregada.  
 II - Duas bolas estão carregadas.  
 III - As três bolas estão carregadas.
- O fenômeno pode ser explicado:
- a) Somente pela hipótese II.  
 b) Somente pelas hipóteses II e III.  
 c) Pela hipótese I.  
 d) Somente pela hipótese III.  
 e) Por todas as três hipóteses.
5. Suponha uma esfera metálica puntiforme com uma carga Q uniformemente distribuída em sua superfície. Uma partícula de carga  $+4 \times 10^{-7}$  C, ao ser colocada num ponto P a uma distância 0,30 m do centro da esfera,

experimenta uma força atrativa de módulo  $2 \times 10^{-2}$  N. Considere  $K = 9 \times 10^9$  N. m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>. Determine Q.

6. Para evitar formação de centelhas elétricas, os caminhões transportadores de combustível costumam andar com uma corrente metálica arrastando pelo chão. Explique tal procedimento.
7. (UFPA) Um corpo A, eletricamente positivo, eletriza um corpo B que inicialmente estava eletricamente neutro, por indução eletrostática. Nessas condições pode-se afirmar que o corpo B ficou eletricamente:
  - a) Positivo, pois prótons da terra são absorvidos pelo corpo.
  - b) Positivo, pois elétrons do corpo foram para a terra.
  - c) Negativo, pois prótons do corpo foram para a terra.
  - d) Negativo, pois elétrons da terra são absorvidos pelo corpo.
  - e) Negativo, pois prótons da terra são absorvidos pelo corpo.
8. (Unifor-1997) Um bastão é atritado com um pano. A seguir, repele uma esfera eletrizada negativamente. Pode-se afirmar corretamente que o bastão foi eletrizado:
  - a) Positivamente, por contato com o pano.
  - b) Positivamente, por indução da esfera.
  - c) Negativamente, por indução da esfera.
  - d) Negativamente, por atrito com o pano.
  - e) Neutralizado, ao aproximar-se da esfera.
9. (Fuvest) Uma esfera condutora A, de peso P, eletrizada positivamente, é presa por um fio isolante que passa por uma roldana. A esfera A se aproxima, com velocidade constante, de uma esfera B, idêntica à anterior, mas neutra e isolada. A esfera toca em B e, em seguida, é puxada para cima, com velocidade também constante. Quando A passa pelo ponto M, a tração do fio é T<sub>1</sub>, na descida, e T<sub>2</sub>, na subida. Pode-se afirmar que:
  - a) T<sub>1</sub> < T<sub>2</sub> < P
  - b) T<sub>1</sub> < P < T<sub>2</sub>
  - c) T<sub>2</sub> < T<sub>1</sub> < P
  - d) T<sub>2</sub> < P < T<sub>1</sub>
  - e) P < T<sub>1</sub> < T<sub>2</sub>
10. (Unifor-2003) Duas cargas elétricas puntiformes idênticas e iguais a  $1 \times 10^{-6}$  estão separadas de 3 cm, no vácuo. Sendo a constante eletrostática

no vácuo igual a  $9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , a intensidade da força de repulsão entre as cargas, em newtons, vale:

- a)  $1 \cdot 10$       b) 1      c)  $1 \cdot 10^{-1}$       d)  $1 \cdot 10^{-2}$       e)  $1 \cdot 10^{-3}$

11. (UFC) Quando a distância entre duas cargas puntiformes é de  $1 \times 10^{-1}\text{m}$ , a intensidade da força elétrica em cada uma é 0,045 N. Se a distância entre as mesmas duas cargas é diminuída para  $3 \times 10^{-3}\text{m}$ , qual é agora a intensidade da força em N?
- a) 45      b) 40      c) 30      d) 50      e) 25
12. (Cefet-CE-2002) Para ter uma ideia da intensidade da força elétrica entre cargas elétricas, um estudante de Física determinou a força entre dois corpos de massas iguais eletrizados com cargas de 1C, cada, separados por uma distância de 1 m, no vácuo ( $K = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ). Quantas pessoas de 90 kg, cada, essa força poderia suspender? ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ ).
- a)  $10^7$       b)  $10^2$       c) 9      d)  $10^9$       e)  $10^{11}$
13. (PUC-Rio-2008) Duas esferas carregadas, afastadas de 1 m, se atraem com uma força de 720 N. Se uma esfera tem o dobro da carga da outra, qual é a carga das duas esferas? (Considere  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ )
- a)  $1 \cdot 10^{-4} \text{ C}$  e  $2 \cdot 10^{-4} \text{ C}$   
b)  $2 \cdot 10^{-4} \text{ C}$  e  $4 \cdot 10^{-4} \text{ C}$   
c)  $3 \cdot 10^{-4} \text{ C}$  e  $6 \cdot 10^{-4} \text{ C}$   
d)  $4 \cdot 10^{-4} \text{ C}$  e  $8 \cdot 10^{-4} \text{ C}$   
e)  $5 \cdot 10^{-4} \text{ C}$  e  $10 \cdot 10^{-4} \text{ C}$
14. (PUC-Rio-2007) Duas partículas de carga elétrica Q e massa M são colocadas sobre um eixo e distam de 1 m. Podemos dizer que:
- a) A força de interação entre as partículas é nula.  
b) As partículas serão atraídas pela força coulombiana e repelidas pela força gravitacional.  
c) As partículas serão repelidas pela força coulombiana e repelidas pela força gravitacional.  
d) As partículas serão atraídas pela força coulombiana e atraídas pela força gravitacional.  
e) As partículas serão repelidas pela força coulombiana e atraídas pela força gravitacional.

# Descomplicando a Física

(Fuvest) Duas pequenas esferas metálicas idênticas, inicialmente neutras, encontram-se suspensas por fios inextensíveis e isolantes.

Um jato de ar perpendicular ao plano da figura é lançado durante certo intervalo de tempo sobre as esferas.

Observa-se então que ambas as esferas estão fortemente eletrizadas. Quando o sistema alcança novamente o equilíbrio estático, podemos afirmar que as tensões nos fios:

- a) Aumentaram e as esferas se atraem.
- b) Diminuíram e as esferas se repelem.
- c) Aumentaram e as esferas se repelem.
- d) Diminuíram e as esferas se atraem.
- e) Não sofreram alterações.

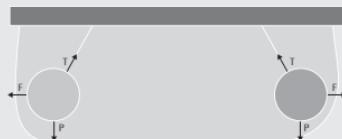
Resposta correta: Alternativa C.

## Resolução

Como as esferas são idênticas e, em função do jato de ar, elas se eletrizam da mesma forma e, portanto, adquirem cargas de mesmo sinal. As esferas devem então se repelir. Surge, em cada esfera, uma força de repulsão em função dessa interação, fazendo com que a tração no fio aumente.



Eduardo Borges



Eduardo Borges

# 26

## Campo elétrico

O conceito de campo, proposto por Faraday na primeira metade do século XIX, foi criado para explicar fenômenos de ação a distância.

O conceito de campo está sempre associado a uma propriedade da matéria, isto é, uma concentração de matéria, por menor que seja, é capaz de gerar campo(s). Campo gravitacional está associado à massa de um corpo, enquanto, em fenômenos elétricos, o campo elétrico está associado à carga elétrica do corpo. Dessa forma, podemos dizer que uma carga elétrica ou um corpo qualquer que possua carga elétrica não nula promove no seu entorno pelo menos dois tipos de campos: um de natureza gravitacional e outro de natureza elétrica. Se uma segunda carga ou corpo for posicionado nas proximidades da primeira, teremos manifestações dos campos: surgem, então, as forças gravitacional e elétrica.

Ressalte-se que existe um terceiro tipo de campo cuja natureza será apresentada posteriormente: o campo magnético.

Uma carga elétrica colocada em algum ponto do espaço exerce ao seu redor uma ação, o campo elétrico, que só é percebido se outro corpo ou carga estiver imerso nessa região.

Considere duas cargas elétricas puntiformes A e B, de cargas elétricas  $q_A$  e  $q_B$ , colocadas isoladamente em uma região do espaço. Pela Lei de Coulomb, haverá uma interação entre ambas, resultando em uma força  $F_B$  que atua em B devido à ação de A sobre B, e sua reação, atuando em A. Caso seja substituída a carga B por outra C, teremos, da mesma forma, a força  $F_C$  que atua em C; substituindo a carga C por outra D, teremos a força  $F_D$ , e assim por diante. As razões entre as forças e os valores das respectivas cargas são constantes, isto é:

$$\frac{F_B}{q_B} = \frac{F_C}{q_C} = \frac{F_D}{q_D} = \text{constante}$$

A constante citada traduz a intensidade do vetor campo elétrico. Campo elétrico é, pois, uma grandeza vetorial.

Dessa forma, se em um ponto P qualquer de um campo elétrico  $E$ , gerado por uma carga elétrica puntiforme A, for colocada uma segunda carga elétrica puntiforme de valor  $q$ , podemos escrever:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Onde:  $\vec{E}$  = é o vetor campo elétrico no ponto P gerado pela carga A; e

$\vec{F}$  = é a força que age sobre a carga de valor  $q$ .

A intensidade do vetor campo elétrico no ponto P pode ser calculada:

$$F = |q| \cdot E$$

Associando essa expressão à lei de Coulomb, surge:

$$E = \frac{k \cdot Q}{d^2}$$

A unidade do SI para a força  $F$  é o newton (N); para a carga elétrica  $q$ , é o coulomb (C) e o campo elétrico é o newton por coulomb (N/C) (ou volt por metro (V/m)).

Para  $q > 0$ ,  $\vec{E}$  e  $\vec{F}$  possuem o mesmo sentido.

Para  $q < 0$ ,  $\vec{E}$  e  $\vec{F}$  possuem sentidos opostos.

$\vec{E}$  e  $\vec{F}$  têm sempre a mesma direção.

## Exemplo

Uma carga elétrica de  $5 \text{ mC}$  é colocada em uma região do espaço onde há ação de um campo elétrico de intensidade  $1,2 \cdot 10^8 \text{ N/C}$ . Determine a intensidade da força que atua sobre a carga em questão. Faça uma representação da situação, indicando a direção e o sentido da força, bem como a direção e o sentido do vetor campo elétrico.

## Resolução

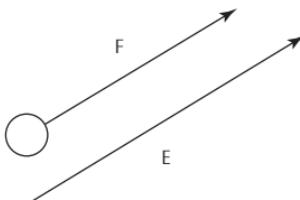
A intensidade da força pode ser calculada:

$$F = q \cdot E$$

$$F = (5 \cdot 10^{-6}) \cdot (1,2 \cdot 10^8)$$

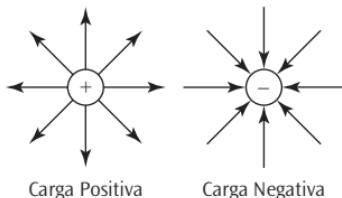
$$F = 6 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Como  $q > 0$ , a força e o vetor campo elétrico possuem mesma direção e sentido.



## Linhas de força do campo elétrico

As linhas que representam a direção e o sentido do campo elétrico em cada um de seus pontos são denominadas *linhas*



de força ou linhas de campo. Elas contêm o vetor campo elétrico ou o tangenciam.

Para uma carga positiva puntiforme, as linhas de força são radiais e partem da carga elétrica. Se a partícula é negativa, as linhas de força terminam na carga elétrica.

## Campo elétrico de um condutor esférico carregado

As cargas elétricas se distribuem pela superfície externa em um condutor. Dessa forma, o campo elétrico no interior do condutor é nulo. Para pontos externos (ou na superfície) ao condutor vale a expressão:

$$E = \frac{k \cdot Q}{d^2}$$

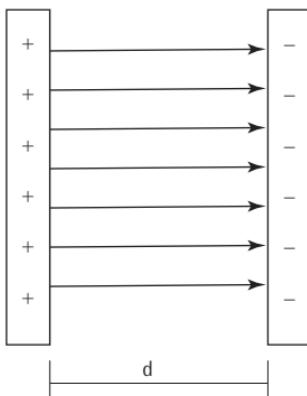
## Potencial elétrico

### Energia potencial elétrica

Considere duas placas paralelas eletrizadas, uma com carga  $+q$  e outra com carga  $-q$ , mantidas afastadas por uma distância  $d$  em uma região do espaço sem influência de ação gravitacional.

As setas indicam a orientação das linhas de campo, que por sua vez são paralelas e igualmente espaçadas em um CEU.

No espaço entre as placas surge um campo elétrico orientado da placa de carga positiva para a placa de carga negativa. O campo elétrico possui, salvo próximo das bordas das placas (para evitar esse tipo de problema, costuma-se admitir que as placas



Campo Elétrico Uniforme (CEU).

possuem comprimento infinito), a mesma direção e sentido em qualquer ponto situado entre as placas. Nessa região, a intensidade do campo elétrico é constante e esse é uniforme.

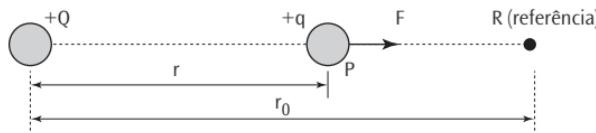
Caso uma carga elétrica puntiforme  $q > 0$  seja abandonada em um ponto qualquer da placa positiva, a carga sofrerá a ação de uma força que a projetará em direção à placa negativa. A carga elétrica atinge a placa negativa com uma determinada velocidade; conclui-se que, no ponto de partida, a carga estava dotada de alguma energia, uma *energia potencial elétrica*, que ao longo do deslocamento vai se transformando em energia cinética. Assim, a força elétrica atuante na partícula tem caráter conservativo e, portanto, o trabalho da força independe da trajetória; logo, pode-se escrever:

$$\tau = \mathbf{F} \cdot \mathbf{d}$$

$$\tau = q \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{d},$$

o que mostra que a energia potencial elétrica de uma carga  $q > 0$  diminui à medida que ela se desloca na direção e sentido do vetor campo elétrico.

Considere duas cargas elétricas puntiformes,  $Q$  e  $q$ , separadas por uma distância  $r$ . A carga  $Q$ , tomada como fixa, promove uma força sobre a carga  $q$ , fazendo com que ela se movimente. Há, portanto, realização de trabalho.



A energia potencial elétrica no ponto P pode ser expressa:

$$E_{potP} = \frac{K \cdot Q \cdot q}{r} - \frac{K \cdot Q \cdot q}{r_0}$$

A energia potencial elétrica é uma função da posição da carga, diminuindo à medida que aumenta a distância da carga  $q$  em relação à carga fixa  $Q$ , consequentemente, a energia potencial elétrica tende a zero quando  $r_0$  tende a infinito. Assim, a energia potencial elétrica de  $q$  no ponto  $P$  do campo de uma carga fixa  $Q$  pode ser expressa:

$$E_{potP} = \frac{K \cdot Q \cdot q}{r}$$

Para cargas de mesmo sinal, a energia potencial elétrica será positiva; para cargas de sinais opostos, negativa.

## Determinação do potencial elétrico

A expressão da energia potencial elétrica pode ser reelaborada:

$$\frac{E_{potP}}{q} = \frac{K \cdot Q}{r}$$

O parâmetro  $K \cdot Q / r$  é constante, demonstrando que a energia potencial elétrica é diretamente proporcional ao valor da carga  $q$ ,

$$\frac{E_{potP}}{q} = \text{constante}$$

Dessa relação surge a definição de grandeza potencial elétrico ( $V$ ).

$$V_p = \frac{E_{potP}}{q},$$

o que permite escrever uma equação que estabelece a relação entre o potencial elétrico em um ponto  $P$ , a carga  $Q$  geradora do campo em  $P$  e a distância desse ponto à carga:

$$V_p = \frac{K \cdot Q}{r}$$

A unidade do potencial elétrico no SI é o joule/coulomb, denominada volt (V).

$$1V = 1J/C$$

### Exemplo

Uma carga elétrica puntiforme de  $6 \text{ mC}$  é colocada no vácuo, em um ponto P, sujeita a um campo elétrico. Por conta do campo elétrico, a carga sofre ação de uma força repulsiva, deslocando-se ao infinito, com realização de um trabalho de  $420 \text{ J}$ . Calcule o potencial elétrico no ponto P.

### Resolução

$$E_{\text{potP}} = 420 \text{ J}$$

$$V_p = \frac{420}{6 \cdot 10^{-6}}$$

$$V_p = 7 \cdot 10^7 \text{ V}$$

### Diferença de potencial (ddp)

Uma carga  $q$  colocada no campo elétrico gerado por  $Q$  (fixa) sofre ação de uma força  $F$ , e, como consequência, se desloca de modo a se afastar de  $Q$ . Há, portanto, realização de trabalho.



A força elétrica tem caráter conservativo, e o trabalho é igual à diferença entre a energia potencial elétrica inicial e a final.

Sendo  $V_A$  o potencial elétrico em A e  $V_B$  o potencial elétrico de B, quando a partícula se desloca de A para B:

$$E_{\text{potA}} = q \cdot V_A \text{ e } E_{\text{potB}} = q \cdot V_B$$

$$\tau_{AB} = q \cdot (V_A - V_B)$$

A diferença entre os potenciais  $V_A$  e  $V_B$  é denominada diferença de potencial elétrico ( $U$ ).

O valor de  $U$  entre os pontos A e B é a relação entre o trabalho da força elétrica e a carga.

Para  $U > 0$ , temos  $V_A > V_B$ , uma carga positiva  $q$  movimenta-se da posição de maior potencial para a posição de menor potencial.

Generalizando, as cargas elétricas positivas se movimentam no sentido dos potenciais menores, e as cargas elétricas negativas, no sentido dos potenciais maiores.

### Exemplo

Considere uma carga elétrica de 20 mC, isolada e no vácuo. Calcule:

- O potencial elétrico gerado pela carga em um ponto A à distância de 20 cm da carga elétrica.
- O potencial elétrico gerado pela carga em um ponto B à distância de 50 cm da carga elétrica.
- A diferença de potencial entre os pontos A e B.
- O trabalho da força elétrica para deslocar uma carga  $q$  de 1 mC de A para B.
- Admitindo que a carga  $q$  tenha sido abandonada em repouso no ponto A, qual a energia cinética que ela terá em B?

