

Guimarães • Piqueira • Carron

Física

Física térmica • Ondas • Óptica

Manual do Professor

2

Física - Ensino Médio

editora ática

Guimarães • Piqueira • Carron

Física

Física térmica • Ondas • Óptica

Manual do Professor

Osvaldo Guimarães

Bacharel em Física pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP). Pós-graduado em Ciência Cognitiva pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Pós-graduado em Teoria de Campos e Mecânica Quântica pelo Instituto de Física Teórica (IFT-SP). Mestre em História da Ciência pela PUC-SP. Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP. Pós-doutorado em Propulsão Nuclear pela Escola Politécnica da USP. Pesquisador da Escola Politécnica da USP. Especialização em Controle de Reatores Nucleares pela Universidade de Barcelona.

José Roberto Piqueira

Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos (USP). Livre-docente em Controle e Automação pela Escola Politécnica da USP. Engenheiro eletricista pela Escola de Engenharia de São Carlos (USP). Professor titular e diretor da Escola Politécnica da USP.

Wilson Carron

Licenciado em Física pela Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Energia Nuclear aplicada à agricultura pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba (SP). Especializado em Eletricidade pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos (SP). Professor e gestor aposentado da rede pública de ensino.

2

2ª EDIÇÃO
SÃO PAULO • 2016

editora ática

Física - Ensino Médio

editora ática

Diretoria editorial
Lidiane Vivaldini Olo

Gerência editorial
Luiz Tonolli

Editoria de Matemática e Física
Ronaldo Rocha

Edição
Alexandre Braga D'Avila

Gerência de produção editorial
Ricardo de Gan Braga

Arte
Andréa Dellamagna (coord. de criação),
Erik TS (progr. visual de capa e miolo),
André Gomes Vitale (coord. e edição)
e Casa de Tipos (diagram.)

Revisão
Hélia de Jesus Gonsaga (ger.),
Rosângela Muricy (coord.),
Ana Paula Chabaribery Malfa,
Gabriela Macedo de Andrade, Heloísa Schiavo
e Luís Maurício Boa Nova;
Brenda Morais e Gabriela Miragaia (estagiárias)

Iconografia
Sílvio Kligin (superv.), Denise Durand Kremer (coord.),
Carlos Luvizari e Evelyn Torrecilla (pesquisa),
Cesar Wolf e Fernanda Crevin (tratamento de imagem)

Ilustrações
Antonio Robson, Casa de Tipos, Formato Comunicação,
Luis Moura, Moisés Gonçalves, Osni de Oliveira,
Paulo Manzi e Pedro Hamdan

Cartografia
Eric Fuzii, Márcio Souza

Foto da capa: Cabos de fibra óptica.
Lucidio Studio, Inc./Getty Images

Protótipos
Magali Prado

Direitos desta edição cedidos à Editora Ática S.A.
Avenida das Nações Unidas, 7221, 3º andar, Setor A
Pinheiros – São Paulo – SP – CEP 05425-902
Tel.: 4003-3061
www.atica.com.br / editora@atica.com.br

2016

ISBN 978 85 08 17951 0 (AL)
ISBN 978 85 08 17952 7 (PR)
Cód. da obra CL 713353
CAE 566 241 (AL) / 566 242 (PR)

2ª edição
1ª impressão

Impressão e acabamento

EDITORA AFILIADA

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

Guimarães, Osvaldo
Física / Osvaldo Guimarães, José Roberto Piqueira, Wilson Carron. -- 2. ed. -- São Paulo : Ática, 2016.

Obra em 3 v.
Conteúdo: V.1. Mecânica -- v.2. Física térmica, ondas e óptica -- v.3. Eletromagnetismo e física moderna
Bibliografia.

1. Física (Ensino médio) I. Piqueira, José Roberto. II. Carron, Wilson. III. Título.

16-02125 CDD-530.07

Índices para catálogo sistemático:

1. Física : Ensino médio 530.07

APRESENTAÇÃO

Caro aluno,

Em um dos seus livros, Richard Feynman (1918-1988) ironiza uma explicação do século V a.C. sobre os raios:

> *"Veja como os deuses, com seus raios, sempre golpeiam os maiores animais e não se importam com os menores. Como também seus raios sempre caem sobre as casas e as árvores mais altas. Desse modo, eles adoram esmagar tudo o que se mete a besta".*

Nessa mesma época, a Filosofia grega propunha um grande desafio: usar puramente a razão e não aceitar como explicação dos fenômenos do mundo que nos cerca qualquer intervenção sobrenatural. Assim nasceu a Filosofia natural, que hoje chamamos de Ciências Naturais, que não se opõe à crença espiritual de cada um, nem ao sobrenatural, apenas diz que não devemos invocar deuses para a explicação dos fenômenos do mundo, e considera as tecnologias e os aparelhos artificiais criados pelo ser humano como parte do mundo natural.

Assim como nossos antepassados, a Ciência passou por muitas dificuldades em seus mais de 2 500 anos e sobreviveu muitas vezes por um triz. Acompanhou a evolução da informação e sua distribuição, motivando as pessoas a perguntar, descobrir e aprender.

Para entender a importância das ciências na civilização, basta olhar para trás. Um pequeno ferimento infeccionado poderia ser fatal, e uma viagem intercontinental demorava meses. Em menos de três séculos, passamos por uma evolução rápida, na qual criamos soluções para o nosso bem-estar, e sabemos que ainda existe uma grande caminhada para trilhar.

A Física faz parte dessa evolução das Ciências Naturais. Ela busca compreender, prever ou até mesmo controlar o comportamento da matéria no espaço e no tempo.

Nossa missão com esta obra é levar a Física até você. Mas como fazer isso? A resposta não é muito fácil, mas podemos, apoiados em nossa experiência, incluir alguns caminhos: trabalhar os fenômenos naturais envolvidos, descritos e explicados, agregando a linguagem, a escrita, a razão, a lógica e a matemática.

Parece complicado, mas com o passar do tempo você notará que o conhecimento que vem sendo construído há mais de dois milênios pode – e deve – ser conhecido e valorizado por você.

Quanto ao futuro, Feynman nos alerta: se você achou engraçada a explicação sobre os raios de 2500 anos atrás, imagine o que dirão daqui a mil anos sobre as explicações que temos hoje.

Os autores



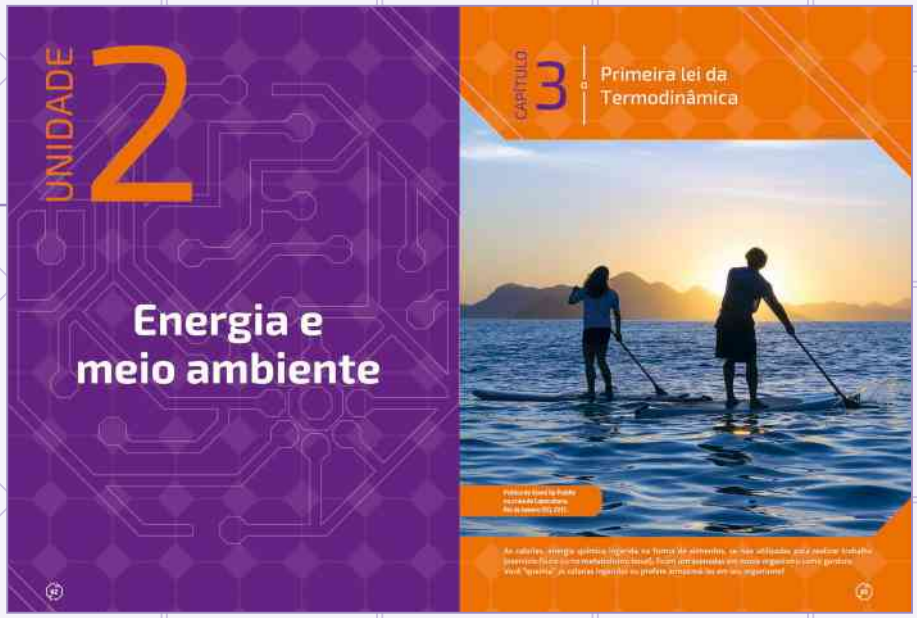
Tricia Daniel/Shutterstock

Conheça seu livro

Dividimos os volumes em quatro Unidades para facilitar o uso.
Você vai encontrar as seguintes seções/boxes:

Abertura de Unidade e abertura de capítulo

Cada volume da coleção é dividido em quatro Unidades temáticas. O tema de cada capítulo é apresentado com uma imagem e um breve texto de introdução.



Trabalho em equipe

Envolve atividades práticas e pesquisas, com o objetivo de promover discussões e compartilhar informações.



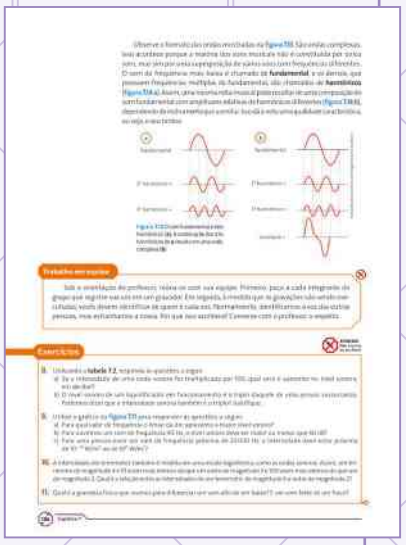
Física explica

Ciência pura ou aplicações tecnológicas, inseridas no dia a dia do ser humano ou que explicam a natureza.



Física tem História

Apresenta elementos tecnológicos, políticos, sociais e culturais de um momento do desenvolvimento da Física.



Exercícios

Uma grande quantidade de exercícios resolvidos e exercícios propostos para concretizar ideias e fixar os conceitos estão distribuídos no decorrer do livro.



Em construção

Biografia de um personagem importante para a Física.



Para refletir

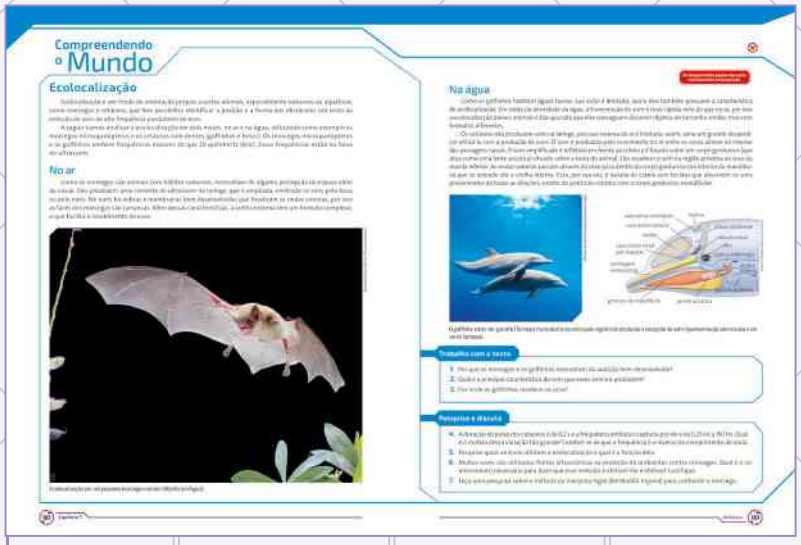
Questão geradora de reflexão, tem como objetivo ressaltar conhecimentos prévios sobre o assunto.

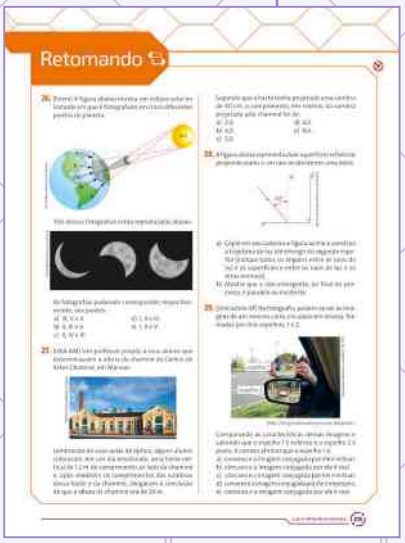
Glossário

Explicação de palavras e termos incomuns no dia a dia do aluno.

Retomando

Problemas e questões de testes e de vestibulares para retomar conceitos ao final de cada capítulo.





Compreendendo o Mundo

Textos que trabalham a interdisciplinaridade para explicar fenômenos naturais.

Trabalho com o texto

Questões que orientam a interpretação do texto.

Pesquise e...

Propõe atividade de pesquisa e discussão para aumentar os conhecimentos sobre determinado assunto e compartilhar informações em grupo.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Atenção! Ainda que se peça "Assinale", "Indique", etc. em algumas questões, nunca escreva no livro. Responda a todas as questões no caderno.

Sumário

Unidade 1: O calor e suas consequências

CAPÍTULO 1
Temperatura e calor 11

1. Noções de temperatura e calor 12
- Termômetros 13

2. Escalas Celsius e Fahrenheit 15

3. Kelvin, uma escala absoluta 18

4. Dilatação térmica de sólidos 20
- Dilatação superficial 24
- Dilatação volumétrica 25

5. Dilatação térmica de líquidos 26
- Dilatação real 26
- Dilatação aparente 26
- Dilatação irregular da água 27

6. Transmissão da energia térmica 29
- Condução de calor 30
- Convecção térmica 32
- Irradiação térmica 34

CAPÍTULO 2
Calorimetria 40

1. Capacidade térmica 41
- Calor específico (*c*) 42

2. Calor sensível 43
- Calor de combustão 44

3. Calor latente 46
- As mudanças de fase 48

4. Trocas de calor 52

5. Diagrama de fases 53
- Curva de fusão 54
- Curva de vaporização 55
- Curva de sublimação 56

6. Umidade do ar 57



Mauricio Simonetti/Pulsar Imagens



Unidade 2: Energia e meio ambiente

Serg/Shutterstock/Glow Images

CAPÍTULO 3
Primeira lei da Termodinâmica 63

1. Estudo dos gases 64
   - Transformações gasosas 65
   - Equação de estado de um gás – Clapeyron 66
2. Trabalho em Termodinâmica 68
   - Transformação isobárica 69
3. Primeira lei da Termodinâmica 71
4. Transformações termodinâmicas 73
   - Transformação isotérmica 73
   - Transformação isométrica 74
   - Transformação isobárica 74
   - Transformação adiabática 75
   - Transformação cíclica 75

CAPÍTULO 4
Segunda lei da Termodinâmica 79

1. Segunda lei da Termodinâmica 80
   - Máquinas térmicas 80
2. Motor térmico 82
   - Rendimento 82
   - Potência 83
3. Trocadores de calor 84
   - Refrigerador 85
   - Bomba de calor (aquecedor termodinâmico) 86
   - Transformação reversível 86
4. O ciclo de Carnot 88
   - Enunciados para a segunda lei da Termodinâmica 90
5. Motores de combustão interna 92
   - Motores a *diesel* 94
   - Torque de um motor 94

CAPÍTULO 5
Fontes de energia e impactos ambientais 98

1. A energia que provém do Sol 99
   - Aquecedor solar 101
   - Células fotovoltaicas 102
2. Combustíveis fósseis 104
   - Consumo e reservas 105
3. Biocombustíveis 106
   - Etanol 106
   - *Biodiesel* 107
4. Fontes alternativas de energia 109
   - Energia eólica 109
5. Impactos ambientais 111
   - O que mantém o planeta habitável 111
   - Efeito estufa e aquecimento global 115
6. A camada de ozônio 117
7. Poluição 118
   - Poluição atmosférica 118
   - Combustão dos hidrocarbonetos 118
   - Principais poluentes atmosféricos 119
   - Inversão térmica 121
   - Chuva ácida 121
   - Poluição das águas e dos solos 122
8. Biocombustíveis e usina nuclear 124
   - Usina nuclear 125
   - O mundo sustentável 127

Unidade 3: Ondulatória

CAPÍTULO 6
Ondas mecânicas 131

1. Movimentos oscilatórios 132
   - Pêndulo simples 133
   - Sistema massa-mola 134
2. Propagação ondulatória 136
   - As ondas transportam energia sem transportar matéria 136
   - Ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas 137
   - Características de uma onda 138
   - Equação fundamental da ondulatória 139
3. Reflexão, refração e difração de ondas 140
   - Refração 142
   - Difração 144
4. Interferência de ondas 145
5. Ondas estacionárias 148
6. Ressonância 150

CAPÍTULO 7
Acústica 154

1. Sons, ultrassons e infrassons 155
2. Reverberação e eco 159
3. Intensidade, altura e timbre 161
   - Intensidade 161
   - Altura 163
   - Timbre 163
4. Cordas vibrantes 165
5. Tubos sonoros 169
   - Tubo aberto 171
   - Tubo fechado 171
6. Efeito Doppler 174



Fabio Motta/Agência Estado

Unidade 4: Óptica e informação

CAPÍTULO 8
Luz e reflexão luminosa 185

1. Introdução à Óptica geométrica 186
   - A luz e sua propagação 186
   - Fontes de luz 187
   - Meios de propagação da luz 188
   - Princípios da Óptica geométrica 189
   - A cor de um corpo 190
2. Sombra, penumbra e eclipse 193
   - Os eclipses e as fases da Lua 195
3. Reflexão luminosa e espelhos planos 197
   - Espelhos planos 198
   - Campo visual 200
4. Associação de espelhos planos 202
5. Espelhos esféricos 203
   - Elementos dos espelhos esféricos 204
   - Raios notáveis 205
6. Construção de imagens 207
   - Espelho côncavo 209
   - Espelho convexo 210
7. Estudo analítico dos espelhos esféricos 211
   - Equação dos pontos conjugados 211

CAPÍTULO 9
Refração luminosa 216

1. Refração luminosa 217
2. Dioptros planos 223
3. Lâminas de faces paralelas e prismas 224
   - Prismas 225
4. Refração atmosférica e dispersão luminosa 227
   - Dispersão luminosa 228
5. Lentes esféricas 230
   - Pontos notáveis 232
   - Construção de imagens 233
6. Instrumentos ópticos 236
   - Lupa 236
   - Lunetas 236
   - Telescópio 238
   - Microscópio 238
   - Câmera fotográfica 239
   - Projetor de *slides* 239
7. Óptica do olho humano 241
   - Miopia 242
   - Hipermetropia 243
   - Presbiopia 244
   - Astigmatismo 244

CAPÍTULO 10
Sons, imagens e informação 250

1. Registros analógicos 252
   - Fonógrafo 253
   - Microfone 254
   - Alto-falante 255
   - O antigo telefone 255
   - Gravação magnética do som 255
   - Gravação de imagens 256
   - Cinema 257
   - Televisão 258
2. Registros digitais 264
   - Telégrafo 265
   - Telefone celular 266
   - *Bytes* e números hexadecimais 267
   - Conversão de uma informação analógica em digital 268

Respostas 273

Sigla de vestibulares 277

Sugestões de leitura e *sites* 278

Bibliografia 279

Índice remissivo 280

UNIDADE 1

O calor e suas consequências

CAPÍTULO 1

Temperatura e calor

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

Dean Drobot/Shutterstock



Pessoas aquecendo-se em uma fogueira.

Desde a Antiguidade, a humanidade aprendeu a utilizar o fogo em várias situações: para suportar o frio do inverno, para cozinhar alimentos, para proteger-se de animais selvagens, etc. Hoje, as pessoas acendem fogueiras para se aquecer.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Noções de temperatura e calor

As sensações térmicas provocadas por uma xícara de café bem quente ou por um refrigerante bem gelado nos proporcionam as noções mais simples de temperatura: quente e frio. No dia a dia, é comum utilizarmos o tato para avaliar a temperatura dos corpos. Mas esse procedimento às vezes nos engana. Ao tocar com a mão uma porta de madeira e sua maçaneta de metal, temos sensações térmicas diferentes, mesmo que ambas estejam em **equilíbrio térmico** (mesma temperatura). Mas como são criadas tais sensações?

Qualquer corpo, seja sólido, líquido ou gasoso, é composto (em nível microscópico) de partículas em constante agitação (**figura 1.1**). O estado térmico desse corpo é definido pela intensidade de agitação dessas partículas (átomos, moléculas, íons, elétrons livres). Dependendo da intensidade, é possível dizer que um corpo está quente, frio, morno, etc.



Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 1.1 Representação (sem escala e em cores fantasia) da agitação das partículas que formam os sólidos, os líquidos e os gases.

Quando dois corpos, com diferença de temperatura, são colocados em contato, a energia é transferida em razão das colisões microscópicas das partículas que os constituem. A energia é transferida do corpo que possui maior grau de agitação média das partículas para o corpo com menor grau. Essa troca de energia termina quando as partículas dos dois corpos tiverem o mesmo grau de agitação média. Nessa situação final, dizemos que os corpos estão em **equilíbrio térmico**.

O **calor** é a quantidade de energia transferida durante esse procedimento.