## Resolução

a)  $V_A = \frac{K \cdot Q}{r_A} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{0,2} = 9 \cdot 10^5 V$

b)  $V_B = \frac{K \cdot Q}{r_B} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{0,5} = 3,6 \cdot 10^5 V$

c)  $U = V_A - V_B = (9 \cdot 10^5) - (3,6 \cdot 10^5) = 5,4 \cdot 10^5 V$

d)  $\tau_{AB} = q \cdot (V_A - V_B) = q \cdot U = (1 \cdot 10^{-6}) \cdot (5,4 \cdot 10^5) = 0,54 J$

- e) Pelo teorema da energia cinética, a diferença entre as energias cinéticas de A e B é igual ao trabalho realizado no deslocamento; como em A a velocidade da carga é zero, a energia cinética em A é zero e em B será 0,54 J.

## Corrente elétrica

As cargas elétricas podem se mover no vácuo ou em meios materiais.

Corrente elétrica é um movimento ordenado de cargas elétricas. Quando cargas elétricas deslocam-se no mesmo sentido em um meio material, as contribuições de cada uma das cargas se somam e dizemos que há uma corrente elétrica. Entretanto, para que ocorra esse deslocamento de cargas, é necessária a presença de um campo elétrico. Da interação entre o campo elétrico e o deslocamento da carga surge uma diferença de potencial elétrico (ddp).

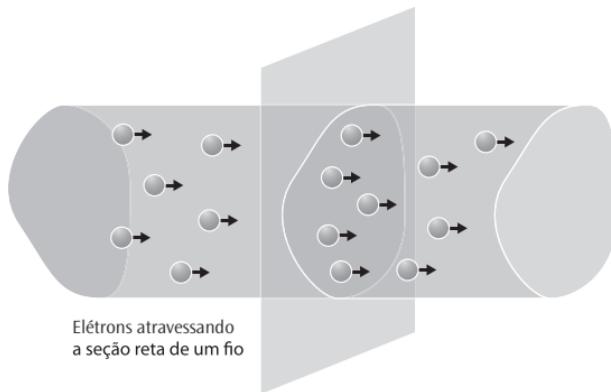
Quando um condutor é submetido a um campo elétrico, as cargas livres presentes no condutor entram em movimento sob a ação deste campo. Esse deslocamento das cargas constitui a corrente elétrica. Nos metais, são elétrons livres que constituem a corrente elétrica; nos líquidos, são os íons positivos e negativos; e nos gases, a corrente elétrica pode se dar por íons e por elétrons.

De um modo geral, os materiais que permitem a passagem de corrente elétrica são denominados condutores elétricos. Como exemplo, podemos citar as ligas metálicas, alguns líquidos e alguns gases ionizados. Os meios que apresentam relativa resistência à passagem da corrente elétrica são denominados isolantes elétricos. São exemplos, borracha, alguns plásticos, gases não ionizados etc.

## Intensidade da corrente elétrica

Quando uma quantidade de carga elétrica  $\Delta Q$  passa através da secção transversal de um condutor, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , a intensidade  $i$  da corrente elétrica nesta secção pode ser expressa por:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$



No SI, a intensidade da corrente é medida em ampère (A). É usual também as unidades miliampère (mA) e o microampère ( $\mu$ A).

$$1A = 1C/s$$

$$1mA = 10^{-3} A$$

$$1 \text{ mA} = 10^{-6} A$$

## Exemplo

A resistência elétrica de um chuveiro está sujeita a uma corrente elétrica de 30A. Calcule a carga elétrica que atravessa a secção transversal dessa resistência em um período de 8 minutos, bem como a quantidade de elétrons que essa carga representa.

## Resolução

$$\Delta t = 8 \text{ minutos} = 480 \text{ s}$$

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

$$30 = \frac{\Delta Q}{480}$$

$$\Delta Q = 14400 \text{ C}$$

O número de elétrons pode ser determinado:

Considerando  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , temos

$$\Delta Q = n \cdot e$$

$$14400 = n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$$

$$n = 9 \cdot 10^{22} \text{ elétrons}$$

## Resistência elétrica – Leis de Ohm

Originária em função da presença de um campo elétrico, a diferença de potencial ( $U$ ) produz, como consequência, uma corrente elétrica ( $i$ ).

A corrente elétrica implica em cargas elétricas que atravessam a secção transversal do condutor. O meio material do qual o condutor é feito vai oferecer uma resistência à passagem dessas cargas e, em regra, isso acarreta o aquecimento do condutor. Elementos

que caracteristicamente transformam energia elétrica em energia térmica são denominados resistores.

A propriedade dos resistores de dificultar ou limitar a passagem da corrente elétrica é denominada resistência elétrica ( $R$ ).

Para alguns resistores, a corrente elétrica é diretamente proporcional à diferença de potencial aplicada,

$$\frac{U}{i} = \text{constante,}$$

onde a constante é, na verdade, uma medida da limitação da intensidade da corrente elétrica, isto é,

$$\frac{U}{i} = R,$$

ou, ainda,

$$U = R \cdot i \text{ expressão da 1ª Lei de Ohm.}$$

Os resistores que satisfazem essa relação são denominados resistores ôhmicos.

No Sistema Internacional, a corrente elétrica ( $i$ ) é medida em ampère (A), a diferença de potencial ( $U$ ) é medida em volt (V) e a resistência elétrica é medida em ohm ( $\Omega$ ).

A resistência elétrica é uma propriedade que depende de características do material de que é feito o resistor ou o condutor elétrico: comprimento ( $d$ ), área da secção transversal ( $S$ ) e tipo de material que constitui o condutor. A esta última característica está relacionada a propriedade resistividade elétrica ( $\rho$ ).

A 2ª Lei de Ohm estabelece a relação entre essas grandezas:

$$R = \frac{\rho d}{S}$$

No SI, comprimento ( $d$ ) deve ser expresso em metros (m), área da secção transversal ( $S$ ), em metro quadrado ( $m^2$ ), e resistividade elétrica ( $\rho$ ), em ohm vezes metro ( $\Omega \cdot m$ ).

Um condutor elétrico deve apresentar baixa resistividade elétrica. Quanto mais baixa a resistividade elétrica, mais baixa a resistência elétrica.

**Resistividade elétrica de alguns materiais**

Material	Resistividade elétrica ( $\Omega \cdot m$ )
Prata	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Cobre	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Ouro	$2,3 \cdot 10^{-8}$
Alumínio	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Tungstênio	$5,6 \cdot 10^{-8}$
Zinco	$6,3 \cdot 10^{-8}$
Latão	$7 \cdot 10^{-8}$
Platina	$10 \cdot 10^{-8}$
Estanho	$11,5 \cdot 10^{-8}$
Níquel-cromo	$100 \cdot 10^{-8}$
Germânio puro	47
Silício puro	$21,4 \cdot 10^4$
Vidro	1012 a 1013
Âmbar	$5 \cdot 10^{16}$
Mica	$9 \cdot 10^{16}$
Quartzo fundido	$75 \cdot 10^{18}$

## Potência elétrica

Define-se potência como a razão entre o trabalho realizado e o intervalo de tempo decorrido na realização deste trabalho:

$$P = \frac{\tau}{\Delta t}$$

O trabalho realizado pela força elétrica sobre uma carga elétrica  $q$  determina a diferença de potencial elétrico ( $U$ ):

$$U = \frac{\tau}{q} \quad \tau = U \cdot q$$

Relacionando as duas expressões, temos:

$$P = \frac{U \cdot q}{\Delta t}$$

Como a intensidade de corrente elétrica ( $i$ ) é a razão entre a carga  $q$  que atravessa a secção transversal de um condutor e o intervalo de tempo  $\Delta t$  decorrido, isto é,  $i = q/\Delta t$ , surge:

$$P = U \cdot i,$$

expressão que mostra a dependência da potência elétrica com os parâmetros diferença de potencial elétrico e intensidade de corrente elétrica.

No SI, a unidade de potência elétrica é o watt (W).

### Exemplo

Um chuveiro elétrico possui a seguinte indicação: 220 V/4400 W. Calcule a corrente elétrica quando o chuveiro está ligado nas condições de trabalho proposta. Calcule também a nova potência caso o chuveiro seja ligado indevidamente em 110 V.

## Resolução

A corrente elétrica será:

$$P = U \cdot i$$

$$4400 = 220 \cdot i$$

$$i = 20 \text{ A}$$

Caso o chuveiro seja ligado em 110 V, sua resistência não muda,

$$U = R \cdot i$$

$$220 = R \cdot 20$$

$$R = 11 \text{ W}$$

A nova potência será dada em função de  $U = 110 \text{ V}$  e  $R = 11 \text{ V}$ , e a nova corrente elétrica:

$$U = R \cdot i$$

$$110 = 11 \cdot i$$

$$i = 10 \text{ A}$$

$$P = U \cdot i$$

$$P = 110 \cdot 10 = 1100 \text{ W}$$

A ddp cairá pela metade e, consequentemente, a corrente elétrica também. Vê-se que a potência será 25% da original, isto é, 1100 W.

## Energia elétrica

A energia elétrica é o produto da potência pelo intervalo de tempo:

$$E = P \cdot \Delta t$$

No SI, a unidade de energia é o joule (J), mas é muito comum o uso das unidades watt-hora (Wh) ou o múltiplo quilowatt-hora (kWh), que vale:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}$$

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 3600000 \text{ J}$$

### *Não confunda!*

O correto é quilowatt-hora (kWh),  
e não quilowatt por hora (kW/h).

O quilowatt por hora (kW/h) representaria potência dividida por tempo, o que não é unidade de energia.

### **Exemplo**

Calcule o consumo de energia elétrica mensal (30 dias) devido a um chuveiro que opera em uma tensão de 220 V e desenvolve uma potência de 5200 W. Considere uma família de três pessoas em que o chuveiro fica ligado em média 15 minutos por banho e cada pessoa toma um banho por dia.

### **Resolução**

Ao longo de um mês, o chuveiro opera por:

$$\Delta t = 3 \cdot 15 \text{ minutos/dia} \cdot 30 \text{ dias} = 1350 \text{ minutos} = 22,5 \text{ horas}$$

A energia consumida será:

$$E = 5200 \text{ W} \cdot 22,5 \text{ h} = 117000 \text{ Wh} = 117 \text{ kWh}$$

---

## TESTE SEU SABER

---

1. Uma carga de  $100 \text{ mC}$  é colocada em um ponto onde o campo elétrico tem intensidade  $1000 \text{ N/C}$ . Qual o módulo da força que atua sobre a carga?
2. Numa certa região da Terra, nas proximidades da superfície, a aceleração da gravidade vale  $9,8 \text{ m/s}^2$  e o campo eletrostático do planeta (que possui carga negativa na região) vale  $100 \text{ N/C}$ . Determine o sinal e o valor da carga elétrica que uma bolinha de gude, de massa  $50 \text{ g}$ , deveria ter para permanecer suspensa em repouso, acima do solo. Considere o campo elétrico praticamente uniforme no local e despreze qualquer outra força atuando sobre a bolinha.
3. O campo elétrico  $E$ , entre duas placas carregadas com cargas iguais, mas de sinais contrários, é uniforme. A respeito da força elétrica que atua sobre uma carga  $+q$ , colocada entre as referidas placas, pode-se afirmar que:
  - Aumenta à medida que a carga  $+q$  se aproxima da placa negativa.
  - É inversamente proporcional à distância de  $+q$  à placa negativa.
  - É inversamente proporcional à distância de  $+q$  à placa positiva.
  - É nula, qualquer que seja a posição de  $+q$  entre as placas.
  - Tem o mesmo valor qualquer que seja a posição de  $+q$  entre as placas.
4. Suponha uma esfera metálica de raio  $0,10 \text{ m}$  com uma carga  $Q$  uniformemente distribuída em sua superfície. Uma partícula de carga  $+4 \times 10^{-7} \text{ C}$ , ao ser colocada num ponto  $P$  a uma distância  $0,40 \text{ m}$  do centro da esfera, experimenta uma força atrativa de módulo  $2 \times 10^{-2} \text{ N}$ . Considere  $K = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .
  - Determine o campo elétrico (módulo, direção e sentido) produzido pelo esfera no ponto  $P$ .
  - Determine  $Q$ .
  - Calcule o potencial elétrico na superfície da esfera.
  - Calcule a intensidade do campo elétrico no interior da esfera.
5. Dois condutores, A e B, de mesmo material, estão submetidos a uma mesma ddp. Um dos condutores tem o dobro do diâmetro do outro e seu comprimento é três vezes maior. Qual a relação entre as correntes que os percorrem?

- 6.** No comércio, os fios condutores são conhecidos por números de uma determinada escala (fieira). Uma escala ainda usada é a AWG (American Wire Gage). Um fio muito usado em instalações domiciliares é o 12 AWG. Sua secção reta tem área de  $3,3 \text{ mm}^2$ . A resistividade do cobre, a  $20^\circ\text{C}$ , é de  $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}$ . Calcule o comprimento de um fio de cobre 12 AWG, para que sua resistência seja igual a  $240 \Omega$ .
- 7.** Uma pessoa que toca um fio condutor descalça, com o pé em contato com o chão, fica submetida a uma tensão. A resistência elétrica de seu organismo é de  $10000 \Omega$ , e estabeleceu-se uma corrente elétrica de  $11 \text{ mA}$ . Calcule a tensão a que a pessoa ficou submetida.
- 8.** Qual é a relação entre as resistências de dois fios de mesmo material e comprimento em que um tem o dobro do diâmetro do outro?
- 9.** Um fio cilíndrico, de comprimento  $L$  e diâmetro  $d$ , tem resistência elétrica de  $10 \Omega$ . Qual a resistividade elétrica do material de que é feito o fio?
- 10.** Um chuveiro elétrico ligado na posição inverno apresenta os seguintes dados nominais:  $220\text{V}/4400\text{W}$ . Considerando que um banho tem duração média de 15 minutos, e o custo do  $\text{kWh}$  é de R\$ 0,24, calcule o gasto financeiro mensal (30 dias) para uma família de 3 pessoas.
- 11.** Fusível é um dispositivo de proteção de aparelhos elétricos constituído por um material que se funde, devido ao efeito Joule, interrompendo a passagem de corrente elétrica quando esta ultrapassa um determinado valor. Por exemplo, um fusível de  $30\text{ A}$  funciona normalmente desde que a corrente elétrica não ultrapasse o valor de  $30\text{ A}$ . Se isso acontecer, o fusível queima, interrompendo a passagem de corrente elétrica. Nessas condições:
- De quantos ampères deve ser o fusível de proteção de um aparelho de  $120\text{V}/600\text{W}$ ?
  - Uma rede de energia elétrica de  $120\text{V}$  possui um fusível de  $20\text{ A}$ . Quantas lâmpadas de  $60\text{W}/120\text{V}$  podem ser ligadas, simultaneamente, nessa rede sem queimar o fusível?
- 12.** Um forno de micro-ondas funciona ligado à rede elétrica de  $220\text{V}$ . Em potência máxima, a intensidade de corrente elétrica necessária é  $12\text{ A}$ .
- Qual a potência máxima do forno?

- b) Se o forno funcionar, em potência máxima, durante 2 minutos, determine o consumo de energia elétrica, em joules e em kWh.
- c) Coloca-se um copo com 200 mL de água (calor específico 1 cal/g. $^{\circ}$ C e densidade 1 g/cm<sup>3</sup>) a 20  $^{\circ}$ C no forno, em potência máxima durante 10 s. Admitindo que toda energia seja absorvida pela água, qual é a temperatura atingida pela água? Considere 1 cal = 4 J.
- 13.** Você troca o seu chuveiro elétrico mais antigo, de 220V/4400 W, por um mais moderno, de 220V/7800 W. É preciso modificar a instalação elétrica na sua casa para fazer a substituição? Em caso afirmativo, o que você deve mudar? Justifique.
- 14.** Uma lâmpada incandescente tem, registrado em seu bulbo, a inscrição: 120V/150W. Qual a resistência elétrica da lâmpada? Qual a corrente elétrica que flui pelo filamento quando a lâmpada opera em condições normais?
- 15.** Em um ebulidor elétrico, aparelho elétrico comumente usado para aquecer água, são encontradas as seguintes especificações do fabricante: 960 W; 120V. Explique o significado dessas especificações. Supondo que o ebulidor esteja ligado à voltagem adequada, qual é a corrente que passa através dele? Qual o valor da resistência elétrica do ebulidor?
- 16.** Um chuveiro de 4000 W e 220 V teve sua resistência danificada. Para consertar, sua resistência foi cortada ao meio e aproveitou-se apenas uma das metades. Qual é a nova potência do chuveiro?
- 17.** Sabemos que é constante a ddp nos terminais do gerador de um chuveiro elétrico. Desejando que a água flua mais quente, devemos aumentar ou diminuir a resistência do chuveiro? Explique.
- 18.** Quando dizemos que a tensão elétrica numa tomada corresponde a 127V é porque:
- Sua potência equivale a 127 W.
  - A corrente elétrica valerá 127 A em 1 s.
  - Cada um dos seus coulombs transporta energia equivalente a 127 J.
  - Liberará 127 A continuamente.
  - O trabalho será igual a 127 J.