> Fisicamente, quando falamos em calor, trata-se de um **processo**, e, quando falamos de temperatura, trata-se do **estado** de um corpo.

Por exemplo, é comum nos dias muito frios as pessoas esfregarem as mãos para aquecê-las. Nesse processo, a energia mecânica dissipada pelo atrito entre as mãos transforma-se em agitação térmica, isto é, as mãos recebem calor.

Voltando ao exemplo da porta de madeira com maçaneta de metal: por que os dois corpos, que estão em contato há muito tempo e, portanto, em equilíbrio térmico, nos causam sensações térmicas diferentes?

A menos que seja um dia muito quente, seu corpo estará com temperatura mais alta que os dois objetos (lembre-se de que nossa temperatura é 36,5 °C) e cederá calor para eles. O metal, contudo, por ser melhor condutor de calor que a madeira, retira energia com mais rapidez de nossas mãos, o que explica as sensações térmicas diferentes.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir
Nesse processo, qual é a fonte do calor?

Termômetros

Para medir e comparar temperaturas, utilizamos o **termômetro** (figura 1.2).



Figura 1.2 Termômetro com escala de −50 °C a 50 °C, muito utilizado em refrigeração (**a**) e termômetro clínico, usado para medir a temperatura do corpo humano (**b**).

A interpretação de suas medidas baseia-se no que se convencionou chamar de lei zero da Termodinâmica:

> Se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, então esses corpos estão em equilíbrio térmico entre si.

Podemos pensar no termômetro como o terceiro corpo mencionado pela lei zero. Se o termômetro apresenta a mesma leitura para dois corpos diferentes, então esses corpos estão em equilíbrio térmico. Em um terceiro modo de enunciar essa lei, podemos dizer: **dois corpos estão em equilíbrio térmico quando têm a mesma temperatura**.

Cada termômetro apresenta determinada escala de leitura. Na construção de um termômetro, primeiro é escolhida uma grandeza termométrica, ou seja, uma grandeza que varie com a temperatura. São exemplos de grandezas termométricas, o comprimento de uma coluna de mercúrio, o tamanho de uma barra de ferro, a pressão exercida por um gás em um recipiente de volume constante, etc.

Em seguida, o dispositivo é colocado em contato com dois estados térmicos diferentes. Antes de dar-se o equilíbrio térmico são atribuídos números representando cada um desses estados. Geralmente, os dois estados térmicos utilizados, denominados **pontos fixos**, são a fusão do gelo e a ebulição da água, ambos sob pressão de 1 atm (figura 1.3).

A relação entre a grandeza termométrica e a temperatura deve ser tal que a cada valor da grandeza corresponda uma única temperatura. A medida da temperatura de um corpo é feita, indiretamente, pelo efeito provocado na grandeza termométrica quando em equilíbrio térmico com o corpo.

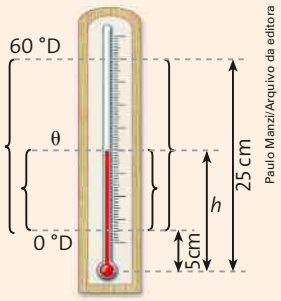


Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 1.3 Pontos fixos da água: os estados térmicos para calibragem da escala termométrica. Representações sem escala e em cores fantasia.

Exercício resolvido

1. Um aluno, de nome Daniel, resolveu criar uma escala termométrica (escala D) usando um velho termômetro de álcool colorizado com a escala totalmente apagada. Ele colocou o termômetro em equilíbrio térmico com gelo fundente e anotou a altura atingida pela coluna de álcool: 5,0 cm. A esse ponto ele atribuiu 0 °D. Em seguida, em equilíbrio térmico com água em ebulição sob pressão atmosférica normal, anotou a altura de 25 cm, atribuindo a esse ponto 60 °D. A figura ao lado resume essas medidas.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

a) Com o roteiro dos procedimentos de Daniel, é possível outra pessoa construir um termômetro que obedeça à mesma escala?

b) Utilizando-se das proporções, construa uma relação entre a altura da coluna de álcool e a temperatura na escala D. Faça o gráfico dessa relação.

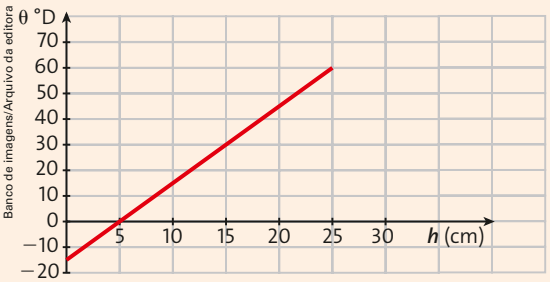
c) Utilizando a função obtida, qual será o valor da temperatura na escala D se a altura da coluna de álcool atingir o valor de 17 cm?

Resolução:

a) Sim. Sob pressão de 1 atmosfera, a pessoa pode seguir os procedimentos e construir um termômetro que apresentará as mesmas leituras que o de Daniel, quando em contato com as mesmas temperaturas.

b) A equação que relaciona a temperatura (θ_D) com a altura da coluna de álcool (h) pode ser obtida pela proporção:

$$\frac{\theta_D - 0}{60 - 0} = \frac{h - 5{,}0}{25 - 5{,}0} \Rightarrow \theta_D = \frac{60}{20}(h - 5{,}0)$$, portanto $\theta_D = 3h - 15$.



Banco de imagens/Arquivo da editora

c) Para $h = 17$ cm, temos:
$\theta_D = 3 \cdot 17 - 15 \Rightarrow \theta_D = 36$ °D

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

1. Um estudante dispõe de dois recipientes, *A* e *B*, contendo café e leite, respectivamente. O primeiro está preenchido com um terço do volume total, enquanto o segundo está preenchido até a metade. Usando um termômetro, esse estudante verifica que os dois líquidos estão à mesma temperatura. Em seguida, ele mistura os dois conteúdos em um terceiro recipiente termicamente isolado. **I.** E; **II.** C; **III.** E; **IV.** E; **V.** C. Julgue os itens a seguir em C (correto) e E (errado), anotando no caderno.

I. O estudante deve ter se enganado nas medidas, pois, como os volumes são diferentes, os líquidos não podem estar na mesma temperatura.

II. Antes que o estudante efetuasse a mistura, o café e o leite já estavam em equilíbrio térmico.

III. A mistura deve apresentar uma temperatura menor do que a dos componentes em recipientes individuais, pois tem volume maior.

IV. A mistura deve apresentar uma temperatura maior do que a dos componentes, pois corresponde a uma maior quantidade de energia.

V. A mistura deve resultar em café com leite numa temperatura igual à que tinham os seus componentes, pois eles já estavam em equilíbrio térmico.

2. (UEA-AM) Para saber se a temperatura do leite estava entre 40 °C e 45 °C, um fabricante de queijo utilizou um termômetro velho, cujos números de escala estavam apagados. Com o auxílio de um termômetro em boas condições fez duas marcas indicativas dessa região de temperatura no termômetro velho e, mantendo os dois termômetros sob mesma condição térmica, fez as seguintes medições:

Termômetro sem escala	Termômetro em boas condições
0 mm	0 °C
80 mm	40 °C
200 mm	100 °C

De acordo com essas medições, a região de temperatura que o queijeiro desejava tinha uma extensão, em mm, de

a) 20.
b) 16.
c) 12.
x d) 10.
e) 8.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

2 Escalas Celsius e Fahrenheit

A escala de temperatura adotada pela maioria dos países é a escala Celsius, elaborada em 1742 por Anders Celsius (1701-1744). Essa escala considera para o ponto de fusão do gelo o valor 0 e, para o ponto de ebulição da água sob pressão normal, o valor 100. O intervalo obtido entre os dois pontos fixos é dividido em cem partes iguais e cada parte corresponde à unidade da escala, denominada grau Celsius (°C).

A escala Fahrenheit foi construída em 1727 por Daniel G. Fahrenheit (1686-1736). Diferentemente de Celsius, ele utilizou como primeiro ponto fixo uma mistura frigorífica de água, gelo e um tipo de sal e atribuiu a ela o valor 0, e ao segundo ponto fixo, a temperatura do corpo humano, ele atribuiu o valor 96.

Ao projetarmos, na escala Fahrenheit, os pontos fixos escolhidos por Celsius, obtemos os seguintes valores: 32 para o ponto de fusão do gelo e 212 para o ponto de ebulição da água. Assim, na escala Fahrenheit, o intervalo entre esses dois pontos fixos é dividido em 180 partes (212 − 32). Cada parte corresponde à unidade da escala, denominada grau Fahrenheit (°F).

A conversão de temperaturas entre as escalas é feita por meio da comparação dos segmentos *a* e *b* da coluna termométrica que correspondem aos mesmos estados térmicos, independentemente das escalas utilizadas (**figura 1.4**).

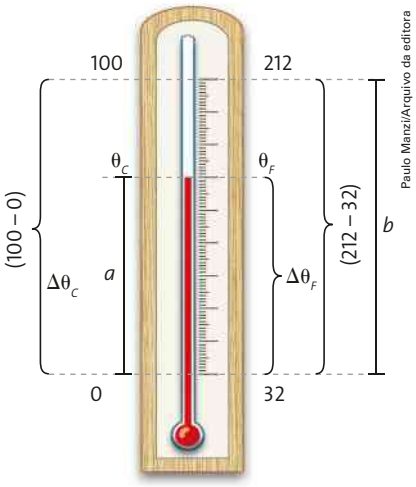


Figura 1.4 Esquema comparativo das escalas Celsius e Fahrenheit.

$$\frac{a}{b} = \frac{\Delta\theta_C}{100-0} = \frac{\Delta\theta_F}{212-32} \Rightarrow \frac{\Delta\theta_C}{100} = \frac{\Delta\theta_F}{180}$$

Da relação acima, obtemos:

$$\frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{\Delta\theta_F}{9}$$

Como $\Delta\theta_C = \theta_C - 0$ e $\Delta\theta_F = \theta_F - 32$, obtemos:

$$\frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{\Delta\theta_F - 32}{9}$$

A primeira expressão, $\frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{\Delta\theta_F}{9}$, é utilizada quando queremos comparar somente as variações de temperatura. Já a segunda expressão nos fornece diretamente a comparação entre as temperaturas propriamente ditas (**figura 1.5**).



Figura 1.5 Termômetro graduado nas escalas Celsius, à esquerda, e Fahrenheit, à direita.

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

Termômetro de máxima e mínima

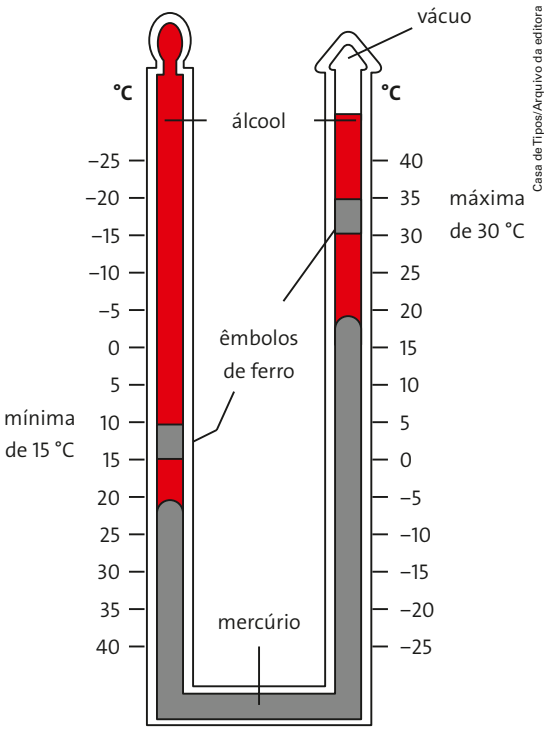
Qual teria sido a maior temperatura ontem? E a menor?

É claro que, se alguém passar o dia inteiro olhando para o termômetro e fazendo anotações, ele poderá lhe dar essa informação, mas não haveria uma forma automática de registrar isso?

Essa é a função do termômetro de máxima e mínima. Apresentar, para determinado período, os valores máximo e mínimo da temperatura. Normalmente, esse período é de um dia, mas pode ser qualquer outro.

Passado o período escolhido para a medição, faz-se os indicadores retornarem à temperatura ambiente, e inicia-se um novo intervalo.

A figura ao lado mostra um tradicional termômetro desse tipo. Ele foi inventado pelo inglês James Six em 1780.



Casa de Tipos/Arquivo da editora

A parte superior do ramo esquerdo do U é completamente preenchida com álcool líquido, inclusive o seu bulbo, e o ramo direito é parcialmente preenchido por esse mesmo líquido. A base do U é preenchida com mercúrio, que é um metal líquido nas temperaturas cotidianas. Nos dois ramos, há um pequeno êmbolo furado de ferro que flutua sobre o mercúrio e tem um pequeno atrito com as paredes.

Observe que a escala do ramo esquerdo cresce de cima para baixo. Caso a temperatura diminua, o pequeno êmbolo flutuante é empurrado para cima pelo mercúrio. Se a temperatura aumentar, o embolo lá permanece devido ao pequeno atrito com as paredes do tubo, mas o mercúrio é empurrado pela dilatação do álcool. Como o bulbo de álcool tem volume bem maior do que os capilares, é a dilatação do álcool que controla as indicações.

Já no ramo direito, a escala cresce de baixo para cima. O êmbolo sobe quando a temperatura aumenta e lá permanece se ela diminuir.

O vazio no bulbo direito não é vácuo perfeito, pois há uma diminuta pressão do vapor do álcool, mas permite a movimentação do filete de mercúrio e álcool.

Se o termômetro estiver bem calibrado e você olhar para ele em determinado instante, as leituras nos dois ramos terão o mesmo valor, mas as alturas das colunas de mercúrio serão, em geral, diferentes. Ou seja, ele serve também para medir a temperatura em qualquer momento, com a vantagem de os embolozinhos se fixarem na máxima e na mínima do período escolhido. Observe novamente a figura.

Para iniciar um novo período de leitura de máxima e mínima, deve-se levar de volta os êmbolos para o contato com o mercúrio, o que pode ser feito com um chacoalhão ou usando um pequeno ímã.

Atualmente, devido à sua toxicidade, o mercúrio é substituído por outras substâncias, e a produção em larga escala tornou os termômetros eletrônicos mais baratos, mas a invenção de Six nos serviu por mais de dois séculos.

1. Em relação à toxicidade do mercúrio, pesquise sobre o acidente em Minamata, no Japão, na década de 1950.

2. Considerando o termômetro da ilustração acima, qual é a temperatura atual que ele indica?

Cerca de 18 °C.

Exercício resolvido

2. Em determinado dia de verão na cidade de Nova York, a temperatura mínima foi de 68 °F e a máxima, de 95 °F.

a) Para ter uma noção se a mínima foi muito baixa ou a máxima foi muita alta, obtenha os valores dessas temperaturas na escala Celsius.

b) Qual foi a variação entre a temperatura mínima e a máxima, na escala Celsius?

Resolução:

a) Para a temperatura de 68 °F, temos:

$$\begin{cases} \frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9} \\ \theta_F = 68\ °F \end{cases} \Rightarrow \frac{\theta_C}{5} = \frac{68 - 32}{9} \Rightarrow \theta_C = 20\ °C$$

Para 95 °F, temos: $\frac{\theta_C}{5} = \frac{95 - 32}{9} \Rightarrow \theta_C = 35\ °C$

b) A variação pode ser obtida de dois modos: ou aproveitamos os resultados obtidos no item **a** – o que pressupõe que esses cálculos já estejam efetuados –, ou aplicamos à proporção que deduzimos para quando se quer apenas a variação, e não a temperatura em si.

$$\frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{\Delta\theta_F}{9} \Rightarrow \frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{95 - 68}{9} \Rightarrow \Delta\theta_C = 15\ °C$$

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

4. A temperatura externa era de 5 °C, portanto o traje escolhido pelo passageiro não foi adequado.

3. Paulo não está satisfeito com seu chuveiro e acha que ele está com defeito. Isso porque, para uma mesma vazão de água, no verão, a água é muito quente e, no inverno, é fria.

a) Supondo que, no verão, a água entra no chuveiro a 25 °C e sai a 45 °C, qual é a variação de temperatura provocada pelo chuveiro? $\Delta\theta = 20\ °C$

b) Nas mesmas condições, se no inverno a água entra a 10 °C no chuveiro, qual será a temperatura da água na saída? $\Delta\theta = 30\ °C$

c) Como você explicaria para Paulo que o chuveiro está funcionando normalmente e não apresenta defeito? Veja resposta no Manual do Professor.

4. Trinta minutos antes de aterrissar o avião, o comandante informou aos passageiros que a temperatura na cidade do desembarque era 41 °F. Um passageiro julgou se tratar de 41 °C e desembarcou de bermuda e camiseta. Calcule a temperatura da cidade na escala Celsius e explique se o passageiro estava com roupas adequadas para o clima da cidade.

5. Em Orlando, nos Estados Unidos, os guias orientam os turistas brasileiros que, para converter a temperatura de Fahrenheit para Celsius, basta subtrair 30 e dividir por 2. Se um termômetro indica 68 °F, qual o valor obtido pelo processo indicado pelo guia e qual o valor correto, em °C? $\theta_{guia} = 19\ °C$; $\theta_{correto} = 20\ °C$.

6. Na embalagem de um chuveiro elétrico, o fabricante informa que o modelo é capaz de produzir uma variação de temperatura de até 20 °C, para determinado fluxo de água. Esse modelo passará a ser exportado para um país em que é usada a escala Fahrenheit. Que informação o fabricante deverá imprimir na embalagem? Produz variação de 36 °F.

7. Marcos conversa com um amigo sobre um método prático para mudar da escala Fahrenheit para a Celsius, fazendo as contas de cabeça. Ele propõe a seguinte regra: dividir a temperatura em Fahrenheit por 2 e depois subtrair 15. Obtém-se a temperatura em grau Celsius com uma pequena margem de erro, mas que funciona bem para as temperaturas cotidianas.

a) Comparando a regra proposta por Marcos com a expressão exata, em que temperatura, na escala Fahrenheit, o erro usando a regra seria de 3 °C a mais? $T = -4\ °F$

b) Em que temperatura, na escala Fahrenheit, o erro usando a regra seria de 3 °C a menos? $F = 104\ °F$

c) Em que temperatura a regra daria a conversão exata? 50 °F = 10 °C

d) Qual é a faixa de temperatura, em grau Celsius, que a regra funciona com a margem de erro, em módulo, menor ou igual a 3 °C? Você acha que a expressão é utilizável?

Funciona bem entre −20 °C e 40 °C; logo, é uma boa aproximação.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

3 Kelvin, uma escala absoluta

A evolução tecnológica alcançada a partir da Revolução Industrial do começo do século XIX trouxe consigo algumas questões relacionadas aos processos de fundição que exigiam altas temperaturas. Uma delas foi: até que ponto seria possível aquecer um corpo?

A experiência vem mostrando, cada vez mais, que não há limite para isso. Temperaturas de algumas centenas de graus Celsius, consideradas altas há cem anos, tornam-se insignificantes diante do conhecimento de outras, como, por exemplo, as de algumas dezenas de milhões de graus Celsius no interior das estrelas.

E até que ponto seria possível resfriar um corpo? Para responder a essa pergunta, veremos mais sobre o conceito de pressão e sua relação com a temperatura.

O físico e matemático irlandês William Thomson (1824-1907), homenageado com o título de lorde Kelvin, estudou o comportamento dos gases. Ele verificou que todos os gases – na faixa em que podemos considerá-los gases ideais – se dilatam numa mesma proporção, em relação ao volume inicial, quando se mantêm sob pressão constante.

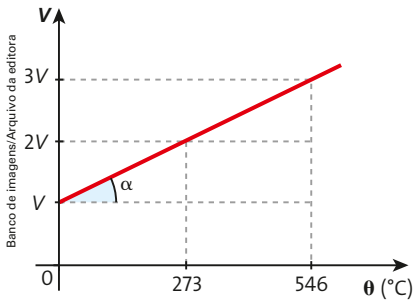
As escalas em que Kelvin fez sua análise eram as disponíveis na época, como a Celsius, por exemplo. O gráfico da **figura 1.6** ilustra uma parte da sua análise. À medida que aumenta a temperatura do gás, seu volume também aumenta. Reciprocamente, à medida que diminui a temperatura do gás, seu volume também diminui.

Até que ponto é possível diminuir o volume de um gás? Até que ele fique nulo. Essa discussão nos leva a uma concepção da estrutura da matéria – em particular, dos gases – junto com o conceito de temperatura. Qualquer porção de matéria, seja ela sólida, líquida, seja gasosa, é composta de moléculas, átomos, íons, elétrons livres, que chamaremos simplesmente de partículas, em constante agitação. A partícula representa a menor parte que conserva as mesmas propriedades químicas da matéria. Considerando certa substância sob determinada pressão, a agitação dessas partículas (**figura 1.7**) é mais intensa nos gases do que nos líquidos, e nos líquidos é mais intensa do que nos sólidos.

Para um mesmo estado físico, a agitação molecular está intimamente relacionada à temperatura. Como vimos, uma temperatura mais alta indica maior agitação molecular e, portanto, maior energia cinética média. Assim, a menor temperatura possível é aquela em que a energia cinética média é nula. As partículas estariam em repouso, e então, nessa temperatura, o volume livre entre as partículas também seria nulo.

Retomemos o gráfico visto na **figura 1.6** e vamos analisar a região em que a temperatura, na escala Celsius, é negativa (**figura 1.8**).

Comportamento do volume de um gás em função da temperatura sob pressão constante



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 1.6

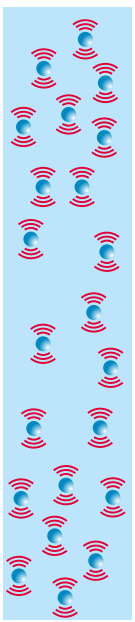
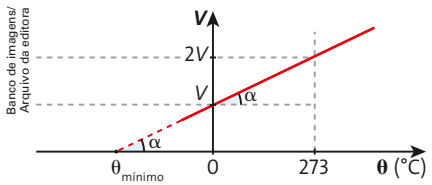

Formato/Arquivo da editora

Figura 1.7
Representação (sem escala e em cores fantasia) de partículas em agitação térmica.

Variação do volume de um gás em relação à temperatura sob pressão constante



Banco de imagens/ Arquivo da editora

Figura 1.8

Observe que a inclinação da reta (coeficiente angular) é:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta \theta} \Rightarrow m = \frac{2V - V}{546 - 273}$$

Portanto, $m = \frac{V}{273}$

O ponto em que a reta intercepta o eixo das abscissas é o ponto que corresponde a um volume nulo. A temperatura referente a esse ponto é obtida por:

$$m = \frac{V}{273} = \frac{V - 0}{0 - \theta_C} \Rightarrow \theta_C = -273\ °C$$

A esse ponto, −273 °C, conhecido como zero absoluto, que corresponde ao limite inferior de temperatura, Kelvin atribuiu o valor zero de sua escala (0 K = −273 °C). Estava assim determinada, teoricamente, a menor temperatura possível. Para construção de uma verdadeira escala de temperaturas – uma escala absoluta –, faltava escolher o tamanho do grau. No caso da escala Kelvin escolheu-se o tamanho de divisão que possui a escala Celsius.

Pela própria definição, uma variação de *x* unidades na escala Kelvin corresponde a uma variação de *x* unidades na escala Celsius. Assim, qualquer variação de temperatura é representada pelo mesmo valor nas duas escalas, Celsius e Kelvin. A **figura 1.9** representa a comparação entre as escalas Celsius e Kelvin, com relação às temperaturas e às variações de temperatura.

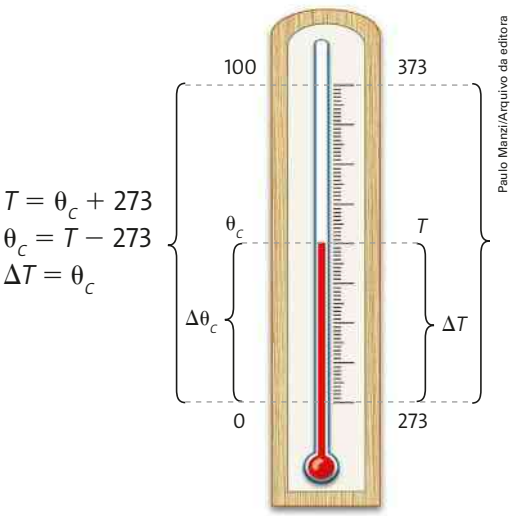


Figura 1.9 Esquema comparativo das escalas Celsius e Kelvin.

Podemos, finalmente, relacionar as três escalas mais utilizadas, Celsius, Fahrenheit e Kelvin (**figura 1.10**):

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_C - 32}{9} = \frac{T - 273}{5}$$

Se considerarmos apenas as variações de temperatura, temos:

$$\frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{\Delta\theta_F}{9} = \frac{\Delta T}{5}$$

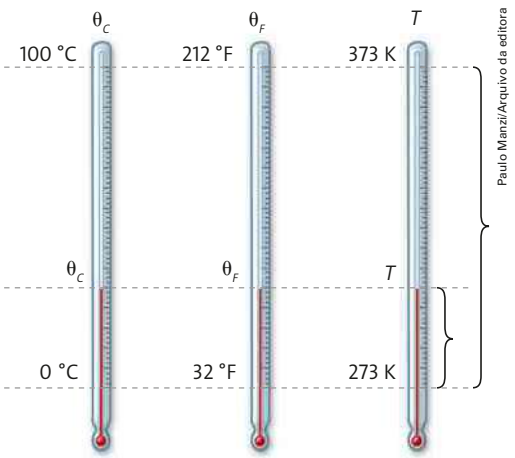


Figura 1.10 Pontos de fusão e ebulição da água, sob pressão atmosférica normal, para as escalas Celsius (**C**), Fahrenheit (**F**) e Kelvin (**K**).

Observações:

- O zero absoluto é inacessível na prática. Pode-se chegar bastante perto, mas quanto mais próximo dessa temperatura, mais difícil fica para o corpo ceder energia térmica, pois essa transferência se faria para outro corpo cujo grau médio de agitação das partículas fosse menor.
- Frio não existe como grandeza física. Um corpo esfria quando cede calor. Se um corpo pudesse receber frio, não existiria um limite inferior para a temperatura.
- É possível obter outras escalas absolutas trabalhando-se com tamanhos de divisões diferentes do da escala Celsius, mas o zero será o mesmo para todas elas.

Exercício resolvido

3. Uma das exigências feitas ao Reino Unido por ocasião da formação da União Europeia foi a adoção do Sistema Internacional de Unidades (SI). Temporariamente, convivem no Reino Unido o sistema antigo e o SI. Há séculos acostumados com seu sistema de unidades, os ingleses irão aos poucos absorvendo o SI e em breve, provavelmente, a escala Fahrenheit deixará de existir. Talvez um dia fiquemos somente com a escala Kelvin, uma "verdadeira" escala de temperaturas. Imagine sua mãe dizendo: "Leve um agasalho, pois a temperatura vai baixar. A TV anunciou 280 K". Verifique se o conselho procede, utilizando como referência a escala Celsius.

Resolução:

Para transformar da escala Kelvin para a Celsius, temos:

$$\theta_C = T - 273 \Rightarrow \theta_C = 280 - 273 \Rightarrow \theta_C = 7\ °C$$

O conselho procede, pois a temperatura estará em 7 °C, um valor que exige um agasalho.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

8. Com o advento da escala absoluta de temperaturas, houve uma proposta para que o tamanho das divisões da nova escala fosse baseado na escala Fahrenheit. De fato, essa escala chegou a ser construída e denominada escala absoluta de Rankine, hoje em desuso. Nessa escala *R*, quantas divisões há, aproximadamente, entre a temperatura de fusão do gelo e o zero absoluto? 491

9. Mercúrio é o planeta que sofre a maior variação de temperatura no sistema solar. A temperatura na parte iluminada pelo Sol chega a 400 °C, enquanto no lado escuro a temperatura cai a −200 °C.

a) Expresse esses valores na escala Kelvin. 673 K; 73 K.

b) De quanto é essa variação de temperatura na escala Kelvin? 600 K

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir

Como você explica a "folga" entre os pisos, conforme mostra a figura abaixo?



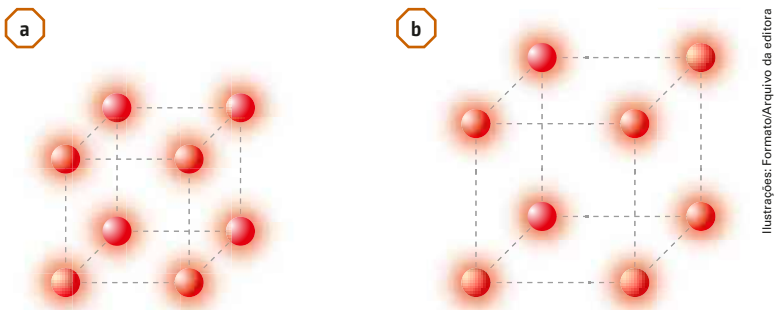
João Prudente/Pulsar Imagens

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

4 Dilatação térmica de sólidos

Quando você passar por uma ponte ou um viaduto, poderá observar pequenos vãos preenchidos com piche. Esses vãos existem para permitir a dilatação térmica das estruturas.

A dilatação térmica estuda as variações no comprimento de uma barra, na área de uma placa, no volume de um líquido, ou em outra grandeza qualquer, provocadas por variações de temperatura (figura 1.11).



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

Figura 1.11 Elemento da rede cristalina à temperatura θ_0 (**a**); o mesmo elemento à temperatura $\theta > \theta_0$ (**b**). O espaçamento entre as partículas aumentou. Representações sem escala e em cores fantasia.

Genericamente, chamamos o fenômeno de **dilatação térmica**, mas a variação de comprimento também pode ser negativa, isto é, as reduções de temperatura levam, em geral, a uma **contração térmica**.

A dilatação térmica pode ser verificada experimentalmente. Por exemplo, na figura 1.12 vemos um sólido, inicialmente a uma temperatura θ_0, e a seguir o mesmo sólido, um pouco mais quente, numa temperatura θ. É certo que todo sólido sofre variação nas três dimensões (comprimento, largura e altura), mas aqui a maior diferença foi a da variação do comprimento L do sólido, a que chamamos de **dilatação térmica linear**.

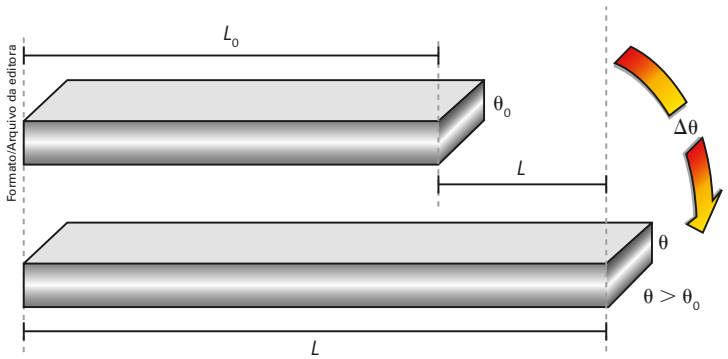


Figura 1.12 Representação exagerada da dilatação térmica do comprimento de uma barra.

Experimentalmente, verifica-se que a dilatação térmica linear ΔL sofrida pela barra é diretamente proporcional ao comprimento inicial da barra L_0 e à variação da temperatura $\Delta\theta$:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta$$

Nessa expressão, α é uma constante, denominada **coeficiente de dilatação linear**, característica do material constituinte do sólido.

O comprimento final do sólido é dado por:

$$L = L_0 + \Delta L \text{ ou } L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

A tabela 1.1 apresenta os valores médios dos coeficientes de dilatação linear de alguns materiais sólidos, para temperaturas em torno de 20 °C.

Embora a dilatação térmica seja relativamente pequena em relação ao comprimento inicial da barra, os esforços estruturais provocados por uma dilatação não prevista são muito intensos. Vejamos alguns exemplos do uso dessas "folgas", chamadas juntas de dilatação:

- Nas construções, para evitar acidentes por causa da dilatação térmica dos materiais. Geralmente, essas folgas são preenchidas com material deformável (madeira, piche, etc.).

Tabela 1.1 Valores médios dos coeficientes de dilatação linear de alguns materiais sólidos

Material	α (°C^{-1})
porcelana	$3 \cdot 10^{-6}$
cobre	$17 \cdot 10^{-6}$
vidro pirex	$3 \cdot 10^{-6}$
latão	$19 \cdot 10^{-6}$
vidro comum	$8 \cdot 10^{-6}$
alumínio	$22 \cdot 10^{-6}$
platina	$9 \cdot 10^{-6}$
zinco	$26 \cdot 10^{-6}$
ferro	$12 \cdot 10^{-6}$
concreto	$12 \cdot 10^{-6}$
chumbo	$27 \cdot 10^{-6}$
amálgama	$12 \cdot 10^{-6}$
dente	$12 \cdot 10^{-6}$

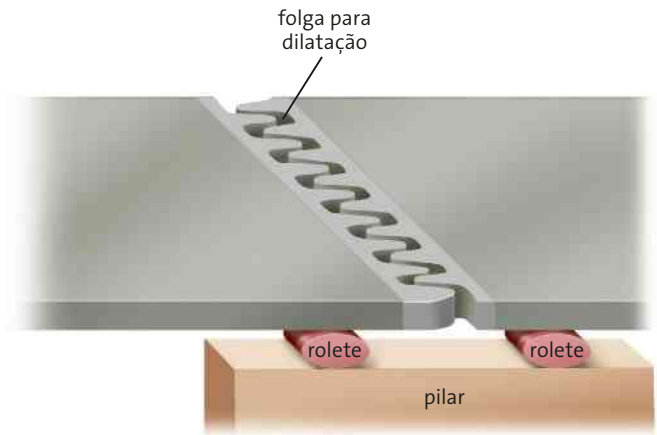
Fonte: Kaye & Laby Online. *Tables of Physical & Chemical Constants*. 16. ed. Disponível em: <www.kayelaby.npl.co.uk>. Acesso em: abr. 2016.

- Nos trilhos de uma ferrovia, que podem ficar retorcidos caso não se previna a dilatação. A compressão entre os elementos que compõem a via fica tão intensa que acaba por deslocar ou retorcer os trilhos de aço. Para prevenção, também são utilizadas "folgas" entre os trilhos (figura 1.13).



Eugene Sergeev/Shutterstock/Glow Images

Figura 1.13 Folga entre os trilhos para permitir a dilatação térmica sem tensões.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 1.14 Representação (sem escala e em cores fantasia) das juntas de dilatação usadas na construção de pontes, viadutos ou vigas concretadas de grande extensão.

- Em pontes, viadutos ou vigas concretadas de grande extensão, deixam-se os extremos da estrutura apoiados sobre roletes que dão liberdade ao movimento devido à dilatação térmica (figura 1.14).

Quando um corpo não é aquecido igualmente, algumas partes dilatam-se mais que outras, provocando tensões e, eventualmente, a ruína da estrutura sólida, como no caso de um copo que se quebra ao receber café muito quente. Aumentar a espessura da parede do copo não resolve, uma vez que isso só faz aumentar as diferenças de temperatura entre as várias partes do vidro. Para diminuir o problema, convém reduzir a espessura das paredes do copo, o que propicia um aquecimento mais uniforme, com menor possibilidade de ruptura térmica, embora sacrifique a resistência mecânica.

O rompimento de grandes rochas, antes da invenção e do uso da dinamite, era feito por meio do aquecimento irregular em uma dilatação térmica. Fazia-se uma fogueira sobre a rocha, numa pequena região, para provocar o aquecimento localizado. Se isso não fosse suficiente, jogava-se água fria na rocha para aumentar os desníveis de temperatura e os esforços por eles provocados.

Quando queremos apertar ou soltar uma rosca entre materiais diferentes, aquecemos ou resfriamos o conjunto, conforme a relação entre os coeficientes de dilatação, com a intenção de gerar uma folga entre os elementos. Abrimos, assim, com mais facilidade, tampas metálicas de recipientes de vidro, por exemplo.

No aquecimento dos motores de combustão interna, os pistões de alumínio ficam mais justos dentro da camisa de aço, pois o alumínio possui maior coeficiente de dilatação que o aço.

Em estruturas sujeitas a muitas variações térmicas o ideal é usar materiais que tenham o mesmo coeficiente de dilatação. É o caso, por exemplo, do ferro e do concreto, que dilatam-se em conjunto e contraem-se também em conjunto, sem que a dilatação ou contração provoque esforços estruturais. A mesma propriedade é observada entre o amálgama, material que era usado nas obturações dentárias, e o dente (**figura 1.15**).

Já o uso de materiais de coeficientes de dilatação diferentes possibilita a construção de contatos elétricos automáticos – que se desligam quando muito quentes e ligam novamente ao esfriar – como se observa nas lâminas bimetálicas.

Observe um arranjo que se constitui de duas lâminas de materiais diferentes, sobrepostas e solidárias (**figura 1.16**). Quando aquecidas, as lâminas se dilatam. Como cada material tem um coeficiente de dilatação e as lâminas estão interligadas, os esforços que surgem com o aquecimento encurvam o conjunto para o lado da lâmina de menor coeficiente de dilatação linear. O aquecimento das lâminas ocorre pela passagem de corrente elétrica, que fica interrompida quando as lâminas se curvam. Com a interrupção da corrente elétrica, as lâminas esfriam e refaz-se o contato. Esse é o princípio de funcionamento do pisca-pisca, por exemplo.

Podemos observar também esse efeito nos ferros elétricos automáticos. A passagem da corrente elétrica aquece as lâminas, que se encurvam. Ao ser atingida uma temperatura previamente estabelecida, o parafuso (**figura 1.17**) passa a impedir o processo de uma das lâminas, enquanto a outra continua se encurvando até que a corrente elétrica seja interrompida. A partir daí, as lâminas esfriam e voltam à posição original.



Lighthunter/Shutterstock/Glow Images

Figura 1.15 Dente restaurado com amálgama.

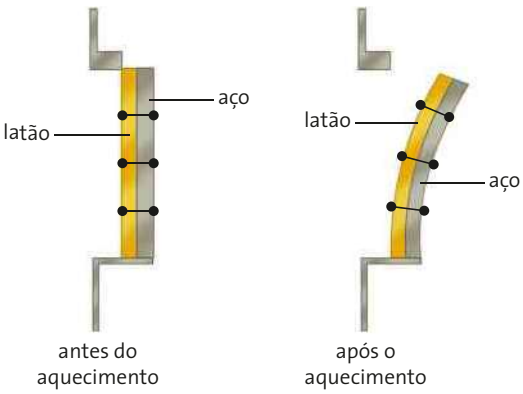
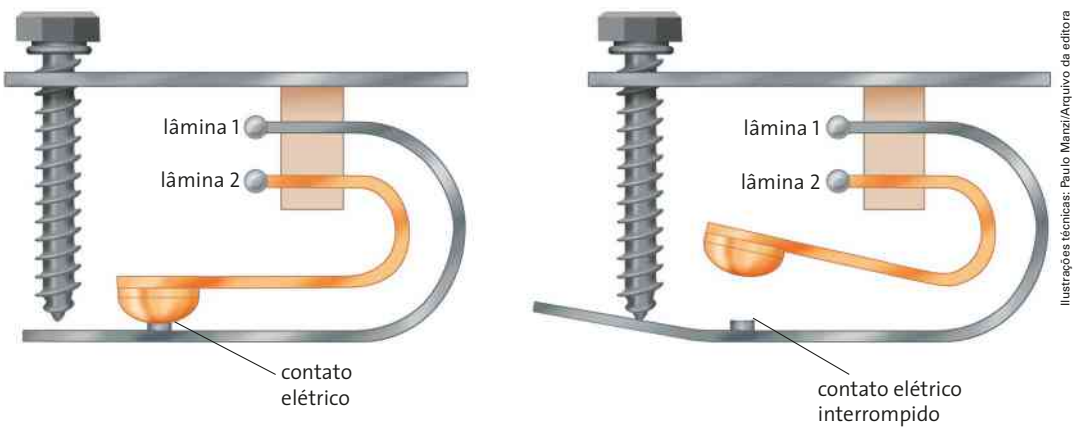


Figura 1.16 Arranjo de lâminas bimetálicas (de materiais diferentes), que interrompem um contato elétrico ao se aquecerem. Representação sem escala e em cores fantasia.

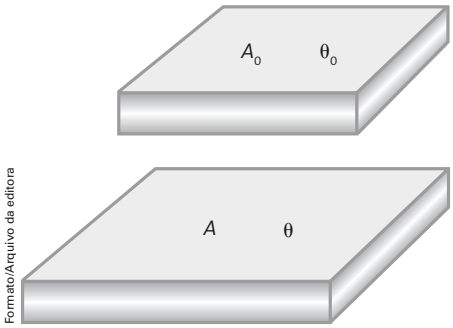


Ilustrações técnicas: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 1.17 Lâminas bimetálicas interrompendo um contato elétrico ao se aquecerem. Representação sem escala e em cores fantasia.

Dilatação superficial

A figura 1.18 mostra uma chapa retangular, a uma temperatura θ_0. Depois de aquecida, a chapa atinge a temperatura θ. Houve variação nas dimensões da placa, mostradas com exagero proposital.



Formato/Arquivo da editora

Figura 1.18 Aquecimento de uma chapa retangular. Propositadamente, as dilatações estão mostradas com exagero.