- 19.** A potência elétrica dissipada num resistor, com resistência elétrica constante, é diretamente proporcional:
- À raiz quadrada da tensão aplicada ao resistor.
  - À tensão aplicada ao resistor.
  - Ao quadrado da tensão aplicada ao resistor.
  - Ao inverso do quadrado da intensidade da corrente elétrica pelo resistor.
  - Ao inverso da intensidade da corrente elétrica pelo resistor.
- 20.** Um eletricista modifica a instalação elétrica de uma casa e substitui o chuveiro elétrico ligado em 110 V por outro, de mesma potência, mas ligado em 220 V. Observa-se que este chuveiro passará, então, a:
- Consumir mais energia elétrica.
  - Consumir menos energia elétrica.
  - Ser percorrido por uma corrente elétrica maior.
  - Ser percorrido por uma corrente elétrica menor.
  - Dissipar maior quantidade de calor.
- 21.** (UFMS) Quando ligado a uma tensão de 220V, um resistor de resistência elétrica  $R$  dissipava 1000 W. Para que outro resistor, ligado a 110V, dissipasse 2000 W, deve ter resistência elétrica de:
- a)  $2 R$       b)  $R$       c)  $R/2$       d)  $R/4$       e)  $R/8$
- 22.** (UCS-RS) Ao ser percorrido por uma corrente  $i$ , um resistor  $R$  dissipava uma potência  $P$ . Se esta corrente quadruplicar, e admitindo que  $R$  seja constante, a potência dissipada será:
- 16 vezes maior.
  - 4 vezes maior.
  - 2 vezes maior.
  - 16 vezes menor.
  - 4 vezes menor.
- 23.** (Enem) Lâmpadas incandescentes são normalmente projetadas para trabalhar com a tensão da rede elétrica em que serão ligadas. Em 1997, contudo, lâmpadas projetadas para funcionar com 127V foram retiradas do mercado e, em seu lugar, colocaram-se lâmpadas concebidas para uma tensão de 120V. Segundo dados recentes, essa substituição representou uma mudança significativa no consumo de energia elétrica para cerca de 80 milhões de brasileiros que residem nas regiões em que a tensão

da rede é de 127V. A tabela a seguir apresenta algumas características de duas lâmpadas de 60 W, projetadas respectivamente para 127V (antiga) e 120V (nova), quando ambas encontram-se ligadas numa rede de 127V.

Lâmpada (projeto original)	Tensão da rede elétrica	Potência medida (watt)	Luminosidade medida (lumens)	Vida útil média (horas)
60 W – 127 V	127 V	60	750	1000
60 W – 120 V	127 V	65	920	452

Acender uma lâmpada de 60 W e 120 V em um local onde a tensão na tomada é de 127V, comparativamente a uma lâmpada de 60 W e 127V no mesmo local tem como resultado:

- a) Mesma potência, maior intensidade de luz e maior durabilidade.  
 b) Mesma potência, maior intensidade de luz e menor durabilidade.  
 c) Maior potência, maior intensidade de luz e maior durabilidade.  
 d) Maior potência, maior intensidade de luz e menor durabilidade.  
 e) Menor potência, menor intensidade de luz e menor durabilidade.
- 24.** (Mack-SP) A tabela abaixo mostra o tempo de uso diário de alguns dispositivos elétricos de uma residência. Sendo R\$ 0,20 o preço de 1 kWh de energia elétrica, o custo mensal (30 dias) de energia elétrica consumida é:

Dispositivo	Potência	Quantidade	Tempo de uso diário de cada um
Lâmpada	60 W	4	5 h
Lâmpada	100 W	2	4 h
Chuveiro	4000 W	1	0,5 h

- a) R\$ 20,00    b) R\$ 22,00    c) R\$ 24,00    d) R\$ 26,00    e) R\$ 28,00

- 25.** (UECE-1995) Duas esferas metálicas isoladas, uma maciça e outra oca, estão eletrizadas. A afirmação correta é:

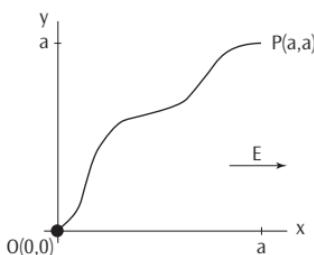
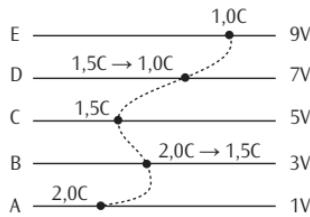
- a) Na esfera maciça a carga concentra-se no centro e, na oca, a carga distribui-se pela superfície interna.
- b) Na esfera oca a carga espalha-se pela superfície interna e, na maciça, pela superfície externa.
- c) Em ambos os casos as cargas espalham-se pelas superfícies externas das esferas.
- d) Na esfera maciça as cargas espalham-se por toda a esfera e, na oca, apenas na parte onde existe metal.
- 26.** (UFPE-2005) Considere duas cargas elétricas puntiformes de mesmo valor e sinais contrários, fixas no vácuo e afastadas pela distância  $d$ . Pode-se dizer que o módulo do campo elétrico  $E$  e o valor do potencial elétrico  $V$ , no ponto médio entre as cargas, são:
- a)  $E \neq 0$  e  $V \neq 0$
- b)  $E \neq 0$  e  $V = 0$
- c)  $E = 0$  e  $V = 0$
- d)  $E = 0$  e  $V \neq 0$
- e)  $E = 2V/d$
- 27.** (Mackenzie/2008) Na determinação do valor de uma carga elétrica puntiforme, observamos que, em um determinado ponto do campo elétrico por ela gerado, o potencial elétrico é de 18 kV e a intensidade do vetor campo elétrico é 9 kN/C. Se o meio é o vácuo ( $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ), o valor dessa carga é
- a)  $4 \mu\text{C}$
- b)  $3 \mu\text{C}$
- c)  $2 \mu\text{C}$
- d)  $1 \mu\text{C}$
- e)  $0,5 \mu\text{C}$
- 28.** (PUC-Rio 2008) Uma carga positiva puntiforme é liberada a partir do repouso em uma região do espaço onde o campo elétrico é uniforme e constante. Se a partícula se move na mesma direção e sentido do campo elétrico, a energia potencial eletrostática do sistema:
- a) Aumenta e a energia cinética da partícula aumenta.
- b) Diminui e a energia cinética da partícula diminui.
- c) E a energia cinética da partícula permanecem constantes.
- d) Aumenta e a energia cinética da partícula diminui.
- e) Diminui e a energia cinética da partícula aumenta.
- 29.** (UFU-2006) Na figura ao lado, são apresentadas cinco linhas equipotenciais, A-E, com os respectivos valores do potencial elétrico.

Inicialmente, um aglomerado de partículas com carga total igual a 2 C está sobre a equipotencial A. Esse aglomerado é deslocado para a equipotencial B. Em B o aglomerado sofre uma mudança estrutural e sua carga passa de 2 C para 1,5 C. Esse novo aglomerado de 1,5 C é deslocado para a equipotencial C e, em seguida, para D, conservando-se a carga de 1,5 C. Em D ocorre uma nova mudança estrutural e sua carga passa para 1 C. Por último, esse aglomerado de 1 C é deslocado para a equipotencial E.

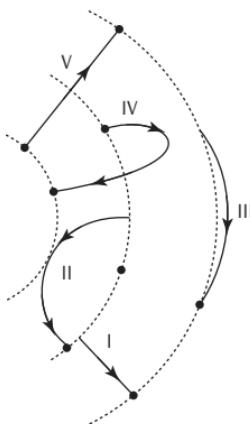
Considerando as afirmações apresentadas no enunciado anterior, assinale a alternativa que corresponde ao trabalho realizado sobre o aglomerado para deslocá-lo de A para E.

- a) 12 J      b) 16 J      c) 8 J      d) 10 J

30. (UFPI-2001) Uma partícula de carga  $q$ , positiva, se desloca do ponto O, de coordenadas  $(0,0)$  até o ponto P, de coordenadas  $(a,a)$ , seguindo a trajetória indicada na figura ao lado. Ao longo de toda a trajetória, há um campo elétrico uniforme,  $E$ , que aponta no sentido positivo do eixo x. O trabalho realizado pela força elétrica, devida ao campo, sobre a partícula, durante seu deslocamento é:
- Positivo e de módulo maior que  $qEa$ .
  - Nulo.
  - Negativo e de módulo maior que  $qEa$ .
  - Negativo e de módulo igual a  $qEa$ .
  - Positivo e de módulo igual a  $qEa$ .
31. (Unifesp-2006) Na figura a seguir, as linhas tracejadas representam superfícies equipotenciais de um campo elétrico; as linhas cheias I, II, III, IV e V representam cinco possíveis trajetórias de uma partícula de carga  $q$ ,



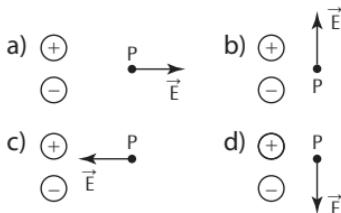
positiva, realizadas entre dois pontos dessas superfícies, por um agente externo que realiza trabalho mínimo.



A trajetória em que esse trabalho é maior, em módulo, é:

- a) I                    b) II                    c) III                    d) IV                    e) V

32. (UFMG) Um ponto P está situado à mesma distância de duas cargas, uma positiva e outra negativa, de mesmo módulo. A opção que representa corretamente a direção e o sentido do campo elétrico criado por essas cargas, no ponto P, é:



33. Num campo elétrico foram medidos os potenciais em dois pontos A e B e encontrou-se  $V_A = 12 \text{ V}$  e  $V_B = 5 \text{ V}$ .

- a) Qual o trabalho realizado por esse campo quando se transporta uma carga puntiforme de  $18\mu\text{C}$  de A para B?

- b) Sabe-se que nesse transporte não houve variação de energia cinética da partícula. Determine o trabalho do operador.
34. (FCM Santa Casa) Quando se aproximam duas partículas que se repelem, a energia potencial das duas partículas:
- Aumenta.
  - Diminui.
  - Fica constante.
  - Diminui e, em seguida, aumenta.
  - Aumenta e, em seguida, diminui.

### *Descomplicando a Física*

(Uberaba) O trabalho para deslocar uma carga elétrica sobre uma superfície equipotencial:

- Depende do valor da carga.
- É negativo.
- É positivo.
- Depende da distância que a carga tem que percorrer.
- É nulo.

Resposta correta: Alternativa E.

Superfícies equipotenciais são superfícies de um campo elétrico onde todos os pontos possuem o mesmo potencial. Portanto, o trabalho para deslocar uma carga de um ponto a outro dessa superfície é nulo.

$$\tau_{AB} = q \cdot (V_A - V_B)$$

$$V_A = V_B \quad \tau_{AB} = 0$$

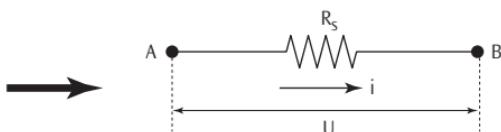
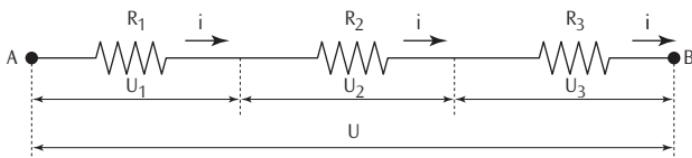
Vale ressaltar que as superfícies equipotenciais são perpendiculares às linhas de força em cada ponto do campo elétrico.

**Associação de resistores**

A associação de resistores pode ser feita colocando-os em série ou em paralelo.

Denomina-se resistor equivalente como sendo um resistor único que substitui todo um conjunto de resistores da associação sem que a tensão elétrica e a corrente elétrica sejam alteradas naquele trecho do circuito.

Diz-se que uma associação é em série quando todos os resistores são percorridos pela mesma corrente elétrica. Neste caso, o resistor equivalente ( $R_s$ ) pode ser calculado como sendo a soma de cada uma das resistências elétricas do circuito. Cada resistor da associação está sujeito a uma diferença de potencial elétrico, e a diferença de potencial da associação é dada pela soma de cada contribuição.



## Genericamente:

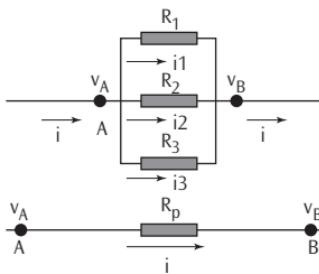
$$R_s = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$$i = i_1 = i_2 = \dots = i_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Numa associação em paralelo, todos os resistores estão sujeitos à mesma ddp.

O inverso da resistência equivalente ( $R_p$ ) é dado pela soma dos inversos de cada resistência. A corrente elétrica total é dada pela soma das correntes elétricas de cada ramal da associação.



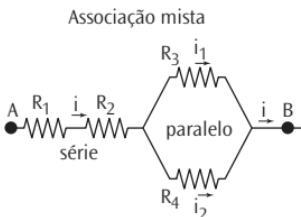
## Genericamente:

$$1/R_p = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n$$

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

Pode-se ainda combinar associações em série e paralelo. É o que se denomina associação mista.

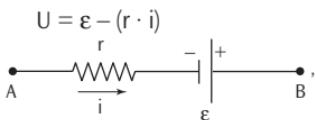


## Gerador elétrico

Um gerador elétrico tem como propriedade a capacidade de transformar energia não elétrica em energia elétrica e transferir essa energia para as cargas elétricas que o atravessam. A essa propriedade está relacionada a força eletromotriz do gerador ( $\epsilon$ ,  $\varepsilon$ ).

O gerador, quando em operação, consome parte da energia que é capaz de produzir, o que equivale dizer que ele possui uma resistência interna ( $r$ ).

A ddp ( $U$ ) que o gerador é capaz de fornecer, quando sujeito a uma corrente elétrica ( $i$ ), pode ser dada por:

$$U = \varepsilon - (r \cdot i)$$


que é a equação característica de um gerador.

Multiplicando-se a expressão pela intensidade de corrente elétrica  $i$ , temos:

$$U \cdot i = \varepsilon \cdot i - (r \cdot i) \cdot i$$

$$U \cdot i = \varepsilon \cdot i - r \cdot i^2$$

O primeiro termo define a potência útil do gerador:

$$P_{\text{útil}} = U \cdot i$$

O segundo termo representa a potência total do gerador:

$$P_{\text{total}} = \varepsilon \cdot i$$

E o terceiro termo representa a potência dissipada no gerador:

$$P_{\text{dissip.}} = r \cdot i^2$$

Dessa forma, temos:

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{total}} - P_{\text{dissip.}}$$

E o rendimento do gerador pode ser calculado por:

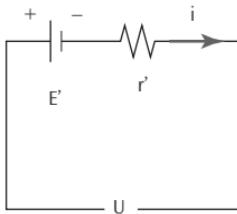
$$\eta = P_{\text{útil}} / P_{\text{total}}$$

## Receptor elétrico

Receptor elétrico é qualquer elemento que transforme energia elétrica em outra forma de energia que não seja térmica. A um receptor está relacionada uma força contraeletromotriz (fcem,  $\varepsilon'$ ).

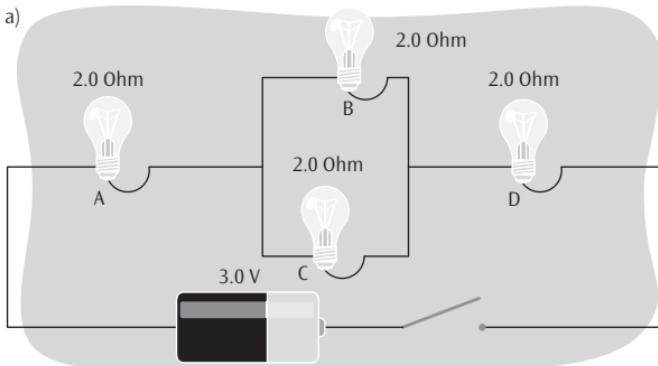
A equação característica de um receptor é:

$$U = \varepsilon' + (r' \cdot i)$$



## Círculo elétrico de corrente contínua

Um circuito elétrico consiste de uma malha fechada em que a corrente elétrica é capaz de fluir, com pelo menos dois elementos interligados: uma fonte ou gerador de energia, cuja função é produzir uma diferença de potencial elétrico, e um elemento que seja capaz de consumir ou capturar e transformar essa energia.



Círculo elétrico de associação mista, com quatro resistores (lâmpadas) e um gerador (pilha) de 3 V.

A figura acima ilustra um circuito elétrico simples constituído de um gerador de energia elétrica, uma chave e quatro lâmpadas, interligados por fios condutores. A chave tem a função de fechar e abrir o circuito, permitindo ou interrompendo a passagem da corrente elétrica. Quando a chave está fechada, a corrente elétrica flui pelo circuito em consequência da diferença de potencial estabelecida pela pilha, e as lâmpadas permanecem acesas. Ao se abrir a chave, interrompe-se a passagem de corrente elétrica e as lâmpadas se apagam.

A corrente elétrica a que está sujeito um circuito elétrico simples, pode ser calculada:

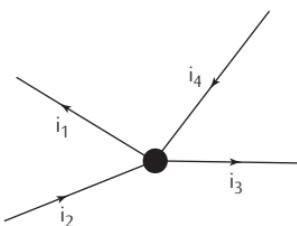
$$i = \frac{\sum \varepsilon - \sum \varepsilon'}{\sum (R_{eq} + r + r')}$$

Onde:  $R_{eq}$  representa a resistência equivalente, considerando a associação dos resistores do circuito.

Para situações mais complexas, recorre-se às leis de Kirchhoff:

### Primeira Lei:

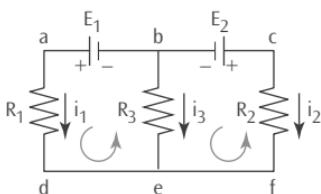
A soma algébrica das intensidades de correntes elétricas, em um nó, é nula.



$$i_2 + i_4 = i_1 + i_3$$

### Segunda Lei:

A soma algébrica das variações de potencial elétrico, em uma malha, é nula.



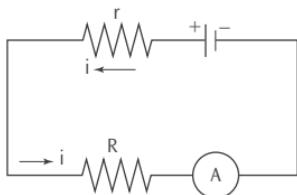
Nas setas em cinza, vemos o sentido da corrente em cada ramo do circuito.

## Instrumentos elétricos de medida

### Amperímetro

Para se medir a intensidade de corrente elétrica em um trecho de circuito, deve-se usar um amperímetro. O amperímetro deve ser colocado em série com a resistência ou o trecho de circuito que se queira medir a corrente e, dessa forma, toda corrente que passa

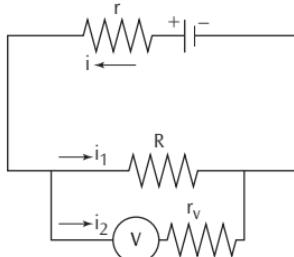
nesse trecho de circuito passará através do aparelho. Por conta disso, o amperímetro possui uma resistência interna, que deve ser a menor possível a fim de não se alterarem as características do circuito.