Na temperatura θ_0, a área da chapa é A_0 e, na temperatura θ, a área é A. Experimentalmente, verifica-se que a dilatação térmica superficial ΔA sofrida pela chapa é diretamente proporcional à área inicial da chapa A_0 e à variação da temperatura $\Delta\theta$:

$$\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta$$

Nessa expressão, β é uma constante, denominada **coeficiente de dilatação superficial**, característica do material constituinte do sólido, e obedece à relação:

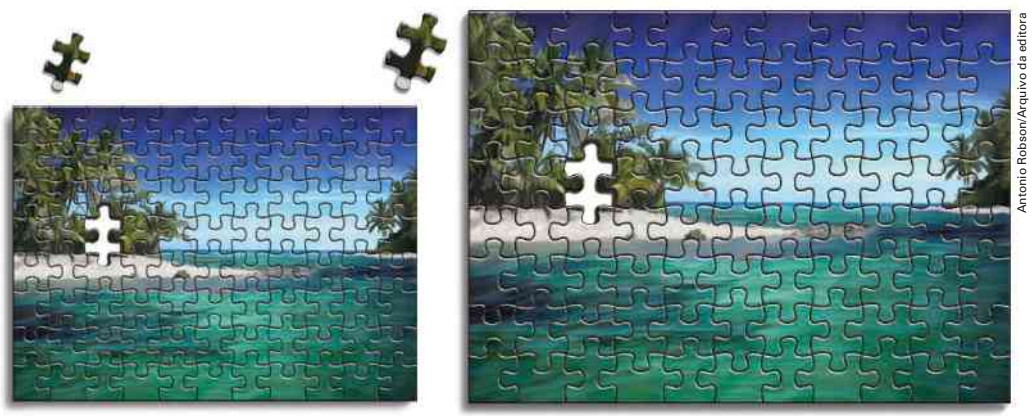
$$\beta = 2\alpha.$$

A área final da placa é dada por:

$$A = A_0 + \Delta A \text{ ou } A = A_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta\theta)$$

Dilatação de furos

Quando aquecemos um sólido, os furos que ele por acaso tiver se dilatarão como se fossem do mesmo material. Vamos imaginar uma chapa sobre a qual foi desenhado um quebra-cabeça, com destaque para uma das peças da região central (figura 1.19). A peça destacada e as restantes podem ser aquecidas isolada ou conjuntamente, desde que ao final todas tenham a mesma temperatura.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 1.19 Depois de aquecido o conjunto, a peça destacada continua encaixando perfeitamente. O furo se dilatou como se fosse a peça faltante.

Dilatação volumétrica

A dilatação volumétrica ΔV corresponde à variação do volume de um sólido quando submetido a uma variação de temperatura $\Delta\theta$. Assim, um sólido que apresente volume V_0, à temperatura θ_0, e volume V, à temperatura $\theta > \theta_0$, apresenta uma variação de volume ΔV diretamente proporcional ao volume inicial V_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Nessa expressão, γ é uma constante, denominada **coeficiente de dilatação volumétrica**, característica do material constituinte do sólido, e que obedece à relação:

$$\gamma = 3\alpha$$

O volume final do sólido é dado por:

$$V = V_0 + \Delta V \text{ ou } V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)$$

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercícios

10. Os trilhos de uma ferrovia foram assentados em um dia frio de inverno sob temperatura de 0 °C. Precavido, o engenheiro instruiu os operários para deixarem uma folga de 9,0 mm entre trilhos consecutivos. O comprimento de cada trilho é 10,00 m, e o coeficiente de dilatação linear do aço é $1{,}2 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$. Analise as afirmações a seguir e classifique-as, em seu caderno, como falsas ou verdadeiras.

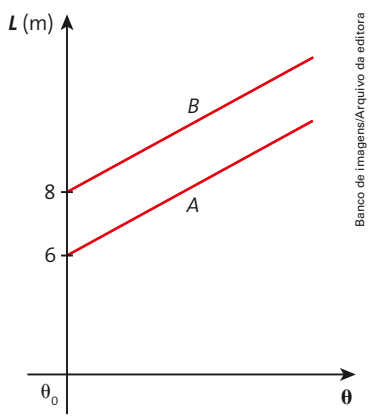
I. Quando a temperatura ambiente atingir 25 °C, a folga entre os trilhos vai diminuir para 6,0 mm.

II. A folga entre os trilhos permanece constante, qualquer que seja a temperatura.

III. Os trilhos irão se tocar se, devido à exposição ao sol ou ao atrito com as rodas do trem, a temperatura deles atingir 75 °C.

I. Verdadeira.
II. Falsa.
III. Verdadeira.

11. Estudando a variação do comprimento de duas barras, *A* e *B*, em função da temperatura, um estudante constrói o gráfico ilustrado a seguir. Ele observa, então, que as duas retas obtidas são paralelas.



Banco de imagens/Arquivo da editora

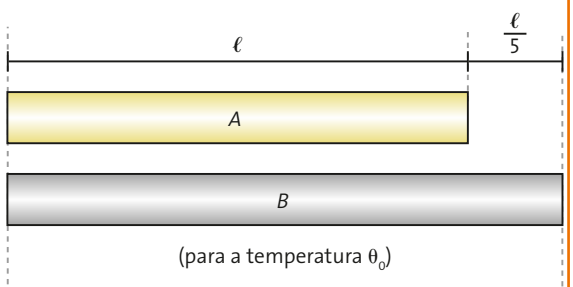
Com base no gráfico, responda às questões:

a) A diferença entre os comprimentos das duas barras aumenta, diminui ou permanece constante com o aumento da temperatura? Justifique.

b) Determine a razão entre os coeficientes de dilatação linear dos materiais que constituem as barras *A* e *B*. $\frac{4}{3}$

11. a) Permanece constante, pois no gráfico temos retas paralelas.

12. A diferença entre os comprimentos de duas barras metálicas de materiais diferentes se mantém constante, qualquer que seja a temperatura, em determinado intervalo, conforme ilustra a figura seguinte.



Qual das barras tem maior coeficiente de dilatação linear? A barra menor.

13. A cobertura de uma garagem foi feita com chapas retangulares de zinco que apresentam, a 20 °C, comprimento de 40,0 cm e largura de 25,0 cm. Em que temperatura as placas terão 2% de acréscimo em suas áreas? Utilize a **tabela 1.1** para o coeficiente de dilatação linear do zinco. $T = 405\ °C$

14. Um corpo de volume inicial V_0 sofre uma dilatação de 1%, quando sua temperatura aumenta de 40 °C. Qual é o coeficiente de dilatação linear do corpo?

$\alpha = 8{,}3 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

5 Dilatação térmica de líquidos

Enquanto os sólidos possuem forma própria e volume definido, os líquidos têm somente volume definido. Por isso, o estudo da dilatação térmica dos líquidos é feito somente em relação à dilatação volumétrica.

Para se verificar experimentalmente a dilatação de um líquido é preciso colocá-lo dentro de um recipiente. Assim, quando aquecemos o sistema, tanto o líquido como o recipiente se dilatam. Portanto, na dilatação de um líquido, devemos considerar a **dilatação real** do líquido, a **dilatação aparente** do líquido e a **dilatação do recipiente**.

Dilatação real

Assim como nos sólidos, a dilatação volumétrica ΔV de um líquido é diretamente proporcional ao volume inicial do líquido V_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta\theta$$

Nessa expressão, γ é o coeficiente de dilatação real do líquido (tabela 1.2). Os valores se referem a temperaturas próximas de 20 °C.

Tabela 1.2 Coeficiente de dilatação real de alguns líquidos

Líquidos	γ ($°C^{-1}$)
água	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$
mercúrio	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$
glicerina	$4{,}9 \cdot 10^{-4}$
benzeno	$10{,}6 \cdot 10^{-4}$
álcool etílico	$11{,}2 \cdot 10^{-4}$
acetona	$14{,}9 \cdot 10^{-4}$

Fonte: Kaye & Laby Online. *Tables of Physical & Chemical Constants*. 16. ed. Disponível em: <www.kayelaby.npl.co.uk>. Acesso em: abr. 2016.

Dilatação aparente

Quando aquecemos o líquido, estamos também aquecendo o recipiente, que se dilata. Assim, a dilatação que medimos na prática é denominada **dilatação aparente**. Para calcular a dilatação real, devemos acrescentar à dilatação aparente a dilatação sofrida pelo frasco. Observe a figura 1.20, em que ilustramos um frasco com sua extremidade superior fixa.

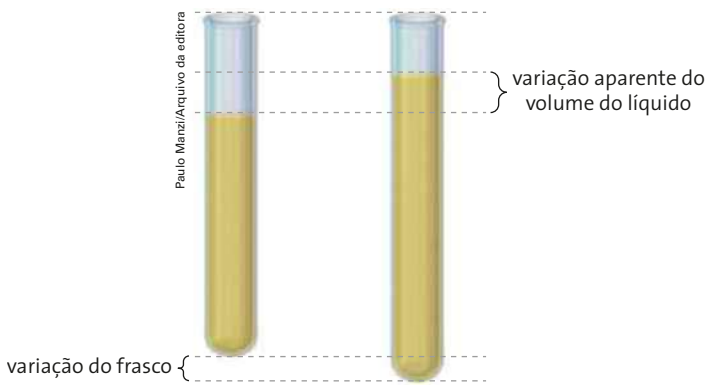


Figura 1.20 Dilatação de um líquido no interior de um recipiente que também se dilata. Representação sem escala e em cores fantasia.

Podemos, então, escrever:

$$\Delta V_{real} = \Delta V_{aparente} + \Delta V_{recipiente}$$

De acordo com a lei da dilatação volumétrica:

$$V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta\theta = V_0 \cdot \gamma_{ap} \cdot \Delta\theta + V_0 \cdot \gamma_{rec} \cdot \Delta\theta$$

Após as simplificações, obtemos:

$$\gamma = \gamma_{ap} + \gamma_{rec}$$

Observações:

- Conforme é possível verificar comparando-se as **tabelas 1.1** e **1.2**, em geral os líquidos têm coeficiente de dilatação volumétrica maior que os sólidos; portanto, para um mesmo volume e mesma temperatura iniciais, os líquidos dilatam-se mais que os recipientes que os contêm.
- Quando o líquido transborda, para pequenas variações de temperatura, admite-se que todo o líquido que transbordou esteja na mesma temperatura final do líquido que ficou no frasco.

Dilatação irregular da água

Algumas substâncias, com destaque para a água, apresentam um comportamento irregular em relação às variações térmicas em determinadas faixas de temperatura. No intervalo de temperaturas entre 0 °C e 4 °C, o aumento de temperatura provoca uma contração no volume da água.

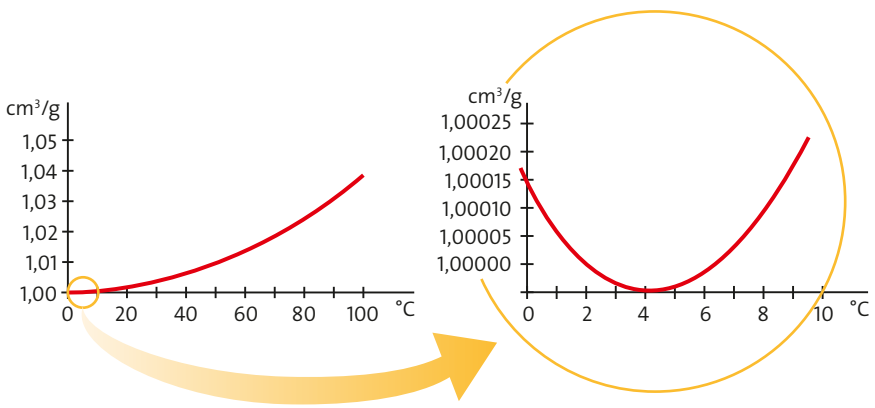
Esse fato se deve essencialmente ao tipo de ligação que as partículas apresentam entre si. A água em sua fase sólida possui uma **rede cristalina** com grandes vazios entre as partículas. Esses vazios são tão grandes que podem chegar a conter moléculas de outras substâncias. Como consequência, a fusão do gelo resulta numa redução de volume de cerca de 10%. Inversamente, a solidificação da água acarreta um aumento no volume.

O gelo é, portanto, menos denso que a água e, por essa razão, ele flutua sobre ela. Entretanto, esse comportamento **atípico** não termina com a fusão do gelo, ou seja, 0 °C, sob pressão normal. Mesmo na fase líquida, a água ainda tem resquícios da formação cristalina com espaços vazios, e até a temperatura de 4 °C, a água continua a sua contração, atingindo nessa temperatura seu volume mínimo (a rigor, o volume mínimo da água ocorre à temperatura de 3,982 °C). Alguns físicos denominam essa fase mista de quase cristal.

A partir de 4 °C começa a prevalecer a dilatação térmica, e a água passa então a se comportar como a maioria das substâncias.

Essa "teimosia" que as moléculas de água têm em sua formação espacial deve-se às forças originadas nas pontes de hidrogênio, aliadas à geometria angular que a molécula de água possui. Os gráficos da **figura 1.21** ilustram essa discussão, apresentando, em vez da densidade, o volume ocupado por grama de água, chamado de volume específico, em função da temperatura.

Volume específico da água em função da temperatura



Banco de imagens/Arquivo da editora

Fonte: TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. (Coleção Física 2. Gravitação, Ondas e Termodinâmica).

Figura 1.21 Volume de 1 g de água sob pressão atmosférica.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir

Por que uma garrafa cheia com água, ou qualquer outro líquido com grande quantidade de água em sua composição (refrigerantes, sucos, etc.), colocada no congelador pode quebrar?



YouTouch Pix /Shutterstock/Glow Images

Rompimento de garrafa com água esquecida no congelador.

Rede cristalina – Arranjo estrutural dos íons que constituem o corpo.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir
Nas regiões mais frias de nosso planeta, a chegada do inverno provoca o congelamento da superfície dos lagos, mas por que não de suas profundezas?

A água na fase líquida e próxima de 0 °C é menos densa do que as porções de água que estão próximas de 4 °C, por isso tende a migrar para a superfície. O resultado é que o lago começa a congelar pela parte de cima. Como o gelo é um mau condutor de calor, a água que está abaixo dele passa a ceder menos calor para o ambiente, garantindo a manutenção da vida aquática até a chegada da primavera.

A água, com esse comportamento atípico, além de manter o clima, também mantém a vida nas regiões frias. Não fosse essa particularidade, a vida em nosso planeta teria se extinguido por completo durante o período de glaciação.

Nosso planeta tem cerca de 75% de sua superfície coberto pela água. Mas mesmo com essa abundância hídrica, existe a possibilidade de falta de água potável na Terra, o que já é um grande problema a ser combatido no século XXI.

Exercício resolvido

4. No laboratório, para determinar o coeficiente de dilatação real de um líquido, um estudante utiliza um frasco graduado de vidro e nele coloca 500 cm^3 desse líquido. Inicialmente, tanto o frasco quanto o líquido estão à temperatura ambiente de 20 °C. Quando o conjunto é aquecido até 120 °C, o estudante observa que a graduação do frasco acusa um volume de 510 cm^3 de líquido.

a) Qual foi, aparentemente, a variação no volume do líquido?

b) Qual é o coeficiente de dilatação aparente do líquido?

c) Qual é o coeficiente de dilatação real do líquido, supondo que o coeficiente de dilatação linear do vidro vale $9 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$?

Resolução:

a) A variação aparente no volume do líquido é:

$$\Delta V_{ap} = (510 - 500)\ cm^3 = 10\ cm^3$$

b) Como $\Delta V_{ap} = V_0 \cdot \gamma_{ap} \cdot \Delta_\theta$, temos:

$$10 = 500 \cdot \gamma_{ap} \cdot 100 \Rightarrow \gamma_{ap} = 2{,}0 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$$

c) O coeficiente de dilatação real do líquido é dado por: $\gamma = \gamma_{ap} + \gamma_{rec}$

Logo: $\gamma = 2{,}0 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \Rightarrow \gamma = 2{,}27 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

15. Um caminhão-pipa encheu seu tanque de 10 000 litros em Salvador, à temperatura de 35 °C, com um líquido cujo coeficiente de dilatação volumétrica era $0{,}80 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$. Esse líquido foi transportado para Caxias do Sul, onde a temperatura era de 10 °C. Quantos litros foram descarregados em Caxias do Sul? 9 800 litros.

16. Ao analisar determinado líquido no laboratório, um estudante verifica que esse líquido está quase transbordando de um béquer de vidro de 450 cm^3 a 20 °C. O conjunto é então aquecido até 100 °C e verifica-se que transbordam 9 cm^3 do líquido.

a) Qual é o coeficiente de dilatação volumétrica aparente do líquido? $\gamma_{ap} = 2{,}5 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$

b) O coeficiente de dilatação volumétrica real do líquido é menor ou maior do que o encontrado no item anterior? Maior.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

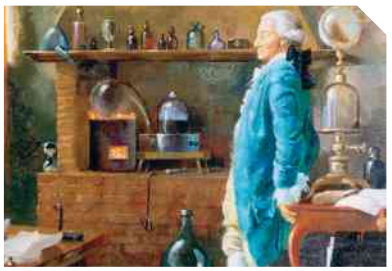
6 Transmissão da energia térmica

Física tem História

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

Evolução do conceito de calor

Desde tempos remotos, os humanos procuram entender as sensações de quente e frio. Para os gregos antigos, o calor e o frio seriam as causas da evolução do mundo. A Idade Média pouco contribuiu para a evolução dos conhecimentos a respeito do calor. Mas, a partir da construção do primeiro termômetro por Galileu Galilei (1564-1642), em 1593, foi possível compreender várias propriedades térmicas dos materiais.



Prisma Archivo/Alamy/Other Images

Retrato de Antoine Laurent Lavoisier. (1743-1794).

No final do século XVII, a ideia de que o fogo era um dos elementos básicos da natureza, assim como a terra, a água e o ar, ainda encontrava adeptos. No início do século XVIII, o médico alemão Georg Ernst Stahl (1660-1734) lançou a ideia do **flogístico**, uma substância que os corpos ganhariam ao serem aquecidos e perderiam ao serem resfriados. Essa teoria foi derrubada pelos trabalhos de Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), que estabeleceu as bases para a teoria do calórico.

Para Lavoisier, o **calórico** seria uma substância fluida, invisível, presente em grande quantidade nos corpos quentes e em pequena quantidade nos corpos frios. Ao colocar dois corpos em contato, um quente e outro frio, o quente cederia calor para o mais frio até que suas temperaturas se igualassem.

Em 1798, Benjamin Thompson (1753-1814), conhecido como conde de Rumford, observando o aquecimento das brocas utilizadas na fabricação de canhões, propôs uma explicação sobre o calor com base no trabalho mecânico realizado pelas forças de atrito.

No início do século XIX, com os trabalhos de Lavoisier e Rumford, a ideia de calor como forma de energia começou a tomar figura. Em 1842, Julius Robert von Mayer (1814-1878) calculou a equivalência do trabalho mecânico em calor, a partir de uma expansão gasosa. Mas coube a James Prescott Joule (1818-1889) estabelecer de forma clara que o calor é uma forma de energia e determinar o equivalente mecânico de calor.

1. O calor, como forma de energia, tem capacidade de realizar trabalho?
2. Qual a diferença básica entre os conceitos de calor estabelecidos por Stahl, Lavoisier e Joule?

Quando colocamos uma blusa (ou duas) nos dias muito frios, estamos reduzindo a taxa de perda de calor do nosso corpo para o ambiente. Inversamente, nos dias quentes, procuramos utilizar roupas leves, que facilitem a perda de calor para o meio externo.

Nos motores a combustão, aumentar a perda de calor é essencial para que as temperaturas não fiquem tão altas a ponto de derreter seus componentes, enquanto nos refrigeradores procura-se evitar que a energia térmica do ambiente penetre em seu interior.

> O **calor** corresponde à **energia térmica que é transferida** de um corpo para outro.

Espontaneamente, o calor flui do corpo mais quente para o corpo mais frio. A transferência dessa energia térmica é possível graças a alguns processos. O conhecimento desses mecanismos pode, de acordo com nosso interesse, facilitar ou dificultar as transmissões do calor.

Condução de calor

Quando as partículas de um sólido vibram, elas transmitem energia para as partículas vizinhas que a elas estão ligadas pela rede cristalina. Cada uma das partículas se mantém em sua posição média, e a energia se propaga sem transportar matéria. Por exemplo, quando aquecemos uma extremidade de uma barra metálica, o calor se propaga até a outra extremidade, conforme ilustra a figura 1.22.



Figura 1.22 O fósforo é aceso através do calor transmitido pela barra. Representação sem escala e em cores fantasia.

Nos líquidos, embora haja coesão entre as suas partículas, não há a rigidez intrínseca da rede cristalina. Com isso, os líquidos são maus condutores de calor. Nos gases, praticamente não há ligação entre as partículas que os compõem, e o processo de condução de calor é desprezível.

A estrutura molecular dos metais caracteriza-se pelas ligações metálicas, constituídas de elétrons livres. Esses elétrons livres fazem dos metais não só bons condutores de calor como também de eletricidade. Em vista disso, dentre os sólidos, os metais são os que apresentam melhor condutividade térmica.

Como grandeza física, a **condutividade térmica** de um corpo é avaliada pelo fluxo de calor que o corpo proporciona (figura 1.23). O fluxo de calor ϕ, por sua vez, é a quantidade de calor Q transmitida por unidade de tempo Δt. Algebricamente, escrevemos:

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} \text{ (cal/s)}$$

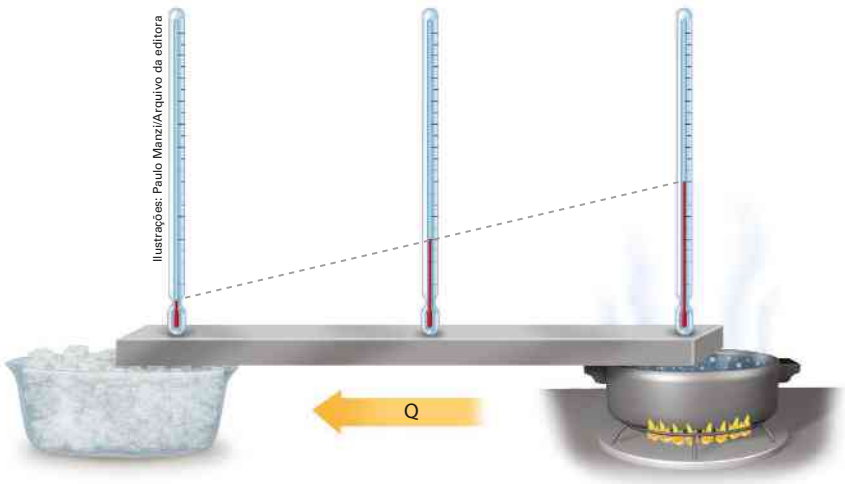


Figura 1.23 Fluxo de calor em uma barra metálica. Representação sem escala e em cores fantasia.

O fluxo de calor, através de uma barra, é diretamente proporcional à área A da secção transversal da barra, diretamente proporcional à diferença de temperatura entre os extremos da barra $\Delta\theta$ e inversamente proporcional ao comprimento L da barra. Nessas condições, escrevemos:

$$\phi = \frac{k \cdot A \cdot \Delta\theta}{L}$$

As proporções resultam em uma equação na qual introduzimos o fator *k*, que é uma característica da substância de que é feita a barra, e são válidas quando as temperaturas dos dois extremos da barra permanecem constantes ao longo do tempo.

A unidade da constante *k*, chamada de **condutividade térmica** do material, é normalmente expressa em cal/(s · cm · °C). A **tabela 1.3** nos mostra alguns valores assumidos por essa constante, de acordo com a substância.

Tabela 1.3 Valores para a condutividade térmica para algumas substâncias

Substância	***k*** (cal/s · cm · °C)
prata	0,974
cobre	0,92
alumínio	0,547
mercúrio sólido	0,086
mercúrio líquido	0,021
água na fase líquida	0,00143
gelo	0,0030
ar seco	0,00006
vidro	0,002
madeira	0,0003

Fonte: Kaye & Laby Online. *Tables of Physical & Chemical Constants*. 16. ed. Disponível em: <www.kayelaby.npl.co.uk>. Acesso em: abr. 2016.

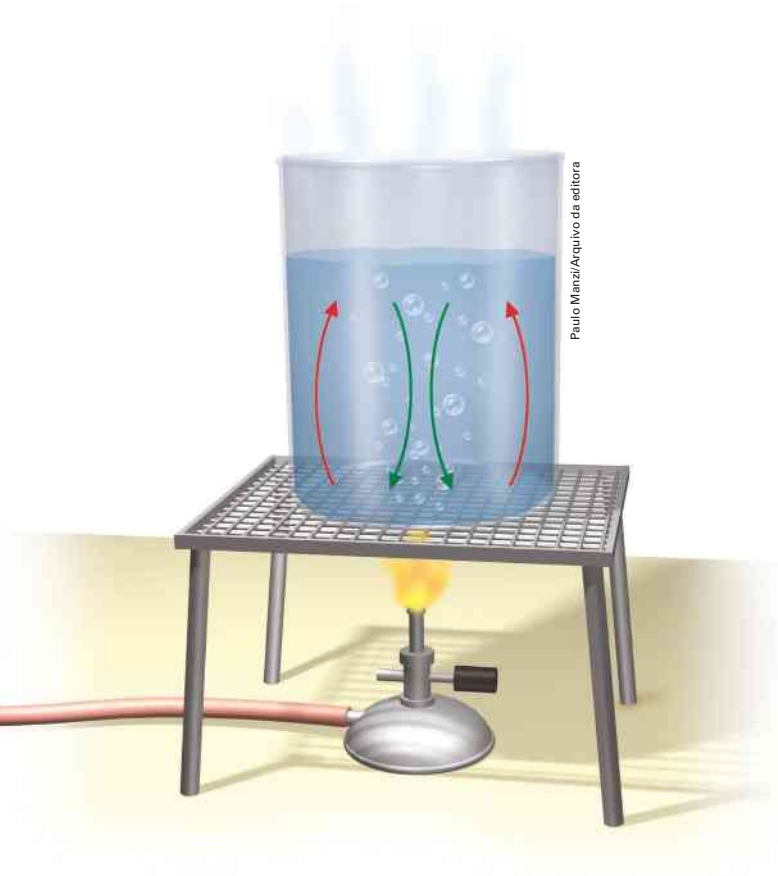
Algumas observações podem ser feitas em nosso dia a dia relacionadas com a condutividade. Por exemplo:

- As panelas são metálicas para facilitar a condução do calor.
- Os cabos dos utensílios expostos ao calor são feitos de madeira ou outro material que seja mau condutor de calor.
- O vidro, por ser um mau condutor de calor, não se aquece uniformemente. A dilatação diferenciada pode quebrar um copo com um pouco de café muito quente. Enchendo-se o copo inteiro o risco é menor.
- Os pisos cerâmicos "roubam" calor mais rapidamente de nossos pés descalços que os pisos de madeira.
- O ar retido pelas fibras de lã, ou entre os pelos e as penas dos animais, diminui a perda de calor nos dias frios (**figura 1.24**). Alguns compostos artificiais, como a fibra de vidro, têm o mesmo princípio.

Fabio Colombini/Acervo do fotógrafo



Figura 1.24 O homem aprendeu observando os animais (como o papagaio-verdadeiro da foto) que, mantendo ar entre ele e o ambiente, ocorre menor transferência de calor.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 1.25 A água quente sobe, enquanto a água fria desce. As setas representam as correntes de convecção ascendentes (em vermelho) e descendentes (em verde). Representação sem escalas e em cores fantasia.

Convecção térmica

Os fluidos – líquidos e gases – são maus condutores de calor. É comum, em uma piscina, por exemplo, percebermos regiões mais quentes e regiões mais frias por causa da baixa condutividade da água (veja **tabela 1.3**). Isso acontece porque quando aquecemos um fluido, salvo poucas exceções, a sua densidade diminui, e esse fluido tende a subir contra o campo gravitacional, visto que o fluido mais denso tende a ocupar as posições mais baixas. Continuamente, o ar que nos rodeia é renovado por esse processo. São as correntes de **convecção**.

A convecção não é exatamente um processo de transferência de energia térmica, mas um processo de transferência de massa. Não é especificamente o calor que vai de um corpo a outro, mas sim o corpo mais frio que se aproxima da região mais quente por ação gravitacional (**figura 1.25**).

É por meio da convecção, por exemplo, que a combustão do oxigênio em um fogão é mantida, pois a queima desse gás faz com que mais ar frio e rico em oxigênio ocupe o lugar daquele que já sofreu combustão. Na **figura 1.26**, vemos uma panela na qual o líquido é aquecido por inteiro graças às correntes de convecção. Elas não existiriam se o aquecimento fosse feito pela região superior.

Por causa da condutividade dos metais, as paredes da panela são as regiões mais quentes, o que justifica o fato de a água mais quente subir.

Nos refrigeradores, o aparelho responsável pela troca de calor (serpentina do congelador) deve ficar na parte de cima. O ar mais frio gerado por ele tende espontaneamente a descer, mantendo a circulação na geladeira.

Os fluidos, desprovidos que são da condução, desfrutam dessa mobilidade das partículas mais frias e mais quentes, o que não acontece nos sólidos. Por isso, tendo em vista a convecção, se a intenção for aquecer um fluido, devemos fazê-lo por baixo; se a intenção for resfriá-lo, devemos fazê-lo por cima.



Roman Sigaev/Shutterstock/Glow Images

Figura 1.26 Panela em que o líquido é aquecido por inteiro graças às correntes de convecção.

As brisas litorâneas

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Nossa atmosfera é predominantemente aquecida pela superfície do planeta em razão da relativa transparência que ela tem para a radiação solar. Durante um dia ensolarado a areia da praia está mais quente que a água do mar. O ar mais quente, em contato com o solo, tende a subir, e o ar oceânico sopra do mar para a terra (**figura 1.27**). Durante a noite ocorre o processo inverso (**figura 1.28**).

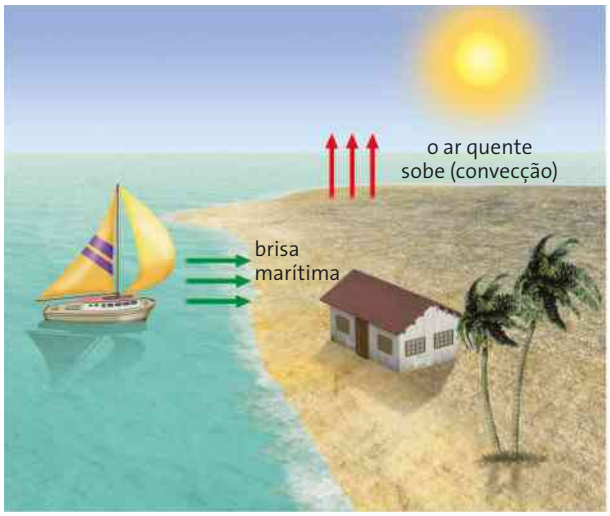


Figura 1.27 Representação da brisa marítima (diurna).

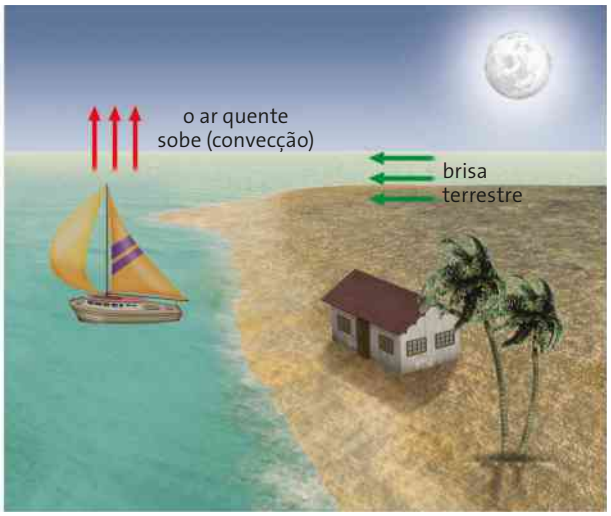


Figura 1.28 Representação da brisa terrestre (noturna).

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Inversão térmica

As correntes de convecção são importantes para a dispersão dos poluentes na atmosfera. Nas grandes cidades, devido ao elevado número de indústrias e de veículos automotores em circulação, o ar atmosférico recebe enorme quantidade de poluentes. Os principais são o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono ou gás carbônico (CO_2) e o dióxido de enxofre (SO_2). Esses poluentes, que causam problemas de saúde nos seres vivos, como irritações visuais e respiratórias, são liberados a uma temperatura maior do que o ar atmosférico das camadas superiores e, portanto, eles sobem e se dispersam na atmosfera.

No inverno, durante a noite, quando a superfície da Terra esfria muito, faz com que as camadas de ar próximas à superfície fiquem mais frias do que as camadas superiores e, mesmo durante o dia, o sol fraco de inverno não consegue reverter o processo. Isso provoca a interrupção das correntes de convecção; assim, os poluentes permanecem junto ao solo e não se dispersam na atmosfera (**figura 1.29**). Esse fenômeno é conhecido como **inversão térmica**.



Mauricio Simonetti/Pulsar Imagens

Figura 1.29 Inversão térmica na cidade de São Paulo (SP), 2015.

Irradiação térmica

Quando nos aproximamos de uma fogueira, recebemos uma quantidade de energia transmitida por ela por meio de ondas eletromagnéticas. O mesmo acontece quando tomamos um banho de sol: recebemos do Sol uma quantidade de energia que chega até nós por meio de ondas eletromagnéticas.

O processo de transferência de calor através de ondas eletromagnéticas, denominadas ondas de calor ou calor radiante, recebe o nome de **irradiação térmica**.

Enquanto a condução e a convecção ocorrem somente em meios materiais, a irradiação acontece tanto em determinados meios materiais como no vácuo (ausência de matéria).

As ondas de calor, ou calor radiante, geradas pelas agitações térmicas moleculares são funções da temperatura. De modo geral, podemos dizer que, em maior ou menor grau, todos os corpos emitem energia radiante devido à sua temperatura.



Alfred Pasieka/Getty Images

Figura 1.30 Fotografia em infravermelho de uma casa.

O principal emissor de calor para a Terra é o Sol. Com uma temperatura superficial da ordem de 6 000 K, ele emite calor luminoso (calor acompanhado de luz) – além de outras formas de ondas eletromagnéticas – que chega à Terra exclusivamente por irradiação, pois atravessa uma grande região de vácuo.

Metais, quando aquecidos até a incandescência, ou uma fogueira acesa, por exemplo, também emitem calor luminoso, enquanto os fornos e os ferros de passar roupas emitem calor obscuro (calor não acompanhado de luz). A maioria dos corpos emite calor obscuro.

Vejamos, agora, algumas aplicações da irradiação térmica:

- Os corpos mais quentes emitem mais radiação térmica que os mais frios. Um filme fotográfico, sensível a essa radiação, nos revela um verdadeiro mapa das temperaturas de cada corpo; por exemplo, um animal cuja temperatura corpórea seja de 36 °C ficaria claramente destacado caso fosse fotografado no meio de uma floresta a 25 °C. E podem também permitir a visualização de objetos numa noite totalmente escura, como no exemplo da **figura 1.30**.
- Na terapia de lesões musculares, em que geralmente é utilizada uma lâmpada que emite radiações na faixa do infravermelho sobre o local da lesão, acelerando a cicatrização por meio da elevação da temperatura (**figura 1.31**).



Miguel Ángel Muñoz Pellicer/Alamy/Other Images

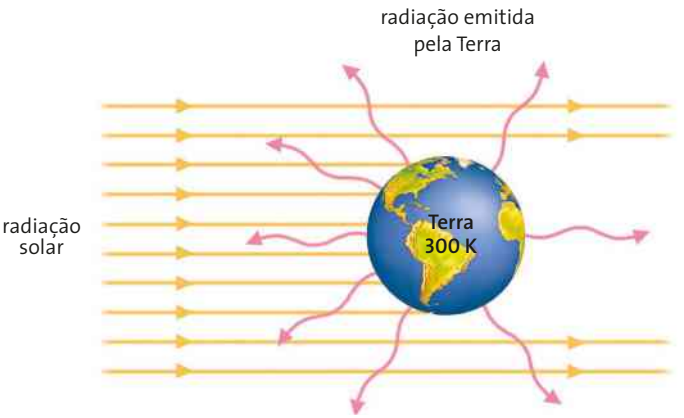
Figura 1.31 As radiações infravermelhas são muito utilizadas na fisioterapia.

- Em tetos de estufas de plantas. Feitos de vidros transparentes, permitem que a energia radiante que chega do Sol permaneça na estufa e impedem a saída de ondas de calor emitidas pela Terra. Assim, o interior da estufa é mantido a uma temperatura maior do que o exterior (figura 1.32).
- Para manter uma temperatura média ideal no planeta. Na atmosfera da Terra também ocorre o efeito estufa. O gás carbônico (CO_2) e os vapores de água, presentes no ar, funcionam como o teto de vidro: são transparentes à energia radiante que vem do Sol (6 000 K), mas opacos às ondas de calor emitidas pela Terra (300 K) (figura 1.33). A não ser quando se libera uma quantidade excessiva de CO_2 na atmosfera, o efeito estufa mantém a superfície terrestre a uma temperatura média ideal para o desenvolvimento da vida. Em virtude do aumento considerável de veículos que usam motor de combustão (automóveis, caminhões, ônibus), indústrias e fontes poluidoras em geral, os níveis de gás carbônico e outros gases têm aumentado consideravelmente. Isso pode estar provocando, além de outros problemas, um aumento na temperatura média da Terra, com consequências prejudiciais ao meio ambiente.



Ronfromyork/Shutterstock/Glow Images

Figura 1.32 Estufa de plantas.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 1.33 A Terra absorve calor do Sol à mesma taxa com que irradia energia para o espaço. A temperatura global se mantém em torno de uma mesma média. Representação sem escala e em cores fantasia.

Física explica

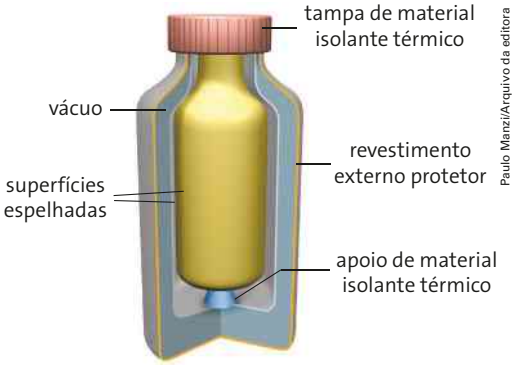
Veja comentários e resposta desta seção no Manual do Professor.

Garrafa térmica

A popular garrafa térmica é um dispositivo que tem por finalidade conservar um líquido em uma determinada temperatura durante o maior tempo possível. Ela é constituída por uma parede dupla de vidro, com vácuo entre elas, protegida por uma camada de plástico.

Na garrafa térmica são evitados os três tipos de propagação de calor. As paredes de vidro (um mau condutor de calor) têm as suas faces interna e externa espelhadas para evitar a irradiação; o vácuo, entre as paredes, impede a transmissão de calor por condução e convecção; e a tampa, também de material isolante, dificulta a propagação do calor para fora da garrafa.

- Com base na propagação do calor, qual é a diferença entre colocar em uma garrafa térmica um café bem quente e um suco bem gelado?



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Elementos de uma garrafa térmica. Representação sem escala e em cores fantasia.

Exercícios

As imagens desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

17. b) Principalmente na condução. A lã é isolante térmica e diminui o ganho que passa do ar para o gelo, retardando o processo de fusão.

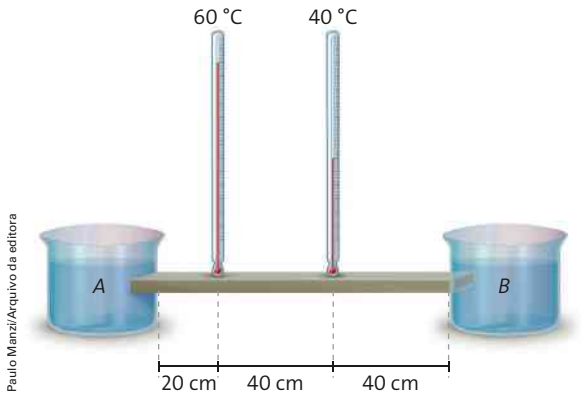
ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

17. Daniel e Joana estão organizando um churrasco. Eles compraram algumas barras de gelo para colocar os refrigerantes, mas como o dia está muito quente e faltam algumas horas para o churrasco começar, Daniel propõe que se embrulhem as barras de gelo com algumas blusas de lã velhas, para conservá-las.

a) A proposta de Daniel é válida? Sim.

b) Em que tipo(s) de transmissão de calor (condução, irradiação ou convecção) as blusas de lã vão interferir? Explique. Veja resposta no Manual do Professor.

18. Uma barra homogênea de secção transversal uniforme, envolta por uma manta térmica, está em contato com dois termômetros idênticos, posicionados conforme indica a figura. A barra também está em contato com dois recipientes a temperaturas diferentes, e as perdas de calor para o ambiente são desprezíveis.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

É possível determinar a temperatura de cada um dos recipientes? Em caso positivo, determine; em caso negativo, justifique. O recipiente *A* está mais quente: $\theta_A = 70\ °C$; $\theta_B = 20\ °C$.