## Voltímetro

Para se medir a diferença de potencial de elemento ou trecho de circuito, deve se usar um voltímetro. O voltímetro é colocado em paralelo com o trecho de circuito que se quer determinar a diferença de potencial. Do mesmo modo que o amperímetro, o voltímetro também possui uma resistência interna.

Neste caso, deseja-se que a resistência interna seja a maior possível, uma vez que sendo colocado em paralelo, o aparelho constituirá um ramal a mais no circuito, devendo, portanto, desviar a menor corrente elétrica possível.



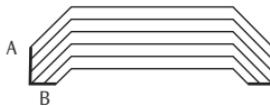
## TESTE SEU SABER

1. (Unicamp-SP) Um ebulidor elétrico pode funcionar com um ou com dois resistores idênticos de mesma resistência  $R$ . Ao funcionar apenas com um resistor, certa quantidade de água entra em ebulição em  $t$  minutos.

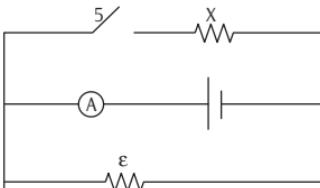
Em quanto tempo entrará em ebulação um volume igual de água se o aquecedor funcionar com os dois resistores ligados:

- a) Em paralelo?
- b) Em série?

2. (Vunesp-SP) Alguns automóveis modernos são equipados com um vidro térmico traseiro para eliminar o embaçamento em dias úmidos. Para isso conectam-se “tiras resistivas” instaladas na face interna do vidro ao sistema elétrico de modo que se possa transformar energia elétrica em energia térmica. Num dos veículos fabricados no país, por exemplo, as tiras (resistores) são arranjadas conforme mostra a figura acima. Se a resistência de cada uma das 6 tiras for igual a  $R$ , calcule a resistência equivalente. Considere que A e B são os terminais que vão para o sistema elétrico do veículo.



3. Dispõe-se de quatro resistores cujos valores são  $100\ \Omega$ ,  $200\ \Omega$ ,  $300\ \Omega$  e  $400\ \Omega$ . Qual é o valor do resistor equivalente quando esses resistores:
- a) Estão associados em série?
  - b) Estão associados em paralelo?
4. A fem de uma pilha é  $12V$ . Sendo a resistência elétrica da pilha de  $0,1\ \Omega$  e a corrente que a atravessa  $6\ A$ , determinar:
- a) O rendimento da pilha.
  - b) A potência dissipada na pilha.
  - c) A potência fornecida ao circuito externo.
5. O circuito esquematizado ao lado é constituído de um resistor igual a  $4\ R$ , um resistor de valor desconhecido  $X$ , de um amperímetro A, de uma fonte  $\varepsilon = 120\ V$  e de uma chave S que está aberta. Neste caso, a corrente medida no amperímetro vale  $3\ A$ . Quando a



- chave S está fechada, a corrente no amperímetro vale 8 A. Ache o valor da resistência X.
6. Um motor elétrico é percorrido por uma corrente de 5 A, e o seu rendimento é de 80%. Sabendo que ele está ligado a uma tomada de 200V, determine:  
a) A fem do motor.  
b) A sua resistência interna.  
c) As potências recebidas, útil e dissipada.
7. Qual o valor da corrente de curto-círcuito para um gerador, cuja fem é de 12V e a resistência interna é de 0,40 ohms?
8. Um gerador de fem igual a 10 V, quando percorrido por uma corrente de 2 A, possui entre seus terminais uma corrente de 9 V. Qual a sua resistência interna?
9. Dispõe-se de uma bateria de fem igual a 6 V e resistência interna igual a 1 ohm e de uma lâmpada cujos valores nominais são 6V e 12 W.  
a) Qual a máxima corrente que pode atravessar essa bateria?  
b) Com essa bateria, é possível fazer a lâmpada brilhar de acordo com os valores nominais? Justifique.
10. A bateria de um carro, cuja fem é de 12 V, aciona um rádio de 12 V, que necessita de 2 A para seu funcionamento, e mantém acesas duas lâmpadas de farol, de 12V e 48 W cada uma. Qual a intensidade da corrente elétrica fornecida pela bateria, para alimentar o rádio e as duas lâmpadas?
11. Utilizando um amperímetro e um voltímetro para medir a potência elétrica absorvida por um resistor, deve-se colocar:  
a) O amperímetro e o voltímetro em série com o resistor.  
b) O amperímetro e o voltímetro em paralelo com o resistor.  
c) O amperímetro em série e o voltímetro em paralelo com o resistor.  
d) O amperímetro em paralelo e o voltímetro em série com o resistor.  
e) O amperímetro antes e o voltímetro depois do resistor; essa colocação depende do sentido da corrente elétrica.
12. Um gerador possui uma fem de 10V. Quando os terminais do gerador estão conectados por um condutor com resistência desprezível, a intensi-

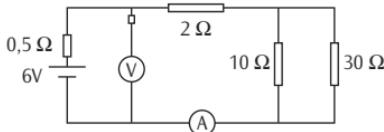
dade de corrente elétrica no resistor é 2 A. Com base nessas informações, analise as seguintes afirmativas:

- I - Quando uma lâmpada for ligada aos terminais do gerador, a intensidade de corrente elétrica será 2 A.  
II - A resistência interna do gerador é de 5 ohms.  
III- Se os terminais do gerador forem ligados por uma resistência elétrica de 2 ohms, a diferença de potencial elétrico entre eles será menor que 10 V.

Estão corretas:

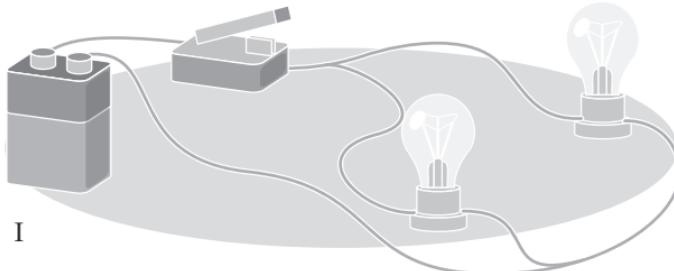
- a) Apenas I.
- b) Apenas II.
- c) Apenas I e II.
- d) Apenas II e III.
- e) I, II e III.

13. Uma pilha tem fem de 2V e uma resistência interna de  $1\Omega$ . Se com essa pilha alimentarmos uma resistência de  $4\Omega$ , teremos:
- a) Uma tensão de  $1,6V$  entre os terminais da pilha.
  - b) Uma tensão de  $2V$  entre os terminais da pilha.
  - c) Uma tensão de  $0,4V$  entre os terminais da pilha.
  - d) Uma corrente de  $0,5A$  na resistência externa.
  - e) Impossível de ser calculado.
14. Numa pilha a fem é de  $3,6V$ . Associando a essa pilha um resistor de  $9\Omega$ , observa-se uma ddp de  $2,7V$ . Calcule a resistência interna da pilha.
15. (Fuvest-SP) Um circuito doméstico simples está esquematizado ao lado. Considerando os dados apresentados na figura do problema, determine as leituras do amperímetro e do voltímetro mostrados.
16. (Fuvest) Um chuveiro elétrico, ligado em média uma hora por dia, gasta R\$ 10,80 de energia elétrica por mês. Se a tarifa cobrada é de R\$ 0,12 por quilowatt-hora, então a potência desse aparelho elétrico é:



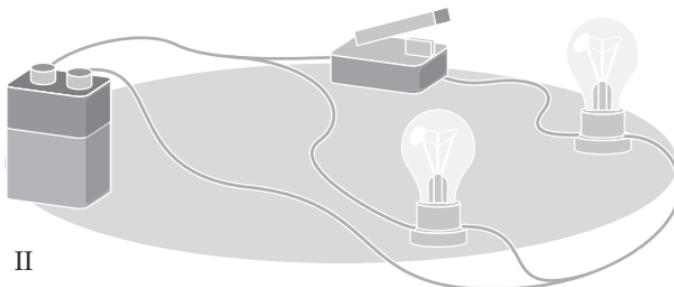
- a) 90 W.
  - b) 360 W.
  - c) 2700 W.
  - d) 3000 W.
  - e) 10800 W.
- 17.** (UEPR) Um gerador funcionará em regime de potência útil máxima, quando sua resistência interna for igual:
- a) À resistência equivalente do circuito que ele alimenta.
  - b) À metade da resistência equivalente do circuito que ele alimenta.
  - c) Ao dobro da resistência equivalente do circuito que ele alimenta.
  - d) Ao quádruplo da resistência equivalente do circuito que ele alimenta.
  - e) À quarta parte da resistência equivalente do circuito que ele alimenta.
- 18.** (Fatec-SP) Um chuveiro elétrico tem um seletor que lhe permite fornecer duas potências distintas: na posição “verão” o chuveiro fornece 2700 W, na posição “inverno” fornece 4800 W. José, o dono deste chuveiro, usa-o diariamente na posição “inverno”, durante 20 minutos. Surpreendido com o alto valor de sua conta de luz, José resolve usar o chuveiro com o seletor sempre na posição “verão”, pelos mesmos 20 minutos diários. Supondo-se que o preço do quilowatt-hora seja de R\$ 0,20, isto representará uma economia diária de:
- a) 0,14
  - b) 0,20
  - c) 1,40
  - d) 2
  - e) 20
- 19.** (UE-Maringá) Uma lâmpada tem indicado 60 W - 120V. Sendo percorrida por uma corrente de intensidade 500 mA, pode-se afirmar que:
- a) Seu brilho será menor que o normal.
  - b) Seu brilho será maior que o normal.
  - c) Seu brilho será normal.
  - d) Não suportará o excesso de corrente.
  - e) Não há dados suficientes para fazer qualquer afirmação.
- 20.** (Epusp) Um motor, atravessado por corrente  $i = 10\text{ A}$ , transforma a potência elétrica  $P = 80\text{ W}$  em potência mecânica. A força contraeletromotriz do motor:
- a) Depende da resistência interna do motor.
  - b) É 8 V.
  - c) Depende do rendimento do motor.

- d) Depende da rotação do motor.  
e) NDA
21. (Ufmg-1995) Estes circuitos representam uma pilha ligada a duas lâmpadas e uma chave interruptora.

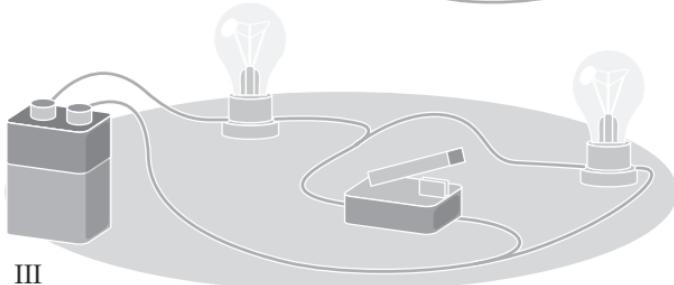


I

Eduardo Borges



II



III

A alternativa que apresenta o(s) circuito(s) em que a ação da chave apaga ou acende as duas lâmpadas, simultaneamente, é:

- a) I              b) II              c) III              d) I e II              e) I e III

22. (PUC-MG 2003) Leia atentamente as afirmativas abaixo.

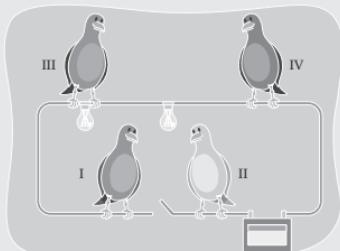
- Para se medir a queda de potencial em um resistor, deve-se colocar o amperímetro em paralelo com o resistor.
- Para se medir a corrente através de um resistor, deve-se colocar o voltímetro em paralelo com o resistor.
- Para se medir a corrente através de um resistor, deve-se colocar o amperímetro em série com o resistor.

Assinale:

- Se apenas a afirmativa I é correta.
- Se apenas a afirmativa II é correta.
- Se apenas a afirmativa III é correta.
- Se as afirmativas I e III são corretas.

## Descomplicando a Física

(Uerj) A figura abaixo mostra quatro passarinhos pousados em um circuito no qual uma bateria de automóvel alimenta duas lâmpadas. Ao ligar-se a chave S, o passarinho que pode receber um choque elétrico é o de número:



Eduardo Borges

- I
- II
- III
- IV

Resposta correta: Alternativa C.

### Resolução

Para receber o choque elétrico, deve haver uma diferença de potencial entre os pés do pássaro. O passarinho que pode receber o choque é o número III, porque entre seus pés há uma lâmpada, um elemento resistivo que cria uma diferença de potencial.

A palavra *magnetismo* tem origem na Grécia antiga, porque foi em Magnésia, antiga cidade grega, que se observou um minério com propriedade de atrair objetos de ferro. Por conta disso, o minério, basicamente um óxido de ferro, ficou conhecido pelo nome de magnetita. Os fenômenos magnéticos, no entanto, são conhecidos desde a Antiguidade.

Os antigos chineses já utilizavam pedras com propriedade magnética, para se orientarem em viagens. Assim, surgiram os precursores das primeiras bússolas, dispositivo provido de propriedade magnética cuja essência reside no fato de uma de suas pontas apontar sempre para o norte da Terra.

Os materiais que apresentam propriedade magnética são denominados ímãs. Existem ímãs naturais e ímãs artificiais.

Hoje, a eletricidade e o magnetismo são tomados como dois aspectos de um mesmo fenômeno, o eletromagnetismo. Uma diferença importante, entre eles, consiste no fato de que no magnetismo não existe um conceito análogo ao de carga elétrica, embora o conceito de polo magnético possa ser entendido como tendo propriedades semelhantes às da carga elétrica.

Os ímãs apresentam duas regiões distintas, denominadas: polo norte e polo sul. Observe que o polo norte e o polo sul possuem natureza oposta. Quando dois ímãs são aproximados um do outro



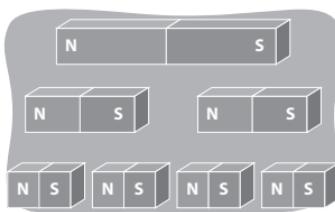
Haveseen/PhotoXpress

por polos de naturezas opostas, um pelo polo norte e outro pelo polo sul, surge uma força de atração entre eles. Quando aproximados por polos de mesma natureza, a interação é de repulsão.

Polos de mesma natureza se repelem e polos de naturezas contrárias se atraem.

## Propriedade de inseparabilidade dos polos

Não há polos magnéticos isolados, nem tampouco partículas portadoras de polos magnéticos. Caso um ímã seja dividido em **n** pedaços, de cada pedaço será obtido um novo ímã, também com polos norte e sul.



Eduardo Borges

Saiba



### O eletroímã

Há materiais que possibilitam a imantação quando submetidos a campos magnéticos. Essa propriedade é utilizada na construção de dispositivos chamados eletróimãs.

Os eletróimãs possuem um núcleo, normalmente de ferro maciço, envolto em um dispositivo composto por um fio condutor, enrolado a esse núcleo em espiras não justapostas – um solenoide. Quando o dispositivo é percorrido por uma corrente elétrica, origina-se um campo magnético em seu interior que imanta o núcleo. Assim, o núcleo passa a se comportar como um ímã artificial intermitente: com a passagem da corrente elétrica, ele é imantado; cessando a passagem da corrente elétrica, ele deixa de ser imantado.

Os eletróimãs possuem inúmeras aplicações práticas, desde a seleção e o transporte de sucatas, até componentes de campainhas, relés etc.

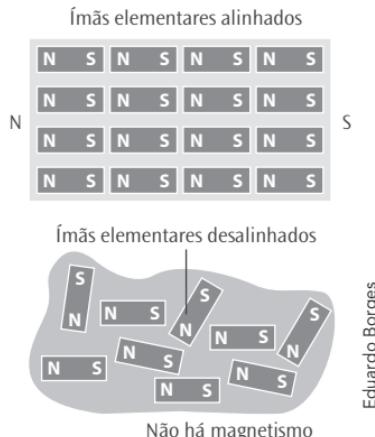
## Natureza da propriedade magnética

Microscopicamente, materiais magnéticos, mais exatamente ferromagnéticos, possuem microrregiões denominadas domínios magnéticos, que contêm grande quantidade de pequenos ímãs, denominados ímãs elementares, todos com a mesma orientação, direção e sentido, resultando num somatório de campos individuais. A explicação para o aparecimento desse domínio é atribuída ao *spin* eletrônico.

Na primeira figura, vemos a representação de uma situação em que os ímãs elementares estão alinhados, resultando num corpo magnético. Na figura de baixo, não há magnetismo porque as contribuições dos ímãs elementares não se somam.

Quando os materiais ferromagnéticos não estão imantados, a orientação dos domínios é aleatória e o efeito global é nulo. Quando essa orientação é semelhante, têm-se um efeito global significativo que traduz a intensidade do campo magnético gerado pelo ímã.

Há, ainda, materiais como madeira e plástico, que não são magnéticos.

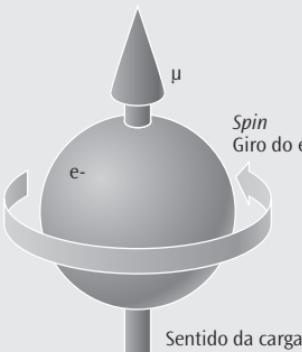


Eduardo Borges



## SPIN ELETRÔNICO

Spin é uma propriedade relacionada ao campo magnético gerado em função do movimento de rotação de partículas carregadas eletricamente. Dois elétrons, com movimentos de rotação opostos, geram campos magnéticos opostos, possibilitando, assim, que esses mesmos elétrons estejam num mesmo orbital eletrônico. Dizemos que esses elétrons possuem *spins* opostos ou antiparalelos.



Eduardo Borges

Essa interpretação de *spin*, no entanto, não é satisfatória por não contemplar todos os casos. Em mecânica quântica, *spin* é uma propriedade das partículas que está relacionada ao momento angular intrínseco da partícula em questão e às diferentes orientações deste no espaço.

*Spin* é um fenômeno estritamente quântico, não possui interpretação clássica.



## Diferentes formas de magnetismo

Material ferromagnético é o que se denomina normalmente material magnético. Submetidos a um campo magnético externo, esses corpos também se transformam em ímãs. Em verdade, quando colocados sob a ação de um campo magnético, alteram a disposição das linhas de campo, concentrando-as em sua vizinhança. Exemplo: ferro, níquel, cobalto e ligas que os contêm.