19. As imagens a seguir ilustram processos de transmissão de calor. Identifique e anote em seu caderno para cada uma delas o sentido do fluxo da energia térmica e o principal processo de transmissão do calor correspondente entre os dois corpos.

a)


Antonio Robson/Arquivo da editora

Do Sol para as pessoas. Irradiação.

b)


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Do ferro para a roupa. Condução.

c)


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Do aparelho para o alimento. Irradiação.

d)


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Dos alimentos para o ar (condução), que sobe por convecção. Condução e convecção.

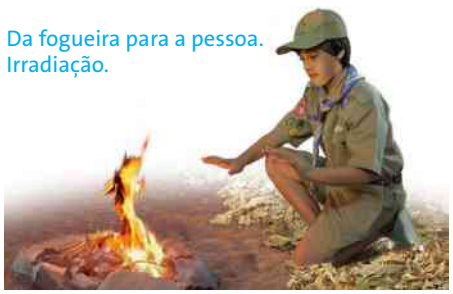
e)


Antonio Robson/Arquivo da editora

Da pessoa para o ambiente, cedendo calor. Condução.

f)

Da fogueira para a pessoa. Irradiação.


Antonio Robson/Arquivo da editora

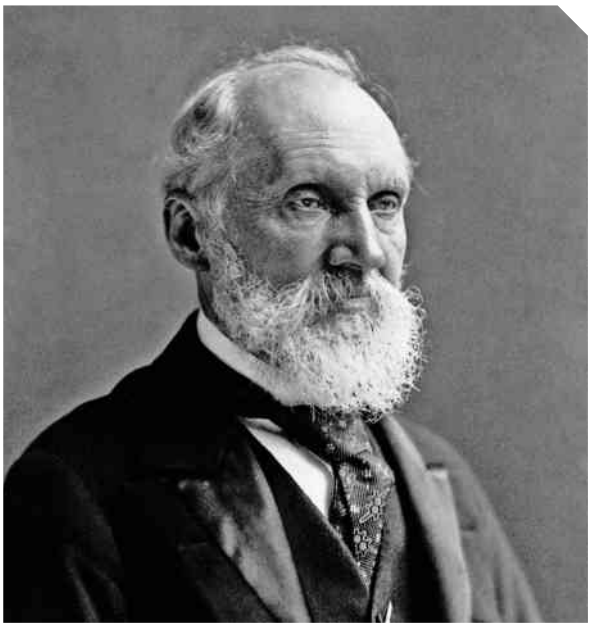
Em construção

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

William Thomson (lorde Kelvin)

Matemático e físico irlandês, nascido em Belfast (County Antrim, hoje na Irlanda do Norte), William Thomson é uma das figuras mais notáveis da geração de cientistas britânicos que deram imensa contribuição para o avanço da Física no século XIX. [...] Formado na Universidade de Cambridge (1845), foi nomeado professor de Filosofia Natural da Universidade de Glasgow, em 1846. Nessa universidade passou a se dedicar à ciência experimental e aí permaneceu por 53 anos, até o fim da carreira.

Seus principais trabalhos científicos trataram dos fenômenos de transformação da energia. A partir dos descobrimentos sobre a natureza do calor, realizados separadamente por Jean-Baptiste-Joseph Fourier e James Joule, construiu uma teoria unitária dos fenômenos associados às trocas energéticas entre diversos componentes dos sistemas físicos, elaborando, assim, a segunda lei da Termodinâmica, segundo a qual a entropia – grandeza que determina o grau de desordem molecular –, tende a aumentar em qualquer sistema isolado.



Corbis/Latinstock

Retrato de William Thomson, mais conhecido como lorde Kelvin. (1824-1907).

Durante sua vida, publicou mais de 650 importantes artigos científicos sobre os mais variados assuntos, como escoamentos laminares, vórtices, ondas em canais abertos, capilaridade, flutuação de navios, Termodinâmica, etc.

No campo da Termodinâmica, termo introduzido por ele, o nome de Thomson está diretamente ligado à escala absoluta de temperatura, também dita escala termodinâmica ou escala Kelvin, que tem como ponto de partida o zero absoluto. Thomson formulou as leis da conservação e da dissipação da energia, inventou o galvanômetro e descobriu o resfriamento provocado pela expansão de gases.

Ainda hoje, Thomson é muito lembrado por sua contribuição para o aperfeiçoamento dos cabos telegráficos e a construção de um cabo submarino transatlântico de telecomunicação, em 1866. Ele também aperfeiçoou o tubo de raios catódicos e, por toda a sua contribuição à Ciência, foi recompensado pela rainha Vitória com o título de lorde Kelvin de Largs, Escócia, em 1892. Patenteou cerca de 70 invenções e é considerado o maior cientista e inventor britânico. Morreu em Netherhall, nas proximidades de Largs, Ayrshire, Escócia, em 1907 [...].

Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. Disponível em: <www.dec.ufcg.edu.br/biografias/WilliTho.html>. Acesso em: out. 2015.

Trabalho em equipe

Pesquisem sobre a escala Kelvin e respondam às questões.

1. Qual é a importância da escala Kelvin para a comunidade científica? E para a sociedade em geral?
2. Citem dois experimentos conduzidos em temperaturas próximas do zero absoluto.
3. Qual é a relação entre temperaturas próximas do zero absoluto e o fenômeno da supercondutividade?

Experimento

ATENÇÃO!
Realize essa atividade sob a supervisão do professor. Tome cuidado para evitar queimadura.

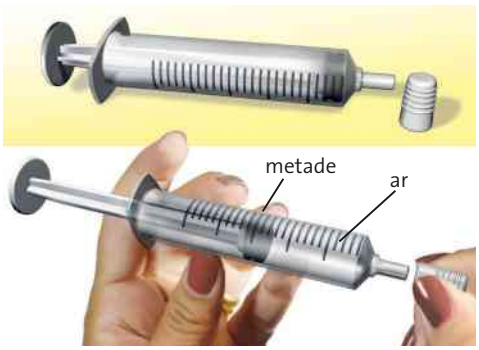
Estimativa do zero absoluto

Veja comentários e sugestões sobre este experimento e resposta das atividades no Manual do Professor.

Esta atividade permite a você fazer uma estimativa, com razoável precisão, da menor temperatura possível, considerando a escala Celsius. Serão necessários apenas uma seringa de injeção comum (sem agulha), uma panela, gelo, água, uma presilha para segurar a seringa e uma chama de fogão.

Como vamos trabalhar com água em ebulição, **é importante o acompanhamento do professor ou de um adulto para que todos os cuidados sejam tomados**.

Com o êmbolo da seringa aproximadamente na metade de seu curso, feche hermeticamente o bico injetor da seringa. Geralmente, as seringas já vêm com uma tampinha para fazer isso; caso contrário, utilize algum adesivo disponível.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Passo 1: Feche hermeticamente a seringa com o êmbolo na metade do curso.



Passo 2: Mergulhe a seringa em uma mistura de água e gelo e observe a posição do êmbolo.

Faça uma mistura de gelo e água e espere alguns minutos pelo equilíbrio térmico. Use a presilha para mergulhar a seringa nessa mistura e a deixe lá por cerca de um minuto. Retire a seringa e, imediatamente, faça a leitura do volume relativo à posição do êmbolo. Anote em seu caderno.

As imagens desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Em seguida, ponha uma panela com água para ferver no fogão. Quando a água entrar em ebulição, com a presilha, mergulhe a seringa nessa água e espere cerca de um minuto. Retire-a e imediatamente faça a leitura do volume. Anote esse valor em seu caderno. Com esses dois valores você poderá fazer uma estimativa do zero absoluto.

Na primeira situação em que a seringa foi mergulhada, a temperatura era 0 °C. Já na segunda – água em ebulição – a temperatura era cerca de 100 °C.



Passo 3: Mergulhe a seringa em uma panela com água em ebulição e observe a posição do êmbolo.

1. Faça um diagrama do comportamento do volume em função da temperatura, considerando linear essa relação e os dois pontos obtidos experimentalmente.
2. Determine a inclinação da reta construída no item anterior. Ela deve estar em torno de $3{,}66 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$.
3. Determine em que abscissa essa reta vai interceptar o eixo das abscissas.
4. Qual é a sua estimativa para a menor temperatura possível?

Retomando

Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resolução dos exercícios deste capítulo.

20. (Enem) Uma garrafa de vidro e uma lata de alumínio, cada uma contendo 330 mL de refrigerante, são mantidas em um refrigerador pelo mesmo longo período de tempo. Ao retirá-las do refrigerador com as mãos desprotegidas, tem-se a sensação de que a lata está mais fria que a garrafa.
É correto afirmar que:

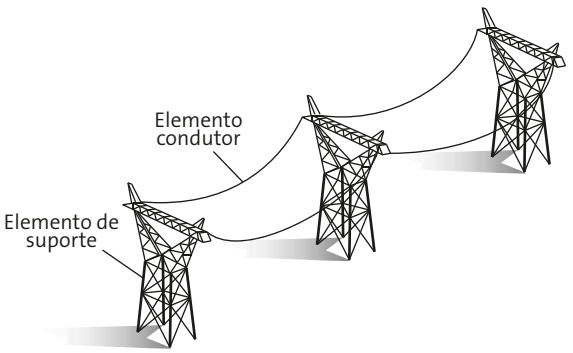
a) a lata está realmente mais fria, pois a capacidade calorífica da garrafa é maior que a da lata.
b) a lata está de fato menos fria que a garrafa, pois o vidro possui condutividade menor que o alumínio.
c) a garrafa e a lata estão à mesma temperatura, possuem a mesma condutividade térmica, e a sensação deve-se à diferença nos calores específicos.
X d) a garrafa e a lata estão à mesma temperatura, e a sensação é devida ao fato de a condutividade térmica do alumínio ser maior que a do vidro.
e) a garrafa e a lata estão à mesma temperatura, e a sensação é devida ao fato de a condutividade térmica do vidro ser maior que a do alumínio.

21. (Acafe-SC) Largamente utilizados na medicina, os termômetros clínicos de mercúrio relacionam o comprimento da coluna de mercúrio com a temperatura. Sabendo-se que quando a coluna de mercúrio atinge 2,0 cm, a temperatura equivale a 34 °C e, quando atinge 14 cm, a temperatura equivale a 46 °C. Ao medir a temperatura de um paciente com esse termômetro, a coluna de mercúrio atingiu 8 cm.
A alternativa **correta** que apresenta a temperatura do paciente, em °C, nessa medição é:

a) 36. b) 42. c) 38. X d) 40.

22. (Etec-SP) Quem viaja de carro ou de ônibus pode ver, ao longo das estradas, torres de transmissão de energia tais como a da figura.
Olhando mais atentamente, é possível notar que os cabos são colocados arqueados ou, como se diz popularmente, "fazendo barriga".
A razão dessa disposição é que:

a) a densidade dos cabos tende a diminuir com o passar dos anos.
b) a condução da eletricidade em alta tensão é facilitada desse modo.
c) o metal usado na fabricação dos cabos é impossível de ser esticado.
X d) os cabos, em dias mais frios, podem encolher sem derrubar torres.
e) os ventos fortes não são capazes de fazer os cabos, assim dispostos, balançarem.



Banco de imagens/Arquivo da editora

23. (Enem) A gasolina é vendida por litro, mas, em sua utilização como combustível, a massa é o que importa. Um aumento da temperatura do ambiente leva a um aumento no volume da gasolina. Para diminuir os efeitos práticos dessa variação, os tanques dos postos de gasolina são subterrâneos. Se os tanques não fossem subterrâneos:

I. Você levaria vantagem ao abastecer o carro na hora mais quente do dia, pois estaria comprando mais massa por litro de combustível.
II. Abastecendo com a temperatura mais baixa, você estaria comprando mais massa de combustível para cada litro.
III. Se a gasolina fosse vendida por kg em vez de por litro, o problema comercial decorrente da dilatação da gasolina estaria resolvido.

Destas considerações, somente:

a) I é correta. c) III é correta. X e) II e III são corretas.
b) II é correta. d) I e II são corretas.

CAPÍTULO 2

Calorimetria

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

Baiborodin Mikhail/Shutterstock



Pedra de gelo exposta ao sol.

Qual é a energia necessária para derreter 100 gramas de gelo?

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Capacidade térmica

Quando colocamos dois corpos quaisquer, com temperaturas diferentes, em contato, a energia térmica flui naturalmente do corpo mais quente para o corpo mais frio. A essa quantidade de energia transferida de um corpo para outro chamamos de **calor**. Calor é, portanto, a quantidade de energia que foi transferida de um corpo a outro. Os corpos, em geral, têm energia térmica – agitação em suas partículas microscópicas – mas não possuem calor.

Vejamos um exemplo. Suponha que dois corpos de mesma massa, um bloco de ferro de 1 kg e um recipiente com 1 kg de água, sejam expostos a chamas idênticas durante o mesmo intervalo de tempo (**figura 2.1**).



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.1 Os corpos são expostos a chamas idênticas durante o mesmo intervalo de tempo. Representações sem escala e em cores fantasia.

Se esses corpos ficarem expostos à chama do fogão durante dois minutos, por exemplo, o bloco de ferro atingirá uma temperatura elevada e será quase impossível apanhá-lo diretamente com a mão. Por outro lado, no recipiente, teremos água morna. Como isso é possível se ambos receberam a mesma quantidade de calor?

Esse fenômeno só é possível porque, embora eles tenham a mesma massa, possuem comportamentos térmicos diferentes em razão de suas estruturas atômicas: o bloco de ferro é sólido e, consequentemente, as partículas que o compõem agitam-se mais intensamente do que em uma substância líquida, como a água. Por isso, a variação de temperatura prevista para os corpos é diferente.

A grandeza física que relaciona a quantidade de calor Q com a variação de temperatura $\Delta\theta$ é denominada **capacidade térmica *C***, dada por:

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta}$$

No sistema usual da calorimetria, a unidade utilizada para quantidade de calor é a **caloria** (cal), e a variação de temperatura é medida em °C. Portanto, a unidade de capacidade térmica, nesse sistema, é cal/°C. No Sistema Internacional (SI), temos **J/K (joule por kelvin)**.

Caloria – Uma caloria é a quantidade de calor necessária para variar de um grau Celsius a temperatura de um grama de água (entre 14,5 °C e 15,5 °C).

Podemos dizer, então, que o bloco de ferro e o recipiente com água, de massas iguais, têm capacidades térmicas diferentes. Por outro lado, é possível dois corpos, de massas diferentes e constituídos de substâncias diferentes, apresentarem a mesma capacidade térmica. Nessas condições, dizemos que eles são **termicamente equivalentes**.

Calor específico (c)

Como a capacidade térmica é uma característica de um corpo, para caracterizar termicamente uma substância e poder compará-la com outras, devemos determinar a sua **capacidade térmica específica**, ou seja, a capacidade térmica quando se considera uma unidade de massa da substância. Na época em que ainda se pensava que um corpo continha calor, essa grandeza foi denominada **calor específico** da substância, nome que permanece até hoje por razões históricas.

O calor específico c de uma substância é dado pela razão entre a capacidade térmica C de um corpo constituído por essa substância e a massa m do corpo. Assim, temos:

$$c = \frac{C}{m} \Rightarrow C = m \cdot c$$

No sistema usual da calorimetria, o calor específico é dado em cal/(g · °C). No SI, temos: J/(kg · K).

A água foi escolhida como substância padrão na calorimetria, portanto seu calor específico é igual a 1,0 cal/(g · °C).

Por meio da expressão $C = m \cdot c$, nota-se que quanto maior for a massa de um corpo, maior será a sua capacidade térmica. Essa propriedade faz com que os oceanos sejam os grandes reservatórios térmicos do planeta, não só pela massa como também pelo alto valor do calor específico da água.

Tabela 2.1 Calor específico de alguns materiais a 20 °C sob pressão normal

Substância	Fase	Calor específico	
		cal/g · °C	J/kg · K
água	líquida	1,000	$4{,}19 \cdot 10^3$
água ($T \leqslant 0$ °C)	sólida	0,550	$2{,}30 \cdot 10^3$
álcool (etanol)	líquida	0,580	$2{,}43 \cdot 10^3$
alumínio	sólida	0,220	$9{,}21 \cdot 10^2$
ar	gasosa	0,240	$1{,}00 \cdot 10^3$
chumbo	sólida	0,031	$1{,}30 \cdot 10^2$
cobre	sólida	0,094	$3{,}93 \cdot 10^2$
ferro	sólida	0,110	$4{,}60 \cdot 10^2$
hidrogênio	gasosa	3,400	$1{,}42 \cdot 10^4$
mercúrio	líquida	0,033	$1{,}38 \cdot 10^2$
nitrogênio	gasosa	0,250	$1{,}05 \cdot 10^3$
ouro	sólida	0,032	$1{,}34 \cdot 10^2$
oxigênio	gasosa	0,220	$9{,}21 \cdot 10^2$
prata	sólida	0,056	$2{,}34 \cdot 10^2$
vidro	sólida	0,160	$6{,}70 \cdot 10^2$

Fonte: TIPLER, Paul; MOSCA, G. *Physics for Scientists and Engineers*. 5. ed. Nova York: W. H. Freeman & Company, 2008.

A **tabela 2.1** indica o calor específico de algumas substâncias a 20 °C. Os valores referentes à fase gasosa restringem-se a um volume constante.

O calor específico depende da estrutura da matéria. Desse modo, ele varia nas fases sólida, líquida e gasosa das substâncias.

Compare, na **tabela 2.1**, o calor específico da água na fase líquida com o das demais substâncias listadas. Podemos dizer que, em relação às outras substâncias (com exceção do hidrogênio e do hélio), cada grama de água necessita de muito mais calor – cedido ou recebido – para variar de um grau a sua temperatura.

Esse fato tem um aspecto importante na questão climática: regiões muito úmidas têm menores variações de temperatura quando comparamos o dia e a noite. A umidade aquecida cede calor durante a noite, mas, por causa do alto calor específico da água, a variação de temperatura é pequena. Por outro lado, os desertos têm temperaturas muito elevadas durante o dia e muito baixas à noite. O calor específico da areia é cerca de $\frac{1}{5}$ do calor específico da água. Isso pode ser observado numa praia em um dia ensolarado: a temperatura da areia apresenta-se muito maior que a da água do mar. Já numa noite fria, nessa praia, observamos o contrário.

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

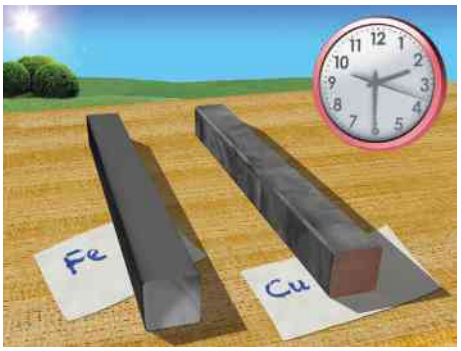
Exercícios

1. Considere dois sistemas: o primeiro é constituído por 550 g de água na fase líquida e o segundo, por 1000 g de água na fase sólida. Utilize a **tabela 2.1** e responda:

a) Qual deles possui maior capacidade térmica? As capacidades térmicas são iguais.

b) Em qual deles o calor específico da substância é maior? Água na fase líquida.

2. José deixou duas barras, uma de ferro e outra de cobre, de massas iguais e ambas pintadas de preto, em cima de uma mesa sob o sol durante três horas. Utilize a **tabela 2.1**, responda e justifique as questões a seguir:



a) Qual delas recebeu maior quantidade de calor? Ambas receberam a mesma quantidade.

b) Qual das barras possui maior capacidade térmica? A barra de ferro.

c) Após as três horas, qual delas apresenta a maior temperatura? A barra de cobre.

3. Imagine que você dispõe dos seguintes materiais: água ($c = 1{,}0$ cal/g · °C), óleo de soja, recipiente, termômetro com escala de −10 °C até 110 °C, relógio e uma fonte térmica de potência constante (fogão a gás). Descreva, no seu caderno, uma sequência de procedimentos que permita determinar o calor específico do óleo de soja.

Veja a resposta no Manual do Professor.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

As imagens desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

2 Calor sensível

Vamos considerar que um corpo troque calor com outro sem que haja mudança de fase. Nessas condições, o corpo esquenta quando recebe calor e esfria quando cede calor.

Por meio de termômetros, identificamos perda ou ganho de calor (energia) medindo a variação de temperatura. A quantidade de calor trocada pelos corpos é denominada **calor sensível**. Tais conclusões aplicam-se a sólidos, líquidos e gases sob volume constante.

Assim, quando um corpo **recebe** calor, a variação de temperatura (diferença entre a temperatura final e a inicial) é positiva; nesse caso, o calor sensível é **positivo**. Quando o corpo **cede** calor, a variação de temperatura é negativa; o calor sensível é **negativo**.