Material paramagnético também é atraído por ímãs, porém mais fracamente. Tal como no material ferromagnético, promove o mesmo

Continua...

tipo de alteração das linhas de força, porém menos intensa. Exemplo: paládio, platina, sódio e algumas ligas de ferro.

Material diamagnético consiste em material que é repelido por ímãs, qualquer que seja o polo pelo qual é aproximado. Ao contrário dos casos anteriores, esse tipo de material promove um leve afastamento das linhas de força. Exemplo: prata e bismuto.

## Campo magnético

Do mesmo modo que um corpo eletrizado ocasiona um campo elétrico, o ímã promove em suas vizinhanças um campo magnético ao qual está associado um vetor campo magnético  $\vec{B}$ . Esse vetor é denominado vetor *indução magnética*.

A definição do vetor indução magnética se baseia na interação entre o campo magnético e uma partícula portadora de carga elétrica ( $q$ ) em movimento.

O módulo do vetor indução magnética pode ser calculado, usando a fórmula:

$$B = \frac{F}{q \cdot v \cdot \sin \theta}$$

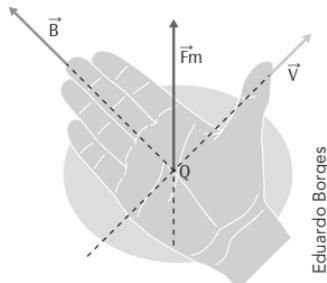
Onde:  $v$  é a velocidade da partícula; e

$F$  é a força que atua sobre a partícula, perpendicular à velocidade  $\theta$ , é o ângulo entre o vetor indução magnética e a velocidade da partícula.

Esta expressão pode ser reescrita:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$$

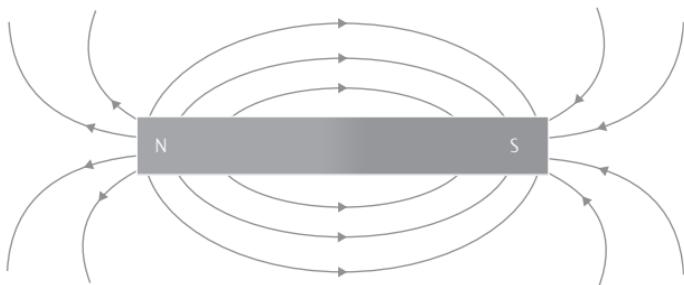
No SI, a unidade da intensidade do vetor indução magnética é o



tesla (T). A direção e o sentido do vetor  $B$  podem ser dadas pela regra da mão direita.

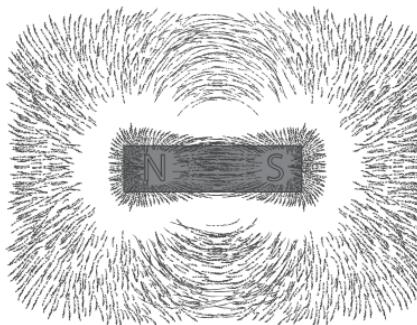
As linhas de campo magnético em um ímã apresentam-se conforme a figura abaixo.

Observe que as linhas de campo têm origem no polo norte de um ímã e terminam no polo sul (do mesmo ou de outro ímã).



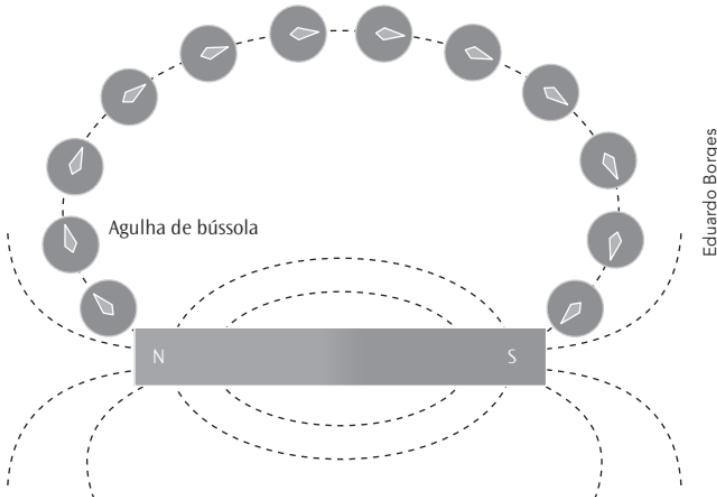
Eduardo Borges

Essa configuração pode ser facilmente comprovada colocando-se uma folha de papel sobre um ímã e jogando-se pequenas limalhas de ferro sobre aquela.



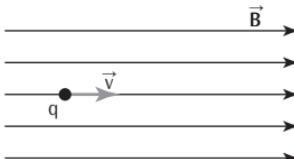
Eduardo Borges

O polo norte de uma agulha magnética colocada em um ponto de um campo magnético indica o sentido do vetor  $B$  no ponto. Sua direção é tangente à linha de campo.



Semelhantemente a um campo elétrico uniforme, um campo magnético é uniforme quando o vetor campo magnético é constante (em intensidade, direção e sentido) em todos os pontos do campo. Suas linhas de campo são paralelas e igualmente espaçadas.

Uma carga elétrica  $q$ , quando em um campo magnético, adquire velocidade  $\vec{v}$ , provando a existência do campo.



Campo magnético uniforme

Da expressão  $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$ , temos que:

1. Para ângulos de  $0^\circ$  ou  $180^\circ$  entre o campo magnético e a velocidade da partícula, a força magnética é nula, isto é, a carga não sofre a ação da força magnética.
2. Se a carga penetra o campo magnético segundo um ângulo de  $90^\circ$ , a força magnética assume intensidade máxima e a carga realizará um movimento circular uniforme. A força magnética assume o valor da força centrípeta, e temos:

$$F_{\text{mag}} = F_{\text{centrip}}$$

$$qvB = mv^2/R$$

$$R = (m \cdot v) / (q \cdot B)$$

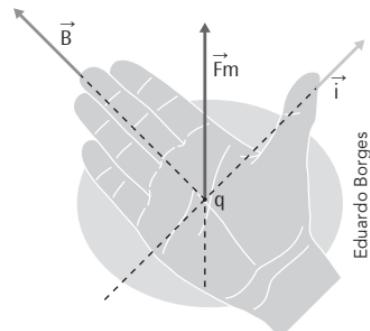
3. A carga é lançada obliquamente ao campo magnético, resultando em um movimento helicoidal.

## Força sobre condutores elétricos

Um condutor elétrico retilíneo, de comprimento  $L$  sujeito a uma corrente elétrica  $i$ , quando imerso em um campo magnético uniforme de módulo  $B$ , está sujeito a uma força cujo valor pode ser expresso:

$$F = i \cdot L \cdot B \cdot \sin \theta,$$

onde: a força  $F$  é perpendicular ao campo magnético e  $\theta$  é o ângulo entre o campo magnético e a direção do condutor. O sentido da força pode ser dado pela regra da mão direita.



## Campo magnético e corrente elétrica

Cargas elétricas em movimento criam campos magnéticos.

Um condutor, quando percorrido por uma corrente elétrica ( $i$ ), faz surgir no seu entorno, a uma distância  $r$ , um campo magnético cujo módulo pode ser dado pela lei de Ampère:

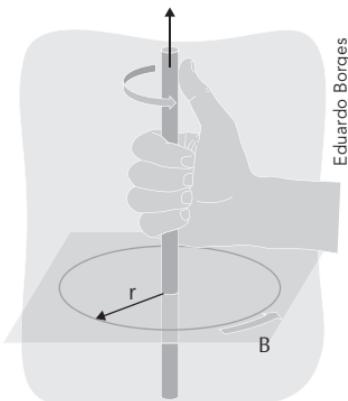
$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi r},$$

onde:  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio. Para o vácuo, o valor de  $\mu$  é igual a  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ .

### Exemplo

Um condutor reto e extenso, no vácuo, é percorrido por uma corrente de 5 A. Calcule o valor da intensidade do vetor indução magnética em um ponto P que dista 20 cm do condutor.

Observe o sentido do vetor indução magnética em torno do fio.



### Resolução

O módulo do vetor pode ser calculado:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5}{2\pi \cdot 0,2}$$

$$B = 5 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

Para um condutor circular, uma espira de raio  $R$ , o campo magnético no centro da espira se relaciona com a corrente elétrica por meio da expressão:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2R}$$

## Espiras e solenoides

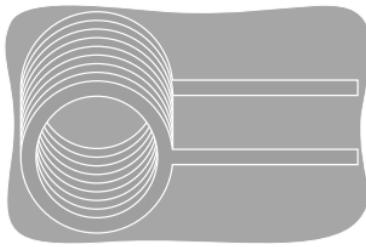
Um conjunto de espiras enroladas lado a lado pode formar um solenoide ou uma bobina chata. Se o enrolamento for helicoidal, tem-se um solenoide. Se as espiras forem justapostas de modo a termos um enrolamento de comprimento desprezível, temos uma bobina chata.

Para um solenoide de comprimento  $L$  e  $n$  espiras, o campo pode ser expresso por:

$$B = \frac{n \cdot \mu \cdot i}{L}$$

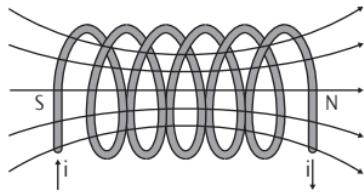
e para a bobina chata,

$$B = \frac{n \cdot \mu \cdot i}{2R}$$



Eduardo Borges

Bobina chata



Eduardo Borges

Solenóide



## Vento solar e o campo magnético da Terra

O Sol está sujeito a erupções, criando labaredas de fogo em sua superfície que podem chegar a centenas de milhares de quilômetros de extensão. Essas erupções produzem ventos solares cuja temperatura atinge 8000 °C e velocidade de até 750 km/s. Os ventos solares atingem a Terra, promovendo, inclusive, perturbações nas telecomunicações.

O campo magnético da Terra opera como um escudo de proteção do planeta, tendo em vista que ele deflete (desvia, muda a direção) a maior parte dos ventos solares.

Outras consequências interessantes dessa interação são as auroras boreais (no hemisfério norte) e austrais (no hemisfério sul). As auroras decorrem da interação dos ventos solares com o campo magnético da Terra, sendo localizados nos polos, uma vez que o campo magnético nessas regiões é mais intenso, combinado com o fato de que o campo magnético da Terra canaliza as partículas para essas regiões.

O fenômeno não é exclusivo somente à Terra, sendo também observável em outros planetas do sistema solar como Júpiter, Saturno, Marte e Vênus.



NASA



Joshua Strang/U.S. Air Force

---

## TESTE SEU SABER

---

1. Um fio condutor reto, de comprimento infinito, é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 30 A e imerso no vácuo. Determine a intensidade do vetor indução magnética num ponto situado a 40 cm do fio.
2. Uma bobina chata é formada de 40 espiras circulares de 8 cm de raio. Qual a intensidade da corrente que percorre a bobina, quando a intensidade do campo magnético em seu centro é de  $6 \times 10^{-4}$  T? Considere que a bobina está imersa no vácuo.
3. Uma partícula de carga  $-5 \text{ mC}$  desloca-se no vácuo com velocidade 100 m/s, formando um ângulo de  $30^\circ$  com um campo de indução magnética uniforme de intensidade 4000 T. Calcule o módulo da força magnética que age sobre a carga.
4. Um solenoide de 15000 espiras por metro é percorrido por uma corrente de 10 A. Determine o módulo da indução magnética em seu interior. Considere que o solenoide está imerso no vácuo.
5. Se um ímã se quebra, o que acontece com os pedaços? Você pode reuni-lo como estava antes? Justifique.
6. Um aluno estava usando uma bússola para orientar-se no interior da sala de laboratório. Num certo momento, a agulha mudou repentinamente de posição. Como se explicaria esse movimento da agulha?
7. São dadas três barras de metal aparentemente idênticas: AB, CD e EF. Sabe-se que podem ser ou não imantadas, formando, então, imãs retos. Verifica-se que:  
I - A extremidade A atrai as extremidades C e D.  
II - A extremidade B atrai as extremidades C e D.  
III - A extremidade A atrai a extremidade E e repele F.  
Pode-se concluir que a:  
a) Extremidade F atrai a extremidade C e repele a extremidade D.  
b) Barra AB não está imantada.  
c) Barra CD está imantada.  
d) Extremidade E repele as extremidades A e B.  
e) Extremidade E atrai as extremidades C e D.

8. O campo magnético da Terra é produzido em função de um efeito de dinâmo, isto é, o interior da Terra é composto de material metálico fluido (como um “líquido” metálico condutor elétrico) em rotação. Essa combinação de fluido condutor com o movimento de rotação da Terra se constitui no conjunto de ingredientes básicos para a geração de um campo magnético. A Lua gira bem mais devagar, sendo pobre em metais e não possui um interior metálico fluido. Os astronautas, ao chegarem à Lua, para se deslocarem na superfície de nosso satélite, poderiam se orientar usando uma bússola magnética, como se faz aqui na Terra? Explique.
9. (UFERS) Analise cada uma das afirmações e indique se é verdadeira (V) ou falsa (F).
- ( ) Nas regiões próximas aos polos de um imã permanente, a concentração de linhas de indução é maior que em outra região ao seu redor.
  - ( ) Qualquer pedaço de metal colocado nas proximidades de um imã permanente torna-se magnetizado e passa a ser atraído por ele.
  - ( ) Tomando-se um imã permanente em forma de barra e partindo-o ao meio em seu comprimento, obtém-se dois polos magnéticos isolados, um polo norte em uma das metades e um polo sul na outra.

Quais são, pela ordem, as indicações corretas?

- a) V, F e F
- b) V, F e V
- c) V, V e F
- d) F, F e V
- e) F, V e V

10. (PUC-SP) Três barras, PQ, RS e TU, são aparentemente idênticas.

P                    Q

R                    S

T                    U

Verifica-se experimentalmente que P atrai S e repele T; Q repele U e atrai S. Então, é possível concluir que:

- a) PQ e TU são ímãs.
- b) PQ e RS são ímãs.
- c) RS e TU são ímãs.
- d) As três são ímãs.
- e) Somente PQ é ímã.

11. (UFPA) A Terra é considerada um imã gigantesco, que tem as seguintes características:
- a) O polo Norte geográfico está exatamente sobre o polo sul magnético, e o Sul geográfico está na mesma posição que o norte magnético.

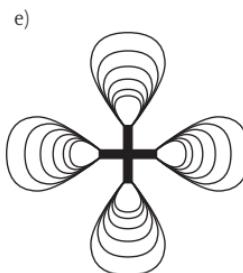
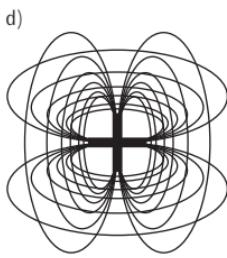
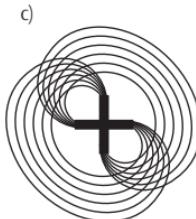
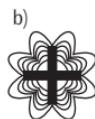
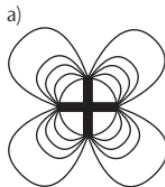
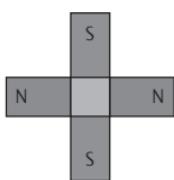
- b) O polo Norte geográfico está exatamente sobre o polo norte magnético, e o Sul geográfico está na mesma posição que o sul magnético.
- c) O polo norte magnético está próximo do polo Sul geográfico, e o polo sul magnético está próximo do polo Norte geográfico.
- d) O polo norte magnético está próximo do polo Norte geográfico, e o polo sul magnético está próximo do polo Sul geográfico.
- e) O polo Norte geográfico está defasado de um ângulo de  $45^\circ$  do polo sul magnético, e o polo Sul geográfico está defasado de  $45^\circ$  do polo norte magnético.
- 12.** (Mackenzie-SP) As linhas de indução de um campo magnético são:
- a) O lugar geométrico dos pontos, onde a intensidade do campo magnético é constante.
  - b) As trajetórias descritas por cargas elétricas num campo magnético.
  - c) Aquelas que em cada ponto tangenciam o vetor indução magnética, orientadas no seu sentido.
  - d) Aquelas que partem do polo norte de um ímã e vão até o infinito.
  - e) Nenhuma das anteriores é correta.
- 13.** (UFMG-MG) Fazendo uma experiência com dois ímãs em forma de barra, Júlia colocou-os sob uma folha de papel e espalhou limalhas de ferro sobre essa folha. Ela colocou os ímãs em duas diferentes orientações e obteve os resultados mostrados nas figuras I e II:



Eduardo Borges

Nessas figuras, os ímãs estão representados pelos retângulos. Com base nessas informações, é CORRETO afirmar que as extremidades dos ímãs voltadas para a região entre eles correspondem aos polos:

- a) Norte e norte na figura I e sul e norte na figura II.
  - b) Norte e norte na figura I e sul e sul na figura II.
  - c) Norte e sul na figura I e sul e norte na figura II.
  - d) Norte e sul na figura I e sul e sul na figura II.
- 14.** (Fuvest-SP 2009) Um objeto de ferro, de pequena espessura e em forma de cruz, está magnetizado e apresenta dois polos Norte (N) e dois polos Sul (S). Quando esse objeto é colocado horizontalmente sobre uma mesa plana, as linhas que melhor representam, no plano da mesa, o campo magnético por ele criado, são as indicadas em:



Eduardo Borges

## Descomplicando a Física

(Santa Casa) Uma partícula com carga elétrica  $q$ , não nula, e massa  $M$ , penetra numa região  $R$  onde existe um campo magnético uniforme, no qual foi feito o vácuo. A carga penetra na região  $R$  numa direção perpendicular ao campo magnético. Nestas condições, e não havendo outras interações com a partícula, considere as seguintes afirmações relacionadas com a partícula em  $R$ :

- I. O movimento da partícula é retilíneo e uniforme.
- II. O movimento da partícula é circular, e sua velocidade aumenta com o tempo.
- III. A partícula está constantemente sob a ação de uma força perpendicular à direção do seu movimento.

Qual(ais) desta(s) afirmativa(s) é(são) correta(s)?

- a) Somente I.
- b) Somente II.
- c) Somente III.
- d) I e II.
- e) II e III.

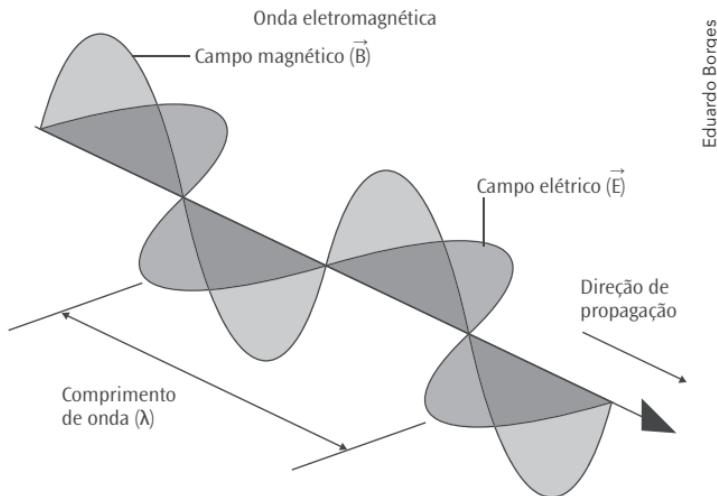
Resposta correta: Alternativa C.

Quando uma partícula carregada eletricamente penetra perpendicularmente a um campo magnético, ela passa a descrever um movimento circular e uniforme, ou seja, a velocidade possui módulo constante. A partícula, por descrever um movimento circular, está sujeita à força magnética que atua como força centrípeta.

29

# Ondas eletromagnéticas

Quando uma carga elétrica se desloca no espaço, ocorre a formação de um campo elétrico e de um campo magnético, perpendiculares entre si.



Uma onda eletromagnética não depende de meio material para propagar-se, podendo se propagar no vácuo. A velocidade (c) de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo pode ser expressa a partir de uma equação de Maxwell:

$$c = 1/(\mu_0 \cdot \epsilon_0)^{1/2}$$

Onde:  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  T.m/A);  
e

$\epsilon_0$  é a permissividade elétrica ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  C<sup>2</sup>/N.m<sup>2</sup>).

Substituindo-se esses valores na expressão, tem-se o valor da velocidade da luz no vácuo:  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s.

## *Permissividade elétrica*

A permissividade é uma constante física que traduz a dificuldade com que um campo elétrico se propaga através de um meio material. Quanto menor a permissividade, maior a facilidade de propagação do campo elétrico. O vácuo é o meio que apresenta maior velocidade de propagação do campo magnético, isto é, possui a menor permissividade possível.

## **Leis de Maxwell**

O físico escocês James Clerk Maxwell instituiu algumas leis básicas de eletromagnetismo, a partir de estudos já efetuados, tais como: a Lei de Ampère, a Lei de Faraday, a Lei de Gauss para o campo elétrico e para magnético.

A partir do acima exposto, constatamos que as ideias de Maxwell estão apoiadas em quatro leis:

1. Lei de Gauss para o campo elétrico: o fluxo do campo elétrico ( $\Phi_E$ ), através de uma superfície fechada no vácuo, é igual à soma das cargas internas à superfície ( $Q$ ) dividida pela permissividade elétrica do vácuo.

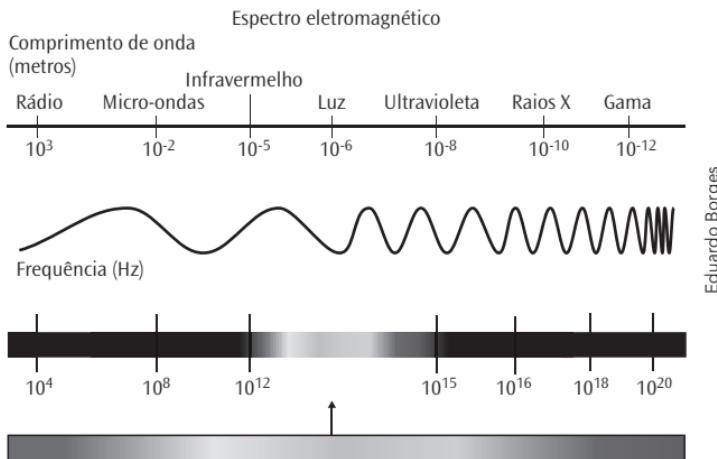
$$\Phi_E = Q/\epsilon_0$$

2. Lei de Gauss para o campo magnético: o fluxo do campo magnético, através de uma superfície fechada, é nulo, pois as linhas de origem de campo magnético não têm origem e nem fim.
3. Lei de Ampère generalizada: um campo magnético pode ser criado tanto por uma corrente elétrica como pela variação de fluxo de um campo elétrico.

4. Lei de Faraday: a variação de fluxo do campo magnético gera um campo elétrico ou uma força eletromotriz induzida.

$$\varepsilon = - \Delta \Phi_B / \Delta t$$

As várias ondas eletromagnéticas diferem entre si apenas pela frequência e pelo comprimento de onda. A gama de frequências das ondas eletromagnéticas é denominada espectro eletromagnético.



## Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto a uma radiação eletromagnética (como a luz) de frequência suficientemente alta, que depende do material. Ele pode ser observado quando a luz incide numa placa de metal arrancando elétrons da placa. Foi observado pela primeira vez por Heinrich Hertz em 1887.

No início do século XX, Phillip Lenard (1862-1947) estabeleceu a base do efeito fotoelétrico por meio de duas leis:

1. Para determinada frequência, o número de elétrons emitido pela placa metálica iluminada é proporcional à intensidade de luz incidente na placa.
2. A energia cinética dos elétrons emitidos pela placa é proporcional à frequência da radiação incidente, não dependendo da intensidade dessa radiação.

A teoria ondulatória não estabelece relação entre a frequência de uma onda e a energia que ela transporta. Este fato conflita com a segunda lei.

Coube a Albert Einstein, em 1905, a solução do problema. Segundo ele, a energia da luz não se distribui uniformemente pelo espaço, como deveria se esperar pela teoria ondulatória. Para Einstein, a luz se concentra em pequenos pacotes – os “quanta” de energia. Esses pacotes de energia estão relacionados com a frequência da radiação ( $f$ ):

$$E = h \cdot f,$$

onde  $h$  é a constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ), de caráter universal.

### Exemplo

Uma caneta *laser* tem potência de 3 mW e emite uma radiação cujo comprimento de onda é de 600 nm. Calcule a frequência dessa radiação e a energia dos fótons emitidos em elétron-volts ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ).

### Resolução

$$v = \lambda \cdot f$$

$$3 \cdot 10^8 = 600 \cdot 10^{-9} \cdot f$$

$$f = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

A energia pode, então, ser calculada:

$$E = h \cdot f$$

$$E = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 5 \cdot 10^{14}$$

$$E = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = \frac{3,3 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2 \text{ eV}$$

---

## TESTE SEU SABER

---

1. Um fio condutor está ligado a uma fonte de frequência 60 Hz e potência de 1000 W. Calcule:
  - a) A energia dos fótons que percorre o condutor em eV.
  - b) Considerando que a energia elétrica pode ser dada por  $E = P \cdot \Delta t$ , calcule o número de fótons que atravessam uma seção normal desse condutor por segundo.
2. Uma estação de rádio transmite na frequência de 89,1 MHz. Admitindo que a onda eletromagnética emitida se propaga no vácuo, determine:
  - a) O período dessa onda.
  - b) Seu comprimento de onda.
3. (ITA) Incide-se luz num material fotoelétrico e não se observa a emissão de elétrons. Para que ocorra a emissão de elétrons do mesmo material, basta que se aumente(m):
  - a) A intensidade de luz.
  - b) A frequência da luz.
  - c) O comprimento de onda da luz.
  - d) A intensidade e a frequência da luz.
  - e) A intensidade e o comprimento de onda da luz.

## *Descomplicando a Física*

Por que os relâmpagos podem ser ouvidos nos rádios? O que demora mais, o ruído do trovão ou o ruído do raio ouvido através do rádio?

### **Resolução**

Os relâmpagos constituem correntes elétricas momentâneas de alta intensidade, geradoras de ondas eletromagnéticas capazes de ser capturadas pelo rádio. Toda onda eletromagnética se propaga com a velocidade da luz. O ruído do trovão, por ser uma onda sonora, se propaga a cerca de 340 m/s no ar (dependendo da temperatura e da composição do ar), portanto, o ruído do trovão vai ser ouvido depois do ruído do raio, no rádio.

# 30

# Desenvolvimento tecnológico

## Alavancas

É imputado a Arquimedes (287-212 a.C.) o desenvolvimento da teoria sobre o funcionamento das alavancas, embora possa se admitir que o uso de um pedaço de madeira empregado para erguer um objeto já vinha sendo empregado há muito tempo. O mérito de Arquimedes foi sistematizar seu princípio de funcionamento.

## Relógio de pulso

Em 1707, John Floyer (1649-1734) inventou o relógio de pulso. Essa inovação foi desenvolvida com base no conhecimento anterior desenvolvido por Christiaan Huygens (1629-1695), com seu relógio de pêndulo, e por Robert Hooke (1631-1701), com a mola.



Demarco/Dreamstime

## Lâmpada incandescente

Em 21 de outubro de 1897, Thomas Edison conseguiu enviar uma corrente elétrica através de um filamento, dentro de um recipiente de vidro a vácuo. Para conseguir essa proeza, ele passou por inúmeras dificuldades, como, por exemplo, o fato



Zoran Vukmanov Simokov/Shutterstock

de em suas experiências iniciais o material condutor aquecer em demasia e “queimar” devido à presença do ar. Para resolver esses problemas, ele utilizou um filamento de carvão carbonizado em recipiente a vácuo.

## A origem da radioatividade

Marie Curie (1867-1934), incentivada por Henri Becquerel, iniciou os estudos das radiações, por ele descobertas, emitidas pelos sais de urânio. Juntamente com o seu marido, Pierre Curie, Marie começou, então, a estudar os materiais que produziam esta radiação, procurando novos elementos que, segundo a hipótese que os dois defendiam, deveriam existir em determinados minérios. Após vários anos de trabalho constante, pela concentração de várias classes de pechblenda (um minério de urânio), isolaram dois novos elementos químicos. O primeiro foi nomeado polônio, em referência a seu país nativo, e o outro rádio, devido à sua intensa radiação. Hoje em dia, muitos países utilizam-se dos princípios da radioatividade para produção de energia em usinas nucleares.

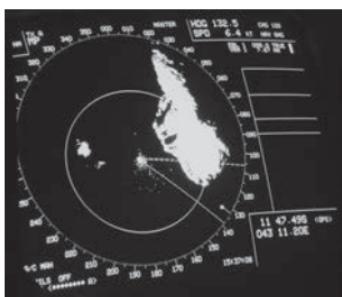


Rodrigo Soldon/Creative Commons

Visão da usina nuclear de Angra dos Reis

## Radar

O radar tem como princípio de funcionamento, a detecção de micro-ondas refletidas por um anteparo. Essa invenção foi idealizada por Robert Alexander Watson-Watt (1892-1973) em 1935. Em poucos anos, sua invenção viria a se tornar



James Stanley/SXC

de capital importância para os meios de transportes e estudos meteorológicos, sobretudo.

## Copiadora xerográfica

Em 1938, o físico e advogado, Chester Floyd Carlson (1906-1968), cansado de precisar fazer registros e cópias de documentos, inventou a copiadora xerográfica. Utilizava, para tanto, forças eletrostáticas capazes de atrair o negro de carvão para determinadas localidades sobre o papel.

## Lentes gravitacionais

Em 1916, em sua obra *Teoria da relatividade geral*, Albert Einstein (1879-1955), propôs a existência de um fenômeno conhecido como lentes gravitacionais. Em astrofísica, uma lente gravitacional se forma quando a luz proveniente de objetos distantes e brilhantes, como quasar, se curvam em função de uma distorção do espaço ocasionada por uma concentração de massa muito grande (como uma galáxia) situada entre o objeto emissor e o receptor.

## Origem da mecânica quântica

Em fins do século XVIII, uma das dificuldades da Física consistia na interpretação das leis que governam a emissão de radiação por parte dos corpos negros. Tais corpos são dotados de alto coeficiente de absorção de radiações; por isso, parecem negros para a vista humana. Este problema gerou uma revolução na Física, dando origem a um novo ramo dessa ciência, a mecânica quântica, tendo Max Planck (1858-1947) e Erwin Schrödinger (1887-1961) como grandes contribuintes nessa área do conhecimento.



Lars K. Christensen/PhotoXpress

Um grande sucesso da mecânica quântica em seu princípio foi a explicação da dualidade onda-partícula. Também chamada de teoria quântica, é um ramo da Física que lida com o comportamento da matéria e da energia na escala de átomos e partículas subatômicas, sendo fundamental ao entendimento de todas as forças fundamentais da natureza, exceto a gravidade.

A mecânica quântica é a base de diversos ramos da Física, incluindo eletromagnetismo, Física de partículas, Física da matéria condensada, e até mesmo partes da cosmologia. A mecânica quântica também é essencial para a teoria das ligações químicas, a biologia estrutural e as tecnologias como a eletrônica, tecnologia da informação e nanotecnologia. Um século de experimentos e trabalho na Física aplicada provou que a mecânica quântica está correta e tem utilidades práticas.

## Raios laser

A palavra *laser* é formada pelas iniciais de *light amplification by stimulated emission of radiation* (ampliação da luz pela emissão estimulada de radiação). Trata-se de um dispositivo que emite radiação eletromagnética caracteristicamente *monocromática*, *coerente* e *colimada*.

Radiação *monocromática* é toda e qualquer radiação que possui um comprimento de onda muito bem definido.

Um feixe de radiação é dito coerente quando todas as ondas dos fótons – partículas de luz – que constituem o feixe, estão em concordância de fase. Um átomo é capaz de absorver um fóton incidente e, após certo intervalo de tempo, reemite-o – emissão espontânea. Um átomo pode também reemitir o fóton absorvido se um segundo fóton interage com ele – emissão estimulada. Ambos os fótons, neste caso, possuem o mesmo comprimento de onda e a mesma fase.

Por fim, o termo *colimada* refere-se a um conjunto de ondas que são praticamente paralelas, e, portanto, não se espalham à

medida que se propagam. Com isso, percorrem grandes distâncias sem se dispersar.

A produção de raio *laser* ocorre segundo o mecanismo:

Excitação energética de um meio ativo pela passagem de corrente elétrica ou disparo de luz tipo *flash*. O meio ativo é normalmente gasoso: hélio, neônio, argônio etc.;

Volta ao estado normal por parte do meio ativo, no qual, após absorção de energia, átomos e moléculas emitem a energia antes absorvida;

Amplificação da energia emitida;

Emissão do feixe de *laser*.

Os raios *laser* podem concentrar enormes quantidades de energia em regiões extremamente pequenas devido ao fato de serem compactos. Eles são capazes de efetuar cortes e furos em diversos materiais com grande precisão, sem afetar consideravelmente as regiões vizinhas à operação. O raio *laser* é usado eficientemente em um grande número de operações nas áreas médicas, de telecomunicações, medição e instrumentação, indústria de materiais leves e pesados etc. É usado ainda na gravação e na reprodução de CDs e DVDs.

Os estudos e pesquisas na área de radiação a *laser* estão em contínua expansão e ainda podem trazer grandes progressos em várias aplicações.

## **Os relâmpagos e os para-raios**

O relâmpago é a descarga de eletricidade estática entre duas nuvens ou entre uma nuvem e o solo. O relâmpago ocorre quando uma grande carga forma-se na nuvem e aquece o ar tão rapidamente que ele se expande subitamente, provocando o trovão.

Para proteção contra essas descargas elétricas, utiliza-se um dispositivo denominado para-raios.

O para-raios consiste em uma peça metálica, pontiaguda, montada sobre uma estrutura que tem a capacidade de atrair as descargas elétricas de nuvens eletrizadas, promovendo faíscas. Essas cargas elétricas são descarregadas pela ligação com a Terra.

Uma nuvem carregada eletricamente induz a eletrização na região da ponta do para-raios, que passa a ionizar o ar, tornando-o condutor em suas proximidades. Dessa maneira, a nuvem se descarrega através de sua ligação do para-raios com a Terra. Tanto pode haver escoamento de elétrons da Terra para a nuvem, como também descarga da nuvem para a Terra, dependendo de a nuvem estar carregada positiva ou negativamente.

Cerca de cem raios iluminam o céu nas diferentes regiões do mundo em um segundo, o que significa que em um dia serão mais de oito milhões de raios e, em um ano, mais de três bilhões.

O raio pode gerar energia térmica suficiente para produzir temperaturas de 30000 °C, cinco vezes a temperatura na superfície do Sol. Por promover um calor tão intenso, o ar à sua volta se expande abruptamente, originando o trovão. Seu diâmetro médio varia entre 2 cm e 5 cm. As correntes elétricas geradas variam de 10000 a 80000 A. A tensão elétrica é da ordem de 10 MV, podendo dissipar uma potência de 100 MW. Apenas 1% da energia é liberada na forma de trovão, o restante se converte em energia luminosa. O brilho de um raio – ou relâmpago – tem duração que varia entre 0,1 s e 1,0 s.

O Brasil é o país que registra o maior número de raios no mundo. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) estima que em um ano 200 milhões de raios atingem o Brasil com maior incidência entre dezembro e março. Essa



Photodisc

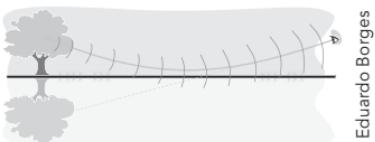
grande quantidade de raios deve-se, provavelmente, às condições climáticas, à predominância de planícies/planaltos, à ausência de grandes elevações no relevo e à extensão territorial.

## Como se formam as miragens?

A palavra miragem tem origem no francês *mirage*, que significa refletido. As miragens são fruto de efeitos óticos reais que ocorrem na atmosfera, especialmente em dias muito ensolarados, como nos desertos, nas rodovias ou mesmo em alto-mar, podendo inclusive ser fotografado. Não são alucinações de um personagem.