De acordo com a equação da capacidade térmica, o calor sensível Q é dado por:

$$Q = C \cdot \Delta\theta \Rightarrow Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$$



diogoppr/Shutterstock

Figura 2.2 Refeição com, aproximadamente, 600 kcal, ou, como diriam os nutricionistas, 600 Cal.

No sistema usual da calorimetria, o calor sensível é dado em calorias (cal), a massa em gramas (g), a variação de temperatura em grau Celsius (°C) e o calor específico em cal/(g · °C). Algumas unidades de calor utilizadas são:

- 1 cal = 4,186 J ⇒ 1 J = 0,239 cal;
- 1 Btu = 1055 J = 252 cal (Btu = "unidade térmica britânica");
- 1 Cal = 1 kcal = 1000 cal = 4190 J = 3,97 Btu.

A "caloria" (Cal) utilizada por médicos, nutricionistas e que aparece nas embalagens de alguns alimentos e bebidas é, na realidade, a quilocaloria (kcal), também chamada de grande caloria (veja o exemplo da **figura 2.2**). A unidade Btu continua sendo usada na engenharia, principalmente no ramo de refrigeração, por exemplo, nos aparelhos de ar-condicionado (**figura 2.3**).



© Tomislav Pinter/View Portfolio

Figura 2.3 Ar-condicionado com capacidade entre 12 000 Btu/h e 16 500 Btu/h.

Calor de combustão

Todos os organismos vivos necessitam de energia para a sua sobrevivência, como os animais, cuja principal fonte de energia é a alimentação. O ser humano, por meio da alimentação, ingere carboidratos, proteínas, gorduras e vitaminas que, juntos, fornecem uma quantidade de energia necessária para a realização de todas as atividades diárias.

Máquinas e motores também necessitam de energia para realizar trabalho. Nesses casos, a principal fonte de energia é o combustível. Assim como os alimentos, os combustíveis contêm energia, que pode ser liberada e utilizada por outros mecanismos.

A energia contida nos alimentos e nos combustíveis pode ser medida por meio da queima (combustão). A **combustão** é uma reação exotérmica (liberação de calor) de uma substância com o oxigênio. Assim, a queima de 1 g de determinada substância libera uma quantidade de calor, denominada **calor de combustão**.

A **tabela 2.2** apresenta o calor de combustão de alguns alimentos e combustíveis.

Tabela 2.2 Calor de combustão de alguns alimentos e combustíveis

Alimento	Calor de combustão (cal/g)	Combustível	Calor de combustão (cal/g)
batata frita	2740	gás natural	11900
pão	2690	gás hidrogênio	29000
arroz cozido	1670	gasolina	11100
carne magra	1460	óleo *diesel*	10900
feijão cozido	670	álcool etílico	6400
leite cru	630	lenha	2800 a 4400

Fonte: ESTUDO Nacional da Despesa Familiar (ENDEF), Secretaria de Planejamento da Presidência da República, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 1997.

Física explica

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

Alimentos e energia

A manutenção da vida, por incluir inúmeras atividades, consome muita energia, fornecida pelos alimentos. A quantidade de energia necessária varia de uma espécie animal para outra e conforme a atividade exercida. Diferentes atividades envolvem diferentes consumos de energia.

Um adulto de vida sedentária consome cerca de 2 200 kcal/dia, enquanto um trabalhador, em atividade física intensa, pode necessitar de 6 000 kcal/dia a 8 000 kcal/dia. Do total calórico da dieta humana, cerca de 50% provém dos carboidratos, 30% a 35% das gorduras e 15% a 20% das proteínas.

Caso a oferta calórica seja inferior à necessidade, o organismo utiliza as reservas de glicogênio e de gordura; se essas reservas chegarem próximo do final, as proteínas passam a ser usadas como fonte de energia, levando ao consumo da massa muscular e dos constituintes celulares. A desnutrição calórico-proteica em que predomina a deficiência calórica é conhecida como marasmo e pode levar à morte por inanição, isto é, por falência energética do organismo.

"Se a miséria de nossos pobres não é causada por leis da natureza, mas por nossas instituições, grande é a nossa culpa." (Charles Darwin).

BRITO, Elias Avancini de; FAVARETTO, José Arnaldo. *Biologia, uma abordagem evolutiva e ecológica*. São Paulo: Moderna, 1997. p. 218-219. v. 2.

Trabalho em equipe

Façam um levantamento sobre as condições de alimentação da população da cidade onde vocês moram ou de um bairro dela, caso a cidade seja muito grande. Avaliem se o número de calorias ingeridas e a dieta estão dentro dos padrões mencionados na seção **Física explica**. Procurem se informar sobre o que o seu município tem feito para combater a desnutrição. Apresentem seu trabalho em sala de aula e discutam os resultados.

Exercício resolvido

1. Utilizando a **tabela 2.2**, determine quantos gramas de gás natural serão necessários para elevar a temperatura de 2,0 kg de água, que estão inicialmente a 20 °C, até a temperatura de ebulição.

Resolução:

A quantidade de calor necessária para o aquecimento da água é dada por:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow Q = 2\,000 \cdot 1{,}0 \cdot (100 - 20) \Rightarrow Q = 1{,}6 \cdot 10^5 \text{ cal}$$

De acordo com a tabela 2.2, o calor de combustão do gás natural é 11 900 cal/g. Assim, a massa de gás natural para produzir $1{,}6 \cdot 10^5$ cal é:

$$m = \frac{1{,}6 \cdot 10^5}{11\,900} \Rightarrow m = 13{,}4 \text{ g}$$

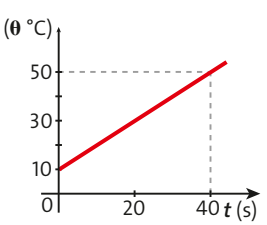
Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

4. A fonte de calor utilizada por um pesquisador libera 100 cal/s. Ele usa essa fonte para aquecer 200 g de um líquido, inicialmente a 10 °C. Anotando as temperaturas atingidas pelo líquido ao longo do tempo, ele constrói o gráfico ao lado. Considere que todo calor liberado pela fonte é absorvido pelo líquido.

a) Qual é a capacidade térmica do líquido? $C = 100$ cal/°C

b) Se a massa de líquido é 200 g, qual é o seu calor específico? $c = 0{,}5$ cal/(g · °C)



Banco de imagens/Arquivo da editora

5. Suponha que em um restaurante, o prato do dia seja arroz, feijão, carne e batata frita. Faça uma estimativa de quantos gramas de cada um desses alimentos o prato tem e, com base na **tabela 2.2**, calcule a quantidade de calorias correspondente a esse almoço. $Q = 700$ kcal

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

3 Calor latente

Será que é possível uma substância receber calor e mesmo assim manter sua temperatura constante?

A resposta é sim. Como já vimos, a agitação térmica das partículas está relacionada diretamente com a temperatura na escala absoluta. Essa agitação, ou movimento vibratório, é avaliada pela energia cinética média das moléculas. Mas a energia cinética não é o único tipo de energia associado às partículas: há também o que chamamos de **energia potencial**, que é a energia responsável por manter a temperatura de um corpo constante mesmo sob ação de uma fonte de calor durante a mudança de fase.

Analogamente, pode ocorrer de fornecermos calor a um corpo, mas essa energia ser utilizada para separar as partículas. É o que acontece quando uma substância está mudando de fase.

São três os estados básicos de agregação da matéria: sólido (figura 2.4), líquido (figura 2.5) e gasoso (figura 2.6). Esses estados de agregação são denominados **fases** da substância.

Essas três fases, se considerarmos apenas as substâncias puras, têm as seguintes características:

- **Fase sólida** – Os sólidos têm volume e forma definidos. A principal característica das substâncias puras nessa fase é que suas partículas se dispõem em um arranjo espacial regular, chamado de rede cristalina (ou retículo cristalino), que se repete ao longo de toda a estrutura da substância. Uma mesma substância pode apresentar diferentes arranjos cristalinos nessa fase, que são as chamadas **variedades alotrópicas**. Por exemplo, duas variedades alotrópicas da fase sólida são a grafite e o diamante. Veja as figuras 2.7.a e 2.7.b.

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora



Figura 2.4 Representação de matéria na fase sólida.



Figura 2.5 Representação de matéria na fase líquida.



Figura 2.6 Representação de matéria na fase gasosa (ar dentro do balão).



Remedios/Shutterstock/Glow Images

As imagens desta página estão fora de proporção.



Fabio Colombini/Acervo do fotógrafo

Figura 2.7 A grafite (**a**) e o diamante (**b**) são duas das formas do carbono.

- **Fase líquida** – Os líquidos têm apenas o volume definido. Nessa fase existe coesão entre as partículas das substâncias, mas não há a presença da rede cristalina. É uma fase **amorfa**, ou seja, sem forma definida. Na presença de um campo gravitacional, as substâncias nessa fase se moldam na forma do recipiente que as contém, apresentando uma superfície livre. Na ausência de um campo gravitacional, os líquidos assumem a forma esférica, que corresponde à menor superfície livre para um volume predefinido (figura 2.8).
- **Fase gasosa** – Os gases não têm volume nem forma definidos. Aprisionados, ocupam todo o volume do recipiente que os contém, assumindo a forma desse recipiente (figura 2.9). Na fase gasosa, que compreende os vapores e os gases, a coesão entre as partículas é desprezível.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 2.8 O volume de água é o mesmo nos dois recipientes, mas as formas são determinadas pelos recipientes. Representações sem escala e em cores fantasia.



Charles D. Winters/Photoresearchers/Latinstock

Figura 2.9 Recipiente com iodo gasoso.

Física tem História

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

A Química abrindo as portas para a Física

Utilizar a Mecânica de Isaac Newton (1643-1727) para explicar fenômenos térmicos parece ter sido um objetivo muito almejado pelos cientistas do século XIX. Uma teoria mecânica dos fenômenos térmicos precisaria considerar forças atuando em partículas. Mas quais partículas?

O conceito de matéria como um conjunto de pequenas partículas indivisíveis e invisíveis chamadas átomos foi primeiramente proposto no século V a.C. , sem evidências experimentais, pelo filósofo grego Demócrito de Abdera (460 a.C.-370 a.C.). Mas sua aceitação não foi abrangente antes do fim do século XIX. Mesmo em 1900, cientistas importantes desdenhosamente duvidavam da existência dessas partículas invisíveis: "Quem já viu um?", era constantemente repetido pelo físico austríaco Ernst Mach (1838-1916).

John Dalton (1766-1844) não teve de ver um átomo para deduzir sua existência. Em vez disso, ele fez algumas perguntas simples, como "Por que a água contém sempre a mesma proporção de hidrogênio e oxigênio?"; "Por que, quando o dióxido de carbono é formado, as proporções de oxigênio e carbono são sempre as mesmas?". As respostas a essas questões vieram em 1808, quando publicou o primeiro volume da obra *Um novo sistema de filosofia química*. Os átomos (os elementos – carbono, hidrogênio, oxigênio e assim por diante) foram propostos como pequenos (invisíveis) corpos esféricos de massas fixas; cada diferente elemento químico tem seu próprio e distinto tipo de átomo, e os átomos combinam-se em proporções definidas para formar moléculas (que Dalton chamava de átomos compostos). Essa foi a revolução conceitual que estabeleceu o modelo químico usado a partir de então.

O mundo de Dalton estava centrado na cidade industrial de Manchester, onde ele ensinou Matemática e Filosofia Natural na escola que veio a se tornar a Universidade de Manchester. Ele era um homem interiorano [...], mas suas ideias sobre a natureza atômica da matéria atravessaram as fronteiras nacionais e estabeleceram um novo estágio para as grandes descobertas do século XX.

TALLACK, Peter (Ed.). *The Science Book*. London: Weindenfel & Nicolson, 2001. p. 124. Texto traduzido.

1. Converse com seu professor de Química sobre a importância do trabalho de Dalton para a ciência.

2. Converse com seu professor de Filosofia sobre a evolução do conceito de átomo.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

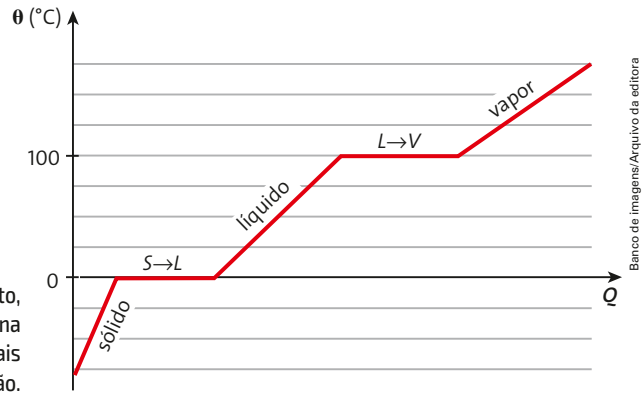
Figura 2.10 Representação esquemática das fases da matéria e de seus processos de mudança.

As mudanças de fase

O processo de mudança de fase envolve trocas de calor. Porém, durante o processo, a temperatura permanece constante. Nas passagens dos estados de sólido para líquido (fusão), de líquido para vapor (vaporização) e de sólido para vapor (sublimação), a substância recebe calor. As mudanças de fase de vapor para líquido (liquefação), de líquido para sólido (solidificação) e de vapor para sólido (ressublimação) são processos em que a substância cede calor (**figura 2.10**).

O gráfico da **figura 2.11** ilustra o comportamento da temperatura, medida em graus Celsius, de certa quantidade de água, inicialmente na fase sólida, com temperatura bem abaixo de 0 °C, que é aquecida sob pressão constante de 1 atm. Para as substâncias puras, a temperatura durante a mudança de fase permanece constante.

Curva de aquecimento



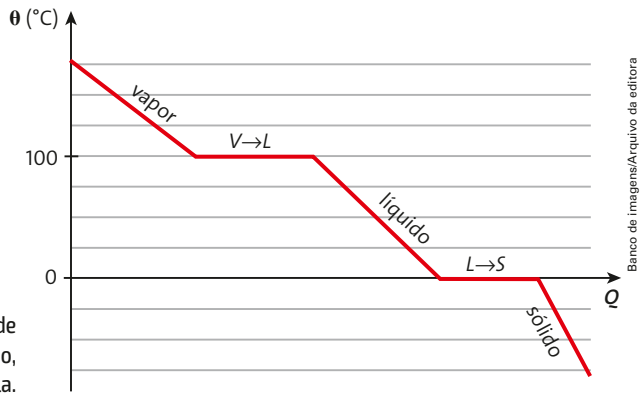
Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.11 Na curva de aquecimento, o patamar da vaporização é, na verdade, cerca de sete vezes mais largo que o da fusão.

As linhas horizontais do gráfico são chamadas de patamares. Nesses setores, observamos que a substância recebe calor, mas a sua temperatura permanece constante. Cada patamar corresponde, portanto, a uma mudança de fase em que coexistem duas fases da substância: no primeiro, sólido e líquido e, no segundo, líquido e vapor.

Podemos também analisar o processo inverso, ou seja, a substância cedendo calor, pois os processos de fusão e de vaporização são reversíveis. Os patamares ocorrem às mesmas temperaturas, e as quantidades de calor envolvidas no processo são as mesmas, exceto por seu valor algébrico, conforme ilustra o gráfico da **figura 2.12**. A questão algébrica se esclarece ao lembrarmos que calor recebido é positivo e calor cedido é negativo.

Curva de esfriamento



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.12 Na curva do processo de resfriamento de vapor superaquecido, os patamares estão fora de escala.

Mesmo atendo-nos somente às substâncias puras, nem sempre observamos esses patamares nos aquecimentos ou resfriamentos dos corpos. Por exemplo, quando a substância não possui redes cristalinas extensas, ela é chamada amorfa e não observamos claramente uma temperatura em que ocorra a transição da fase sólida para a líquida. Um exemplo bem simples é a manteiga. À medida que a aquecemos, ela se torna mais fluida, menos viscosa, mas sem uma temperatura definida de transição.

O mesmo acontece com o piche (asfalto), o vidro e muitas outras substâncias que não possuem uma rede cristalina, mas sim uma aparente fase sólida. Formalmente, é comum se dizer que são fluidos extremamente viscosos.

Cada substância, em cada mudança de fase, requer certa quantidade de calor, cedido ou recebido, para que ocorra o processo. A quantidade de calor Q, por unidade de massa m, necessária para a mudança de fase é uma característica da substância e do tipo de mudança de fase. Essa característica é chamada de **calor latente** L, dada por:

$$L = \frac{Q}{m} \Rightarrow Q = m \cdot L$$

O calor latente, dado em cal/g ou em J/kg, é considerado positivo nos processos em que o corpo recebe calor e negativo em situações em que o corpo cede calor. Na tabela 2.3, temos o calor latente da água na fusão (solidificação) e na vaporização (liquefação).

Tabela 2.3 Calores latentes para a água

Calor latente	L (cal/g)
$L_{fusão} = -L_{solidificação}$	80
$L_{vaporização} = -L_{liquefação}$	540

Fonte: Young & Freedman. *University Physics*. 12. ed. Nova York: Pearson/Addison-Wesley, 2008.

Exercício resolvido

2. Um rapaz, com a intenção de refrigerar rapidamente os refrigerantes em uma festa, coloca-os imersos em 3,0 kg de gelo picado à temperatura de 0 °C. Após algum tempo ele percebe que precisa colocar mais gelo, pois as bebidas estão agora imersas numa mistura de 20% de gelo e 80% de água (em massa). Utilize a **tabela 2.3** para responder às questões.

a) Qual foi a massa de gelo que se fundiu?

b) Considerando que as trocas de calor ocorram somente entre o gelo e as latas de refrigerante, qual foi a quantidade de calor que delas foi retirada, nas condições do item **a**?

Resolução:

a) A massa m_f de gelo que se fundiu é 80% da quantidade total. Assim:

$m_f = 0{,}8 \cdot 3{,}0 \Rightarrow m_f = 2{,}4 \text{ kg} = 2\,400 \text{ g}$

b) A quantidade de calor absorvida pelo gelo na fusão de 80% da massa é:

$Q = m \cdot L \Rightarrow Q = 2\,400 \cdot 80 \Rightarrow Q = 192\,000 \text{ cal}$

Essa quantidade corresponde à **quantidade de calor** que foi **retirada** das latas.

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

A ebulição e a evaporação

A passagem do estado líquido para o estado de vapor (vaporização) pode ocorrer de duas maneiras: por **ebulição** e por **evaporação**.

Um líquido entra em **ebulição** quando a pressão exercida por suas partículas, em razão do grau médio de agitação, supera a pressão ambiente. Temos dois mecanismos para provocar a ebulição: aumentar a temperatura ou reduzir a pressão externa.

Se estivermos ao nível do mar (pressão atmosférica de 1,0 atm), a ebulição da água, por exemplo, ocorrerá a 100 °C. Contudo, se a pressão externa for menor que 1 atm, a temperatura de ebulição da água será inferior a 100 °C. É o que ocorre nos locais com grande altitude: a temperatura de ebulição nesses locais está abaixo dos 100 °C.



© Discpicture/View Portfolio

Água em ebulição.

Reciprocamente, quando aumentamos a pressão externa, a temperatura de ebulição é maior. As panelas de pressão (tecnicamente chamadas de **autoclaves**) funcionam com pressão superior à atmosférica normal e, consequentemente, a água ferve a uma temperatura acima dos 100 °C, diminuindo o tempo para cozinhar os alimentos.

Vejamos, agora, a **evaporação**. Mesmo sob pressão normal e em temperaturas bem inferiores a 100 °C, muitas partículas de uma porção de água têm energia suficiente para escapar pela superfície livre do líquido.

Assim, como algumas partículas têm energia abaixo da média necessária para a ebulição, outras têm energia acima desse limite e escapam através da superfície livre do líquido. Quando essas partículas de maior energia cinética escapam, a energia média das que restaram fica menor, diminuindo assim a temperatura. A porção restante retira calor dos corpos ao redor, o que faz a temperatura retornar à média anterior; assim, algumas partículas obtêm energia acima da média, novamente escapam e o processo continua até que o líquido se evapore totalmente.



© Smit/View Portfolio

Em dias secos, as pequenas poças de água no chão sofrem o processo de evaporação completa em poucos minutos, mesmo que a temperatura não seja elevada.

1. Explique qual é e como se dá o processo responsável por secar as roupas que lavamos e estendemos no varal.
2. Muitas pessoas ainda utilizam moringas de barro para deixar a água numa temperatura menor que a do ambiente. Como você explica esse processo?

Exercícios

6. a) O homem, pois durante a ebulição a temperatura não se altera.

9. a) Sim, pois $T_{ebul.} = 100\ °C < 232\ °C = T_{fulgor}$.
b) Não.
c) Redução da condutividade e consequentemente aumento da temperatura na base da caixa.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

10. a) A pressão de vapor do sólido é maior do que a atmosférica.