A luz solar, em direção ao solo, à medida que se aproxima, sofre refração devido a camadas de ar a diferentes temperaturas.

Essa refração desvia a direção da propagação dos raios luminosos, que, por fim, irá sofrer um reflexão total nas camadas de ar mais próximas do solo. A partir de então, a luz passa a se distanciar do solo. A impressão que se tem é que a superfície do solo está espelhada, muitas vezes aparentando haver poças de água. O fenômeno também pode ser observado quando o solo está muito frio, fornecendo, neste caso, imagens invertidas.



## A exploração espacial

O interesse pelo céu remonta à Antiguidade. Ao longo da História, a esfera celeste com todos os seus astros sempre exerceu grande fascínio sobre a humanidade, tanto no desenvolvimento do conhecimento científico como no aspecto religioso, entre outros.

Alguns instrumentos inventados pelo homem foram de particular importância para o desenvolvimento do conhecimento da Astronomia ao longo dos séculos. Um deles, o telescópio, a partir do século XVII, permitiu a observação mais precisa de estrelas e

objetos a grandes distâncias. A partir do século XX, a evolução da Astronomia toma grande impulso, com o desenvolvimento de sondas e naves espaciais, tornando “mais próximo” do ser humano, não só o Sistema Solar, como todo o universo.

Algumas contribuições para o desenvolvimento da Astronomia, sobretudo no que diz respeito ao progresso da tecnologia de foguetes, estão direta ou indiretamente relacionadas à evolução e à utilização de tecnologia bélica, em particular no que diz respeito à construção de projéteis no período da Segunda Guerra Mundial. Após esse período, teve início o que ficou conhecido como Guerra Fria, uma época de disputas e conflitos políticos, econômicos e militares entre as duas maiores potências mundiais à época, Estados Unidos e a então União das Repúblicas Socialistas Soviéticas.

O primeiro satélite que se tem conhecimento foi lançado em 1957, pela União Soviética, o Sputnik (Lua bebê). Em 1958, foi lançado o Explorer I, pelos Estados Unidos, seguido por seus quatro sucessores no intervalo de tempo decorrido de janeiro a agosto daquele ano. Novos projetos foram desenvolvidos, entre eles os das sondas Luna, Venera e Mariner.

A seguir, alguns dos primeiros projetos e lançamentos das sondas espaciais e particularidades.

*Luna 1*, lançada em 1959, pela União Soviética, foi o primeiro voo lunar. Forneceu dados para a descoberta do vento solar. Atualmente está orbitando o Sol.

*Luna 2*, lançado em 1959, pela União Soviética, colidiu com a superfície da Lua.

*Luna 3*, lançada também em 1959, foi responsável pela primeira imagem fornecida à humanidade do lado oculto da Lua.

*Venera 1*, lançada em 1961, pela União Soviética, atualmente está em uma órbita solar.

*Mariner 1*, lançada em 1962, pelos Estados Unidos, foi enviada a Vênus.

*Mariner 2*, lançada em 1962, pelos Estados Unidos, foi a primeira sonda a atingir outro planeta, coletando informações sobre a atmosfera e a superfície de Vênus.

*Mariner 3*, lançada em 1964, teve problemas na abertura dos painéis solares. Atualmente está localizada em uma órbita solar.

*Mariner 4*, lançada também em 1964, chegou a Marte em 1965. Passou a cerca de 10000 km de sua superfície e enviou 22 fotografias.

Muitos outros satélites e sondas continuaram e continuam a ser colocados em órbita, e suas descobertas podem ser acompanhadas, por exemplo, pela internet, nos sites: [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov) (Agência Espacial Norte-Americana) e [www.planeta.terra.com.br](http://www.planeta.terra.com.br).

Ainda na década de 1960, um dos maiores sonhos de pesquisadores e exploradores estava para ser alcançado. Em 1969, por meio do projeto Apollo, Neil Armstrong, a bordo da Apollo 11, se tornou o primeiro homem a pisar na superfície lunar.

A partir de 1980, os Estados Unidos desenvolveram o ônibus espacial, objetivando o transporte de pessoal e o suprimento para as estações espaciais, como, por exemplo, a MIR, estação espacial russa, desativada recentemente.

O ônibus espacial é constituído por quatro partes principais: um orbitador (o veículo em si), um tanque e dois foguetes propulsores. O ônibus espacial pode transportar de três a sete tripulantes, funcionando na decolagem como um foguete e na reentrada da atmosfera terrestre como um planador, voando em círculos até diminuir a velocidade e, finalmente, pousando e parando com a ajuda de paraquedas.

O primeiro ônibus espacial lançado foi o Columbia, em 1981, ficando apenas dois dias no espaço. Atualmente, o tempo de permanência do ônibus espacial no espaço se estende a duas semanas.

Em 1990, o ônibus espacial Discovery colocou em órbita o telescópio espacial Hubble.

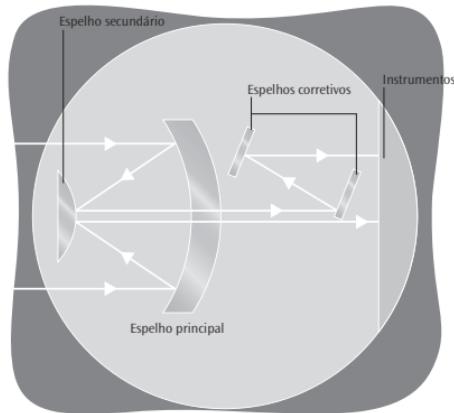
A história da *Conquista do Espaço* não envolve apenas sucesso. Em 1986, o ônibus espacial Challenger explodiu logo após a decolagem, pondo fim à vida de sete astronautas, entre eles uma professora, a primeira civil a participar de um voo espacial.

Em 16 de janeiro de 2003, foi lançado ao espaço o Columbia, o mais antigo ônibus espacial. Nessa missão, a nave levava sete tripulantes. O objetivo da viagem era de caráter científico e, das oitenta experiências programadas, a maior parte dos dados foi transmitida à Terra antes mesmo do término da missão. Entretanto, no dia do seu retorno, a nave desintegrou-se na reentrada da atmosfera, matando todos os tripulantes.

## **Qual a importância do telescópio espacial, como o Hubble?**

O Hubble é dotado de dois espelhos: o principal (2,4 m de diâmetro) e o secundário. Devido a um defeito de fabricação, o espelho principal produz um desvio da ordem de 2% da espessura de um fio de cabelo, que acaba produzindo imagens não nítidas. A miopia do Hubble foi corrigida em 1993, com a colocação de pequenos espelhos, que redirecionam a luz refletida pelo espelho secundário para os instrumentos.

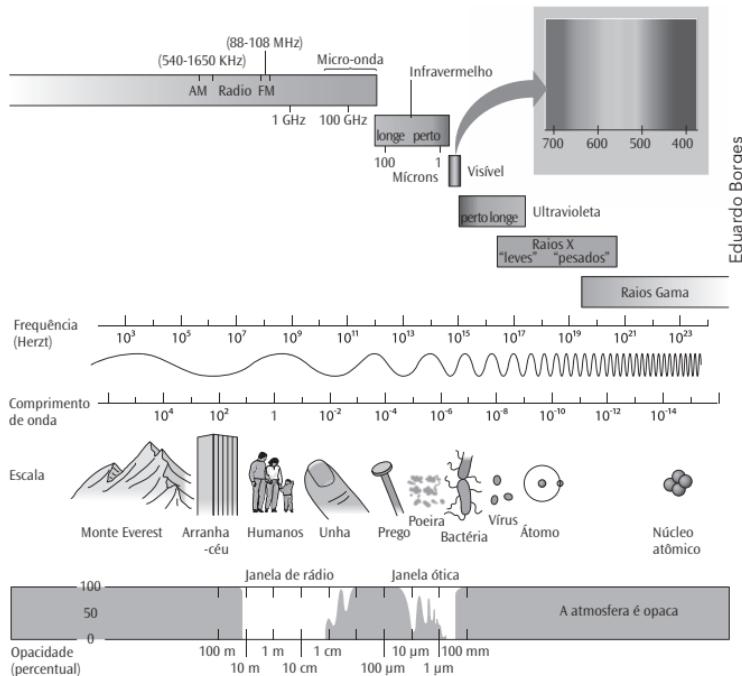
Desde que entrou em operação, este telescópio já coletou várias informações: imagens de estrelas surgindo na Nebulosa de Órion, a 1500 anos-luz de distância; o jorro de matéria atraída por uma região que pode ser um buraco negro na galáxia NGC 4621, a 45 bilhões de anos-luz da Terra; imagens da Cruz de Einstein, que são produzidas por um quasar (cuja origem atribui-se ao núcleo de uma galáxia em formação) entre 8 e 10 bilhões de anos-luz de distância.



Eduardo Borges

### Correção executada no telescopio Hubble

(Fonte: Gonçalves Filho; A. Toscano, C. Física e realidade. v. 2.)



Eduardo Borges

Observando o diagrama anterior, é possível perceber duas pequenas janelas: uma na região das ondas de rádio, cujos comprimentos de onda variam de cerca de 10 m a 1 cm – região em que operam os radiotelescópios, sistemas capazes de capturar ondas de rádio – e outra, menor ainda, na faixa do visível, na faixa de 10 mm a 100 mm, aproximadamente. A atmosfera não é transparente nas demais regiões do espectro, isto é, não é possível capturar sinais nessas outras faixas de comprimentos de onda com telescópios ou radiotelescópios na superfície da Terra. O Hubble proporciona uma visão do universo 20 vezes maior que qualquer telescópio grande localizado em solo.

# RESPOSTAS DAS ATIVIDADES

## Capítulo 1

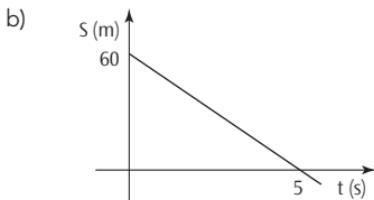
1. 15 N.
2. E
3. B
4. 150 km/h.
5. a)  $[A] = L^2$ .      b)  $[V] = L^3$ .      c)  $[d] = ML^{-3}$ .      d)  $[p] = ML^{-3}T^{-2}$ .
6. E
7.  $[G] = M^{-1}L^3T^{-2}$ .

## Capítulo 2

1. B
2. B
3. A
4. D
5. D
6. B
7. Ele deve se basear no conceito de espaço percorrido, uma vez que, para fins de cálculo do consumo, deve-se levar em consideração todo(s) o(s) trajeto(s) executado(s).
8. 360 m.
9. 50 km/h.
10. 15 m.
11. D

## Capítulo 3

1. a) Posição inicial: 60 m; velocidade:  $-12 \text{ m/s}$ .



- c) 5 s.  
d) -420 m.
- 2.** 20 s e 190 m.
- 3.** 30 s e 780 m.
- 4.** a) entre 0 e 1 s e 8 e 10 s.  
b) entre 3 e 6 s.  
c) de 0 a 1 s:  $v = 10 \text{ m/s}$ .  
de 3 a 5 s:  $v = -10 \text{ m/s}$ .  
de 5 a 6 s;  $v = -15 \text{ m/s}$ .  
de 8 a 10 s:  $v = 15 \text{ m/s}$ .  
d)  $v_m = -1,0 \text{ m/s}$ .
- 5.** C
- 6.** C
- 7.** E
- 8.** E
- 9.** 3 km.
- 10.** A

## Capítulo 4

- 1.** E
- 2.** C
- 3.** C
- 4.** A
- 5.** E
- 6.** Não. O móvel pode estar apenas mudando o sentido de movimento.
- 7.** Seria necessário conhecer a velocidade com que o avião toca o solo e a sua aceleração média de freamento durante o pouso, bem como a velocidade com que ele abandona a pista e sua aceleração média durante a decolagem.
- 8.** a) 12 m/s.      b) 24 m.
- 9.** 6  $\text{m/s}^2$ .
- 10.** 2,516  $\text{m/s}^2$ .
- 11.** a)  $s_0 = 9 \text{ m}$ ;  $v_0 = 3 \text{ m/s}$ ;  $a = -4 \text{ m/s}^2$ .

- b) 3 s.
- c) 0,75 s.

**12.** 100 m/s.

**13.**  $-4\text{m/s}^2$ .

**14.** a) 20 m/s.      b) 40 m/s.      c)  $2\text{ m/s}^2$ .

**15.**  $-8,0\text{ m/s}^2$ .

**16.** B

**17.** C

**18.** A

## Capítulo 5

**1.** C

**2.** Basta soltar uma pedra à beira do poço e cronometrar o intervalo de tempo transcorrido entre o instante em que a pedra é abandonada e o instante em que o ruído do impacto da pedra com o fundo do poço é ouvido. Considerando que, no ar, a velocidade do som é constante e da ordem de 340 m/s, muito maior que a velocidade média da pedra em queda, o tempo que o som leva até ser ouvido pelo experimentador pode ser desprezado.

**3.** C

**4.** A

**5.** E

**6.** D

**7.** A

**8.** C

**9.** a) observou que ambos os corpos, pena e martelo, caem juntos e chegam ao piso juntos.

b)  $\sqrt{2}\text{ s} = 1,41\text{ s}$ .

**10.** E

**11.**  $g = 4\text{ m/s}^2$ .

**12.**  $\Delta h = 20\text{ m}$ .

**13.**  $v = 60\text{ m/s}$ .

**14.** A

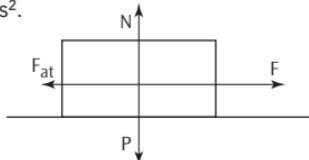
**15.** B

## Capítulo 6

1. 177,6 m/s.
2. 11200 m da vertical que passa pelo alvo.
3. 5m/s.
4. 870 m.
5. 2000 m.
6. 2000 m.
7. a) 0,8 m.  
b) 0,4 s.
8. 8 m.
9. 3125 m.
10. 400 m/s.
11. A velocidade será mínima no ponto mais alto da trajetória. A velocidade será máxima, em módulo, no instante de lançamento e no instante final de movimento.
12. Não. Agindo assim, após o lançamento do projétil, começa a atuar sobre ele a aceleração da gravidade originando um movimento parabólico e o projétil atingirá o anteparo em posição abaixo do alvo.
13. C
14. a) A velocidade é 20 m/s e a aceleração é a aceleração da gravidade,  $10 \text{ m/s}^2$ .  
b) 0,8 s.
15. a) 0,40 m/s.  
b) 12 m.

## Capítulo 7

1. A
2. 5 N.
3. A quarta força, a Normal, se deve à interação entre o veículo e o solo (apoio);  $a = 2 \text{ m/s}^2$ .



4. 2100 N.
5. Não, ação e reação atuam em corpos distintos. A força com que o burro puxa a carroça atua na carroça. A força com que a carroça puxa o burro atua no burro.
6. Não, o corpo pode estar em movimento retilíneo e uniforme, por inércia.
7. 4 kg.
8. Carregado. Para uma mesma força de resistência ao movimento, quanto maior a massa, menor a (des)aceleração.
9. Qualquer força  $F > 0$  é capaz de deslocá-lo, já que não há força que se oponha à tendência de movimento.
10. D
11. C
12.  $a = 5 \text{ m/s}^2$ ;  $F_{AB} = 25 \text{ N}$ ;  $F_{BC} = 15 \text{ N}$ .
13.  $a = 5 \text{ m/s}^2$ ;  $T_A = 5 \text{ N}$ ;  $T_B = 15 \text{ N}$ .
14.  $a = 2 \text{ m/s}^2$ ;  $T_A = 8 \text{ N}$ ;  $F_{AB} = 6 \text{ N}$ .
15. Pelo princípio da ação e reação, o astronauta deve sofrer uma ação igual e contrária à que exerceu sobre a ferramenta ao atirá-la. Não havendo resistência ao seu movimento, ele sairá na mesma direção, mas em sentido oposto ao da ferramenta, ou seja, "para cima" na linguagem do texto.
16. Enquanto a força gravitacional exercida pela Terra sobre o paraquedas for maior que a resistência do ar, o paraquedas desce acelerado. A partir do momento em que estas duas forças se igualam, o paraquedas adquire velocidade constante.
17. a) 120 N.      b) 80 N.      c) 0 N.
18. 40 N.
19. D
20. C
21. B

## Capítulo 8

1. F, V, F, F, F.
2. 318,3 rpm.
3. a) 6 m/s.      b) 8 m/s<sup>2</sup>.      c) 6 m/s<sup>2</sup>.      d) 10 m/s<sup>2</sup>.

4.  $T = 0,5$  s, e  $f = 2$  Hz.
5.  $8000\pi$  km/h.
6. a)  $f = 30$  Hz, e  $T = 1/30$  s.  
b)  $60\pi$  rad/s.  
c)  $600\pi$  cm/s.
7. 1000 Hz.
8.  $v = 5,6\pi$  m/s;  $\omega_A = 20\pi$  rad/s;  $\omega_B = 14\pi$  rad/s.
9. B
10. C
11. B
12. a) 0,50 Hz.      b) 2 s.

## Capítulo 9

1. E
2. 6400 dias.
3. a)  $F = 6250$  N. b)  $v = 7,07 \times 10^3$  m/s.
4.  $T = 164,3$  anos terrestres.
5. Porque esta força é muito pequena, visto que as massas são pequenas e G é da ordem de  $10^{-11}$  unidades.
6. B
7. C
8. B
9. D
10.  $F' = 60$  F.
11. 11,8 anos terrestres.
12. Sim, basta calcular o raio da órbita a partir de  $T = 8$  anos terrestres.  
Não esqueça que para a Terra,  $T = 1$  ano terrestre e  $R = 1$  ua.
13. 675 dias.
14.  $g_A = 0,4$  m/s<sup>2</sup>.
15. 100 kg e 2650 N.
16. A
17. B

## Capítulo 10

1. a)  $2,5 \text{ m/s}^2$ .      b) 4,8 kg.      c) 240 J.      d) 10 m/s.
2. 20%.
3. 675000 J; 90 cv.
4. 25 J.  
0,05 m (5 cm).
5. 6000 m.
6. 870 J.
7. 640 J. Observe-se que nem todo poste é erguido de 3,2 m.  
O ponto médio do poste é erguido de 1,6 m.
8. 5 m.
9. A energia potencial depende da origem do referencial em relação à qual é medida a altura. Se adotarmos o mesmo nível de referência, as duas lagartixas terão a mesma energia potencial, uma vez que as massas são idênticas. Se adotarmos referenciais distintos, cada lagartixa terá uma energia potencial em relação aos respectivos referenciais adotados.
10. a) 60000 J.  
b) 30000 J.
11. D
12. C
13. E
14. C
15. B
16. D
17. B
18. 50 W.
19. A
20. D

## Capítulo 11

1. 12 m/s.
2. 54000 kg.m/s; 2160000 N.
3. 2 kg.

- 4.** 9,6 kg.m/s; 320 N.
- 5.**  $-v$ ; o fragmento maior possui velocidade de módulo  $v$ , deslocando-se na mesma direção, porém, em sentido contrário em relação ao fragmento menor.
- 6.** D
- 7.**  $-20$  m/s.
- 8.** C
- 9.** 9,6 m/s e 4,4 m/s.
- 10.** 4 m/s.
- 11.** a) 1,3 m.      b) 120 kg.m/s.
- 12.** A
- 13.** C
- 14.** a) 3 m/s.      b)  $3 \cdot 10^2$  m/s.

## Capítulo 12

- 1.** 350 N; 750 N.
- 2.** 10 N.
- 3.** 5,5 m medidos a partir da extremidade A.
- 4.** Falso. O sistema pode ser reduzido a um par de forças de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos, aplicadas sobre linhas de ação distintas – um binário. Neste caso, o sistema entrará em rotação. Binário não admite resultante.
- 5.** 500 N.
- 6.** 240 kg; 3200 N.
- 7.** 2571,43 N e 3428,57 N.
- 8.** D
- 9.** a) 36 N.      b) 36 N.      c) 180 N.
- 10.** 24 cm.
- 11.** A
- 12.** E
- 13.** E
- 14.** a)  $3 \times 10^{29}$  km.  
b)  $7,5 \times 10^{23}$  vezes a distância Terra-Lua.

**15.** A

**16.** B

**17.** A

### **Capítulo 13**

1. A razão entre os raios é 5.
2. 5 N.
3. a) 2 m.  
b) 4 g, isto é, 4 vezes a gravidade da Terra.
4. a)  $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .  
b)  $2,5 \text{ m/s}^2$ , vertical para cima.  
c)  $\sqrt{50} \text{ m/s} = 7,07 \text{ m/s}$ .  
d)  $\sqrt{8} \text{ s}$ .
5. a) A pressão no fundo de ambos será a mesma.  
b) Maior.
6. a)  $8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . b)  $24 \text{ cm}^2$ .
7.  $1,01 \times 10^6 \text{ Pa}$ .
8. Não. Na Lua não há pressão atmosférica para empurrar o refrigerante canudinho acima.
9. Não. Seria necessário aumentar a altura da água contida na caixa.
10. a)  $2 \text{ g/cm}^3$ . b) 10 N.
11. C
12. C
13. A —
14. A
15. 416,7 N.
16. a) 80 cm. b) 512 L.
17. a) 150000 Pa. b) Zero.
18. A

### **Capítulo 14**

**1.** C

2. 343 K.
3. 274,8 °C.
4. Para que, através de correntes de convecção, o ar possa fluir e a temperatura no ambiente se tornar uniforme. O ar frio, por ser mais denso que o ar quente, tende a ficar na parte inferior dos ambientes, próximo ao chão, e o ar quente, na parte superior. Colando-se aquecedores na parte inferior, ele irá aquecer o ar frio que, por ficar mais quente que o ar da parte superior, deve subir e empurrar a massa de ar que lá está para baixo. Da mesma forma, o ar-condicionado, colocado na parte superior, resfria o ar quente que desce e, por sua vez, empurra o ar frio que está próximo ao chão para a parte superior do ambiente.
5. Vá até o armário onde estão guardadas suas roupas de lã e/ou cobertores e verifique se a prateleira está quente. Cobertor não esquenta, propriamente. O calor que sentimos quando nos cobrimos é o calor do nosso próprio corpo. Os cobertores são maus condutores de calor – dificultam a perda de energia do corpo para o ambiente. Se embrulharmos uma pedra de gelo em um cobertor, ela vai derreter mais devagar do que desembrulhada porque o cobertor atuará de forma a evitar trocas de calor com o ambiente.
6. Os balcões frigoríficos podem ficar abertos porque, sendo o ar frio mais denso do que o ar quente, não há correntes de convecção.
7. D
8. E
9. B
10. B
11. C
12. C
13. A

## Capítulo 15

1. Você pode pensar em colocar água gelada dentro do “copo de dentro” e o “copo de fora” em água morna. O “copo de fora” irá se dilatar, e o “copo de dentro”, se contrair.
2. 0,96 L.
3. 0,6365 cm.
4. B
5. C
6. D
7. B

8. B

### Capítulo 16

1. E
2. C
3. C
4. 27,8 lbf/pol<sup>2</sup>.
5. 1 atm.
6. 583,3 mmHg. Porque a pressão interna é significativamente menor que a pressão externa.
7. A
8. B
9. A
10. C
11. B
12. A

### Capítulo 17

1. A dona de casa deve pegar pouco de água e aquecê-la até que ela ferva. A água (admitindo-a pura) entra em ebulição, em Santos, a 100 °C. Paralelamente, a dona de casa pega um pouco de gelo, deixando-o fundir parcialmente. O fato de se ter uma mistura entre água no estado sólido e água no estado líquido garante, neste caso, que a temperatura do sistema é 0 °C.  
A seguir, ela apanha uma xícara de água fervente (100 °C) e mistura com a mesma quantidade de água em fusão (0 °C). Rapidamente as duas porções de água entram em equilíbrio térmico e têm-se, então, duas xícaras de água a 50 °C.
2. 1 °C.
3. 0,4 cal/g°C.
4. 4680 cal.
5. 30,75 °C.
6. B
7. E
8. E
9. B

**10. C**

**Capítulo 18**

1. O calor fornecido ao sistema é de 155 kJ.
2. Não, pois o máximo rendimento (ciclo de Carnot) é de 40%.
3. B
4. A
5. B
6. C
7. Com base no Segundo Princípio da Termodinâmica, a entropia do universo não diminui. O presente representa um estado de entropia maior (mais desorganizado) que o passado e de entropia menor (mais organizado) que o futuro. Visto dessa forma, é impossível viajar no tempo para o passado.
8. a) 70%.      b) 560000 J.      c) 240000 J.
9. A

**Capítulo 19**

1. C
2. C
3. B
4. A
5. a) 0,80 m.      b) 4,31 s.
6. a)  $\varphi_0 = 0$ ;  $\omega = 0,40\pi$  rad/s;  $A = 0,2$  m.  
b)  $x = 0,2 \cos(0,40\pi \cdot t)$ .  
c)  $a = -0,032\pi^2 \cos(0,40\pi \cdot t)$ .
7.  $A = 0,8$  m;  $f = 0,40$  Hz.
8. a) 2,19 s.      b) 9,87 m/s<sup>2</sup>.
9. C e D

**Capítulo 20**

1. a) 4 m.  
b) 80 m/s.

2. A frequência da onda emitida é de 34000 Hz, podendo ser ouvida pelo cachorro, mas não pelo ser humano.

3. Com relação aos efeitos sonoros, apenas o filme *2001, uma odisseia no espaço*, está de acordo com as leis da Física, já que o som não se propaga no vácuo. Com respeito aos efeitos luminosos, a luz é uma onda eletromagnética, podendo se propagar no vácuo, não havendo, então, inconsistência em ambos os filmes.

4. 3,20 m.

5. D

6. B

7. C

8. D

9. A

10. D

11. C

12. D

13. E

14. D

15. D

16. A

17. E

18. B

19. B

## Capítulo 21

1. 696938 km.
  2. 26,67 cm.
  3. C
  4. D
  5. C
  6. B
  7. 66,7 cm.

## Capítulo 22

1. a) A imagem será real, invertida e menor que o objeto.  
b)  $A = -0,5$ .
  2. A imagem será virtual, direita e maior que o objeto. Esta imagem não pode ser projetada em uma tela. Para que a imagem possa ser projetada, ela deve ser real. O espelho é do tipo côncavo.
  3. 120 cm.

4. É possível ver imagens reais e virtuais. Sua própria imagem em um espelho plano tem natureza virtual; qualquer imagem proporcionada por um espelho convexo é virtual. Imagens projetadas em uma tela são obrigatoriamente reais.
5. Para que se aumente o campo visual do motorista. A desvantagem é que as imagens se apresentam menores que os objetos reais e os demais veículos parecem mais afastados do que de fato estão.
6. Para uma imagem ampliada, o espelho precisa ser côncavo. Se a imagem for direita em relação ao objeto, o raio de curvatura deve ser 3 m; se a imagem for invertida em relação ao objeto, o raio de curvatura deve ser 1,5 m.
7. A
8. B
9. C

## Capítulo 23

1. 180000 km/s.
2. 1,732.
3. O índio deve jogar a lança abaixo da posição em que ele vê o peixe. Isso porque o raio de luz ao passar da água para o ar, trazendo a imagem do peixe para o olho do índio, se afasta da normal, dando a impressão de que o peixe está mais próximo da superfície.
4. B
5. Não. A reflexão total só ocorre quando um raio de luz passa do meio mais refringente (de maior índice de refração) para um meio menos refringente (de menor índice de refração).
6. B
7. D
8. X parecerá preto; Y parecerá verde; Z parecerá verde.
9. B

## Capítulo 24

1. E
2. a) 25 cm.  
b) 0,8.
3. 60 cm; 60 cm; convergente.

- |      |      |
|------|------|
| 4. D | 7. C |
| 5. B | 8. C |
| 6. B | 9. E |

## Capítulo 25

1. A distância deve ser triplicada.
2. A quarta e a quinta possibilidades.
3. C
4. A
5.  $5 \times 10^{-7}$  C.
6. O deslocamento do caminhão pode promover, devido ao atrito com o ar, uma eletrização da sua carroceria, o que poderia, por meio de uma faísca, ocasionar sério acidente por ocasião da abertura do tanque para retirada do combustível. Dessa forma, a corrente arrastando pelo chão opera como um fio-terra que impede tal situação.
7. B
8. D
9. D
10. A
11. D
12. A
13. B
14. E

## Capítulo 26

1. 0,1 N.
2.  $4,9 \times 10^{-2}$  C. A carga elétrica deve ter sinal negativo.
3. E
4. a)  $5 \times 10^4$  N/C.  
b)  $5 \times 10^{-7}$  C.  
c)  $4,5 \times 10^4$  V.  
d) Nulo.
5. O condutor de maior diâmetro (B) terá menor resistência ( $R_B = 0,75 \cdot R_A$ ). Para mesma tensão, ele estará sujeito a maior intensidade de corrente elétrica ( $i_B = 4 \cdot i_A/3$ ).
6.  $4,66 \times 10^4$  m (aproximadamente).

7. 110 V.
8. O fio de maior diâmetro tem 25% da resistência ( $R_A = 0,25 \cdot R_B$ ).
9.  $(2,5 \pi d^2/L) \Omega \cdot M$ .
10. R\$ 23,76.
11. a) 5 A.                    b) 40 lâmpadas.
12. a) 2640 W.  
b)  $316800 \text{ J} = 0,088 \text{ kWh}$ .  
c)  $53^\circ\text{C}$ .
13. Pode ser que seja necessário ajustar a instalação elétrica disponível para o chuveiro. Deve-se verificar, sobretudo, o diâmetro dos fios e o fusível/disjuntor no quadro de energia. Normalmente, a empresa fornecedora do aparelho imprime na embalagem, ou no próprio aparelho, as especificações técnicas necessárias.
14. 96 W; 1,25 A.
15. As especificações indicam as condições em que o aparelho deve operar. Quando sujeito à tensão de 120 V, ele desenvolve uma potência de 960 W. Nessa condição, a corrente elétrica a que ele está sujeito é de 8 A, e sua resistência elétrica é de 15W.
16. Uma vez que não há alteração da instalação elétrica, a tensão elétrica não é alterada. A expressão  $P = U^2/R$  mostra que, com a resistência caindo pela metade, a potência dobra.
17. Diminuir a resistência para que a potência aumente. No entanto, essa prática não é aconselhável, uma vez que pode comprometer a instalação elétrica da edificação.
18. C                            27. A
19. C                            28. E
20. D                            29. A
21. E                            30. E
22. A                            31. E
23. D                            32. D
24. C                            33. a)  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ .    b)  $-1,3 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ .
25. C                            34. A
26. B

## Capítulo 27

1. a)  $t/2$  min.      b)  $2t$  min.
2.  $2R/3$  ohms.
3. a) 1000 ohms.      b) 48 ohms.
4. a) 95%.      b) 3,6 W.      c) 68,4 W.
5. 24 ohms.
6. a) 160 V.  
b) 8 ohms.  
c)  $P_{\text{total}} = 1000 \text{ W}$ ;  $P_{\text{útil}} = 800 \text{ W}$ ;  $P_{\text{dissip.}} = 200 \text{ W}$ .
7. A corrente de curto-círcuito de um gerador refere-se à situação em que  $U = 0$ , portanto, toda energia é consumida pelo próprio gerador. Neste caso,  $i_{\text{cc}} = 30 \text{ A}$ .
8. 0,5 ohm.
9. a)  $i_{\text{máx}} = i_{\text{cc}} = 6 \text{ A}$ .  
b) Não. Para funcionar corretamente, a lâmpada precisa estar submetida a uma tensão de 6 V e corrente elétrica de 2 A. Como a bateria possui resistência interna, ela já fornece menos de 6 V. Para uma corrente elétrica de 2 A, o máximo que a bateria disponibilizará é 4 V.
10. 10 A.
11. C
12. D
13. A
14. 3 ohms.
15.  $i = 0,6 \text{ A}$  e  $U = 5,7 \text{ V}$ .
16. D
17. A
18. A
19. C
20. B
21. A
22. C

## Capítulo 28

1.  $1,5 \times 10^{-6} \text{ T}$ .
2. 6 A.
3. 1 N.
4.  $6\pi \times 10^{-6} \text{ T}$ .
5. Nem sempre. Se o imã se quebra longitudinalmente, de um polo a outro, não.

6. No momento em que a bússola sofreu a perturbação, ela interagiu com algum outro campo magnético que não o da Terra presente no laboratório.
  7. E
  8. Não. A Lua praticamente não possui campo magnético. O uso da bússola só é possível quando de sua interação com outro campo magnético.
  9. A
  10. A
  11. C
  12. C
  13. D
  14. A

## Capítulo 29

1. a)  $2,5 \cdot 10^{-13}$  eV.  
b)  $2,5 \cdot 10^{34}$  fótons.
  2. a)  $1,12 \cdot 10^{-8}$  s. b) 3,37 m.
  3. B

## Capítulo 30

1.  $4,2 \times 10^7$  m/s.
  2. a) 0,8 c e 0,988 c.  
b) 0,9 c e 0,988 c.
  3. V; V; F; V; V.
  4. D
  5. D
  6. D
  7. D

## BIBLIOGRAFIA

- ASIMOV, I. *Enciclopédia biográfica de ciências y tecnologia*. 9. ed. Madrid: Alianza, 1982.
- BAROLLI, E.; GONÇALVES FILHO, A. *Nós e o universo*. São Paulo: Scipione, [ANO?].
- BOCZKO, R. *Conceitos de Astronomia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.
- BRAGA, M. et al. *Newton e o triunfo do mecanicismo*. São Paulo: Atual, 1999.
- CAPRA, F. *O ponto de mutação*. São Paulo: Cultrix, 2001.
- CHIQUETTO, M. *Breve história da medida do tempo*. São Paulo: Scipione, [ANO?].
- GASPAR, A. *Física*. São Paulo: Ática, 2000.
- GLEISER, M. *A dança do universo: dos mitos de criação ao Big-bang*. São Paulo: Cia das Letras, [ANO?].
- GONÇALVES FILHO, A.; TOSCANO, C. *Física*. São Paulo: Scipione, 2005.
- GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. *Física*. São Paulo: Edusp, 1990, 3 v.
- \_\_\_\_\_. W. *Uma breve história do tempo: do big-bang aos buracos negros*. Rio de Janeiro: Rocco, [ANO?].
- HAWKING, S. W. *O Universo numa casca de noz*. Rio de Janeiro: Rocco, [ANO?].
- HEISENBERG, W. *Física e Filosofia*. Brasília: Universidade de Brasília, [ANO?]
- JATENCO-PEREIRA, V. et al. *Astronomia: uma visão geral do Universo*. 2. ed. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 2003.
- MENEZES, L. C. *Vale a pena ser físico?* 2. ed. São Paulo: Moderna, [ANO?].
- MOURÃO, R. R. de F. *Sol e energia do terceiro milênio*. São Paulo: Scipione, [ANO?].
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física*. São Paulo: Edgard Blucher, 1981, 2 v.
- OREAR, Jay. *Fundamentos da Física*. Rio de Janeiro: LTC, 1986, 1 v.
- ROBERTS, R. M. *Descobertas acidentais em ciências*. Campinas: Papirus, [ANO?].
- ROZENBERG, I. M. *O Sistema Internacional de Unidades*. 3. ed. São Paulo: Instituto Mauá de Tecnologia, 2006.
- SAGAN, C. *Cosmos*. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1986.

SCHEMBERG, M. *Pensando a Física*. São Paulo: Brasiliense, [ANO?].

TIPLER, P. A. *Física*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978, 2 v.

WHITE, Michael C. *Isaac Newton: o último feiticeiro*. 1. ed. Rio de Janeiro: Record, 2000.

### **Sites relacionados:**

Disponível em: <[www.cienciamao.if.usp.br](http://www.cienciamao.if.usp.br)>. Acesso em: 02 fev. 2012.

Disponível em: <[www.adorofisica.com.br](http://www.adorofisica.com.br)>. Acesso em: 02 fev. 2012.

Disponível em: <[www.fisica.net](http://www.fisica.net)>. Acesso em: 02 fev. 2012.

Disponível em: <[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)>. Acesso em: 02 fev. 2012.