6. Um homem, cozinhando batatas, baixa o fogo quando percebe que a água entrou em ebulição. Sua filha, faminta, alega que assim o cozimento vai demorar mais, mas o pai assegura que isso não vai alterar o tempo de cozimento.

a) Qual deles está com a razão? Justifique.

b) Que alteração o aumento da chama provocaria? Aumento da taxa de vaporização.

7. É importante beber água durante atividades físicas para repor as perdas do organismo. Uma pessoa está fazendo uma sequência de exercícios aeróbicos. A evaporação do suor refrigera sua pele, dissipando 750 J/s, ou seja, 750 W. Considere o calor latente de vaporização da água 2 250 kJ/kg.



Rob Marmion/Shutterstock

a) Em um minuto, quantos gramas de suor são vaporizados? $m = 20$ g

b) Em meia hora de exercícios, quantos gramas de água a pessoa perde? $m = 600$ g

8. Queimaduras de vapor de água são terríveis. Deve-se ter muito cuidado ao manipular panelas ou outros recipientes dos quais esteja escapando vapor de água. Mesmo com a água já a 100 °C, necessita-se de 540 cal para vaporizar cada grama de água. Reciprocamente, se o vapor acidentalmente atingir nossa pele, para cada grama de vapor que condensa há a liberação de 540 cal. Como essa liberação é praticamente instantânea, elas podem provocar danos maiores do que se a pele tivesse encostado em um ferro em brasa.

a) Se 3 g de vapor se condensam em 0,1 s, qual é o fluxo de calor, em J/s (watts)? (Considere 1 cal = 4,2 J.) $P \simeq 68 \cdot 10^3$ W

b) O ferro, aquecido ao rubro, irradia cerca de $6 \cdot 10^4$ W/m². Uma chapa de ferro foi aquecida até esse ponto. A potência calculada no item anterior corresponde à potência irradiada por qual área dessa chapa? $A \simeq 1{,}1$ m²

9. Para evitar excesso de bagagem, um grupo de soldados, em missão na selva, cozinha seus alimentos em panelas descartáveis de papel, feitas na hora, usando-se dobraduras apoiadas em uma telinha metálica apropriada. Como o papel é biodegradável, o procedimento desses soldados, além de prático, é também ecológico.



Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Panela descartável de papel.

Sabendo-se que o **ponto de fulgor** de uma substância é a temperatura na qual ela entra em combustão e que, para o papel, esse valor é 451 °F, responda:

a) Com esses dados, é possível cozinhar arroz na panela de papel sem que o papel queime? Justifique.

b) É possível colocar a panela vazia na chama para depois completá-la com os ingredientes?

c) O comandante do grupo alerta para que eles não usem papel muito espesso, como cartolina, por exemplo. Qual é a razão?

10. O chamado gelo-seco é o CO_2 na fase sólida. Sob pressão normal, sua temperatura de sublimação é −78 °C. O calor latente de sublimação do CO_2 é 140 cal/g. Em vários *shows* é possível ver-se pedaços de gelo-seco sublimando sob temperatura ambiente.

À medida que cada grama sublima, ele subtrai do pedaço de onde vieram 140 cal. Assim, a temperatura do gelo remanescente permanece −78 °C, até que todo sólido se esgote.

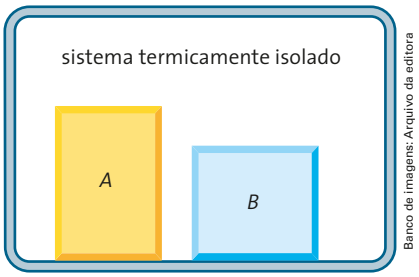
a) Como é possível os pedaços de gelo-seco sublimarem sob temperatura ambiente?

b) Quantas calorias são retiradas do ambiente por um pedaço de 30 g de gelo-seco que sublima totalmente? $Q = 4\,200$ cal

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

4 Trocas de calor

Um conjunto de corpos escolhidos arbitrariamente para estudo se constitui no que chamamos de **sistema**. Um sistema é dito termicamente isolado quando os corpos que fazem parte dele trocam calor entre si e não há trocas de calor com corpos alheios ao sistema. Se tivermos apenas dois corpos, *A* e *B*, totalizando nosso sistema, o calor cedido por um deles é forçosamente o calor recebido pelo outro (figura 2.13).



Banco de imagens: Arquivo da editora

Figura 2.13 Representação de dois corpos, *A* e *B*, em um sistema termicamente isolado.

Lembrando que calor trocado é uma grandeza algébrica, podemos inferir que não são iguais, e sim opostos. Algebricamente, temos:

$$Q_A = -Q_B \Rightarrow Q_A + Q_B = 0$$

No caso de termos vários corpos, escrevemos, genericamente:

$$\Sigma Q = 0$$

Se o sistema não for termicamente isolado, então há troca de calor com o ambiente, e podemos escrever:

$$Q_A + Q_B + Q_{\text{ambiente}} = 0$$

Com a intenção de garantir que a substância em estudo não seja afetada por trocas de calor com o ambiente, nas experiências de calorimetria utilizam-se recipientes chamados **calorímetros** (figura 2.14).

Quando dois ou mais corpos trocam calor, há transferência de energia térmica do corpo mais quente para o corpo mais frio. O **equilíbrio térmico** vai ocorrer quando já não houver diferença de temperatura entre os corpos. Nesse caso, além das condições impostas anteriormente, consideramos o fato de que a temperatura final será a mesma para todos os corpos (figura 2.15).

O equilíbrio térmico é então dado pela seguinte condição:

$$\theta_A = \theta_B = \theta_{\text{equilíbrio}}$$

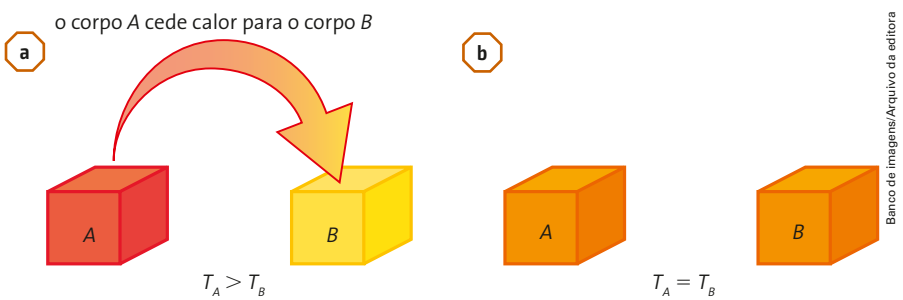


Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Andrei Nekrassov/Shutterstock

Figura 2.14 (**a**) Calorímetro simples: copo térmico, de poliestireno expandido, com tampa e termômetro. (**b**) Calorímetro mais preciso.

Calorímetro – Recipiente de paredes termicamente isolantes utilizado para trocas de calor entre dois ou mais corpos.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.15 Como θ_A é maior que θ_B, o corpo *A* cede calor para o corpo *B* (**a**). Quando θ_A é igual a θ_B, ou seja, quando ambos atingirem a temperatura de equilíbrio, $\theta_{\text{equilíbrio}}$, podemos dizer que a taxa de transferência de calor do corpo *A* para o corpo *B* é igual à taxa de transferência de calor do corpo *B* para o corpo *A* (**b**). Representações sem escala e em cores fantasia.

Exercício resolvido

3. Um calorímetro contém 200 g de água a 30 °C. Colocando-se uma pedra de gelo a −20 °C dentro dele, a temperatura de equilíbrio do sistema passa a ser 10 °C. Desprezando-se a capacidade térmica do calorímetro, determine a massa da pedra de gelo. Dados: $c_{água} = 1{,}0$ cal/g · °C; $c_{gelo} = 0{,}50$ cal/g · °C e $L_f = 80$ cal/g.

Resolução:

Sabemos que o gelo funde a 0 °C, e a temperatura de equilíbrio do sistema é 10 °C. Então, todo o gelo se fundiu e, após o equilíbrio, temos somente água líquida no calorímetro. Como o calorímetro não participa das trocas de calor, temos:

$$Q_{água} + Q_{gelo} = 0 \Rightarrow m_a \cdot c_a \cdot \Delta\theta + m_g \cdot c_g \cdot \Delta\theta_g + m_g \cdot L_f + m_g \cdot c_a \cdot \Delta\theta_a = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 200 \cdot 1{,}0 \cdot (10 - 30) + m_g \cdot 0{,}50 \cdot [0 - (-20)] + m_g \cdot 80 + m_g \cdot 1{,}0 \cdot (10 - 0) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -4\,000 + m_g \cdot 10 + m_g \cdot 80 + m_g \cdot 10 = 0 \Rightarrow m_g = \frac{4\,000}{100} \Rightarrow m_g = 40 \text{ g}$$

A massa da pedra de gelo é 40 g.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

11. Para preparar uma receita, um cozinheiro precisa de 4 litros de água a 40 °C, aproximadamente. Como ele não dispõe de um termômetro, resolve improvisar. Ele mistura água do filtro, que avalia estar a 20 °C, com água em ebulição a 100 °C. Para obter o desejado, quantos litros de cada ele deve misturar? Considere que 1 litro de água corresponde a 1000 g.
3 L de água fria e 1 L de água quente.

12. Em um dia muito quente, uma pessoa pretende tomar um copo de água bem gelada. Para isso, coloca num recipiente termicamente isolado (calorímetro), de capacidade térmica desprezível, 1000 g de água a 15 °C e 20 g de gelo a −5 °C. Qual é a temperatura de equilíbrio térmico desse sistema? $\theta = 13{,}1$ °C

13. A usina nuclear de Angra dos Reis opera com potência útil de 1 GW (10^9 W). Admitindo-se que para obter tal potência útil essa máquina térmica dissipe 4 GW, usando uma fração da água da baía para sua refrigeração, pergunta-se:

a) Se a água que passa através do sistema de refrigeração sofre uma elevação de temperatura de 50 °C, quantos litros de água passam por segundo pelo sistema? $1{,}9 \cdot 10^4$ L

b) Considerando que a baía, no seu conjunto, sofra uma elevação de temperatura de 0,5 °C (estimativa da Nuclebrás), do fluxo de água que entra na baía, qual é a fração que passa pelo sistema de refrigeração da usina? 1%

5 Diagrama de fases

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

O diagrama de fases de uma substância pura é uma representação gráfica dos valores de pressão e temperatura que determinam o estado de agregação da matéria. Ele é constituído por três curvas, que delimitam três regiões distintas. As regiões referem-se à fase sólida, à fase líquida e à fase gasosa.

Como exemplo, vamos considerar o diagrama de fases da água. Essa substância é muito familiar e pode ser encontrada na natureza com relativa abundância nas três fases (figura 2.16).

Diagrama de fases da água

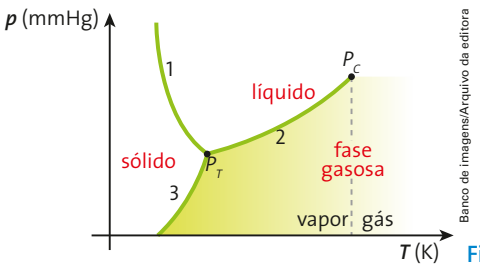


Figura 2.16

A curva (1) recebe o nome de **curva de fusão** e delimita a transição entre as fases sólida e líquida; a curva (2), **curva de vaporização**, delimita a transição entre as fases líquida e gasosa; e a curva (3), **curva de sublimação**, delimita a transição entre as fases sólida e gasosa.

O ponto de encontro das três curvas descreve o **ponto triplo** (P_T), ou seja, o ponto em que coexistem, em equilíbrio térmico, as três fases: sólida, líquida e gasosa.

Para a água, o ponto triplo apresenta uma pressão de 4,58 mmHg e uma temperatura de 0,01 °C.

Na curva de vaporização, o ponto representado por P_C é chamado de ponto crítico, correspondente a pressão e temperatura críticas. Acima da temperatura crítica, a substância é gás; abaixo, é vapor.

No diagrama, observamos ainda que se a substância estiver em uma temperatura acima da temperatura crítica, por mais que aumentemos a pressão, ela não se liquefará.

Uma substância no estado gasoso não pode ser liquefeita somente com o aumento de pressão.

É necessário que a temperatura seja reduzida para abaixo da crítica, quando, então, teremos vapor. Aí, sim, mantendo a temperatura constante, conseguiremos liquefazê-la.

Notamos que a distinção entre gás e vapor não se refere a diferenças estruturais nas substâncias, mas relaciona-se, na realidade, à possibilidade de liquefação.

Na verdade, trata-se de uma distinção de caráter didático.

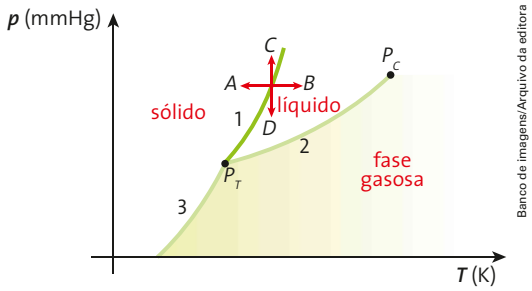
Curva de fusão

Para a análise da curva de fusão, devemos considerar dois grupos:

- substâncias que se dilatam com a fusão (maioria das substâncias);
- substâncias que se contraem com a fusão (água, bismuto, ferro e antimônio).

Os diagramas das **figuras 2.17** e **2.18** apresentam a curva de fusão para os dois tipos de substâncias.

Diagrama sólido/líquido para as substâncias que se dilatam com a fusão

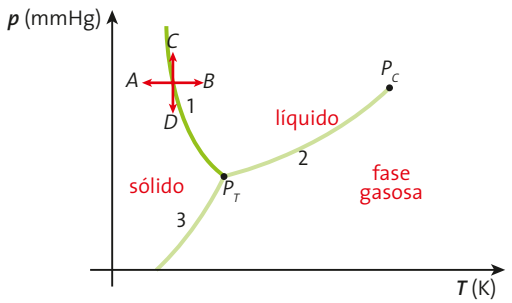


Banco de imagens/Arquivo da editora

$A \rightarrow B$	fusão por aquecimento sob pressão constante
$B \rightarrow A$	solidificação por resfriamento sob pressão constante
$C \rightarrow D$	fusão por redução da pressão sob temperatura constante
$D \rightarrow C$	solidificação por aumento de pressão sob temperatura constante

Figura 2.17

Diagrama sólido/líquido para as substâncias que se contraem com a fusão



Banco de imagens/Arquivo da editora

$A \rightarrow B$	fusão por aquecimento sob pressão constante
$B \rightarrow A$	solidificação por resfriamento sob pressão constante
$C \rightarrow D$	fusão por redução da pressão sob temperatura constante
$D \rightarrow C$	solidificação por aumento de pressão sob temperatura constante

Figura 2.18

Para a maioria das substâncias, o aumento da pressão ocasiona o aumento da temperatura de fusão, como vemos pelo diagrama da **figura 2.17**. Para as substâncias do segundo grupo, o aumento da pressão externa reduz a temperatura de fusão (**figura 2.18**). É o acontece com o gelo. Sob pressão normal de 1,0 atm, o gelo se funde a 0 °C, mas sob pressões mais elevadas, ele se funde a temperaturas abaixo de 0 °C.

Um exemplo prático ocorre nas pistas de patinação no gelo. Em virtude das finas lâminas dos patins, o patinador exerce uma grande pressão sobre o gelo em contato com as lâminas, provocando a sua fusão (**figura 2.19**). Mas logo após a passagem do patinador, a trilha de água líquida (gelo fundido) congela-se novamente, porque volta a ficar apenas sob a ação da pressão atmosférica (ambiente). Esse fenômeno é conhecido como "**regelo**".

John Tyndall (1820-1893), físico irlandês, fez uma experiência que permitiu a descoberta da fusão sob pressão, seguida de solidificação ou, como conhecemos, regelo. Ele comprovou que o gelo, após a penetração de um fio metálico, arame, por exemplo, liquefaz-se com a pressão do fio exercida e depois solidifica-se novamente, pois fica sujeito à pressão normal. Em outras palavras, o arame vai passando e a água vai regelando. Assim, o arame termina por transpassar ("atravessar") a barra de gelo sem que ela se parta, destacando o fenômeno do regelo.


Vit Kovalcik/Shutterstock/Glow Images

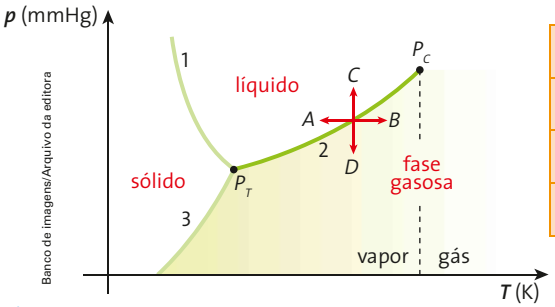
Figura 2.19 Fenômeno do regelo, como na experiência feita por John Tyndall (1820-1893).

Curva de vaporização

A curva de vaporização mostrada no diagrama da **figura 2.20** refere-se à **ebulição** e tem o mesmo aspecto para as substâncias puras em geral.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Curva de vaporização/condensação



Banco de imagens/Arquivo da editora

$A \rightarrow B$	vaporização por aquecimento sob pressão constante
$B \rightarrow A$	liquefação por resfriamento sob pressão constante
$C \rightarrow D$	vaporização por redução da pressão sob temperatura constante
$D \rightarrow C$	liquefação por aumento de pressão sob temperatura constante

Figura 2.20

O aumento de pressão externa acarreta também um aumento na temperatura de ebulição. O líquido entra em ebulição quando a pressão de vaporização supera a pressão externa. Na **figura 2.21**, vemos pequenas bolhas de vapor que se formaram no líquido.

A bolha é pressionada pelo vapor (internamente) e pela pressão externa, acrescida da pequena coluna de líquido sobre ela (que, veremos, é desprezível em relação à pressão atmosférica). Quando a pressão do vapor superar a pressão externa, a bolha aumentará de tamanho, ficando menos densa e migrando para a superfície do líquido. Esse é o processo de ebulição.

Para que a pressão de vaporização seja maior do que a pressão externa, podemos proceder de duas formas:

- aquecer o líquido, aumentando a sua temperatura até que a pressão de vaporização supere a pressão externa;
- diminuir a pressão externa, até que ela fique menor do que a pressão de vaporização. O segundo processo é incomum em nosso dia a dia, embora com muitas aplicações industriais.


Eugene Sergeev/Shutterstock/Glow Images

Figura 2.21 Pressão de vaporização maior do que a pressão externa.

Com suficiente redução de pressão, podemos fazer a água ferver até em temperatura ambiente. Na verdade, o diagrama de fases da água mostra que a água pode ferver a 0,01 °C, que é a temperatura do **ponto tríplice**. Essa também é a temperatura de fusão do gelo, sob essa pressão. O ponto tríplice corresponde, portanto, a uma situação em que o ponto de ebulição torna-se tão baixo que coincide com o ponto de fusão.

Para melhor exemplificar a relação entre a temperatura de ebulição e a pressão ambiente, voltemos à água. As **tabelas 2.4** e **2.5** representam a temperatura de ebulição da água em função da pressão em dois casos:

- diminuição da pressão com a altitude do local;
- aumento da pressão em recipientes apropriados (panela de pressão).

Tabela 2.4 Temperatura de ebulição da água em função da diminuição da pressão com a altitude do local

Altitude	Pressão (mmHg)	Pressão (atm)	Temperatura de ebulição (°C)
0	760	1,0	100
500	716	0,94	98,3
1000	674	0,89	96,5
2000	598	0,79	93,2
8800	258	0,34	72,0

Fonte: Young & Freedman. *University Physics*. 12. ed. Nova York: Pearson/Addison-Wesley, 2008.

Tabela 2.5 Temperatura de ebulição da água em função do aumento da pressão em recipientes apropriados (panela de pressão)

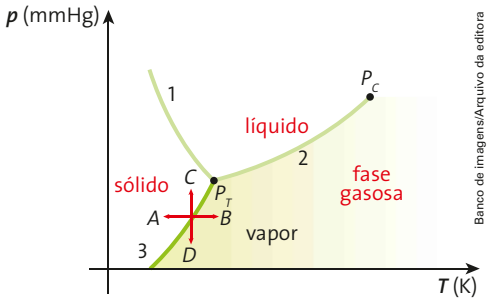
Pressão (atm)	Temperatura de ebulição (°C)
2,0	120
5,0	152
10	180
40	251

Fonte: Young & Freedman. *University Physics*. 12. ed. Nova York: Pearson/Addison-Wesley, 2008.

Curva de sublimação

Sublimação é a passagem direta do estado sólido para o estado de vapor ou vice-versa. Para que uma substância pura sofra sublimação, é necessário que ela se encontre a uma pressão inferior à do ponto triplo. Nessas condições, aquecendo-se o sólido sob pressão constante, ele passa diretamente para vapor; resfriando-se o vapor, ele passa diretamente para sólido (**figura 2.22**).

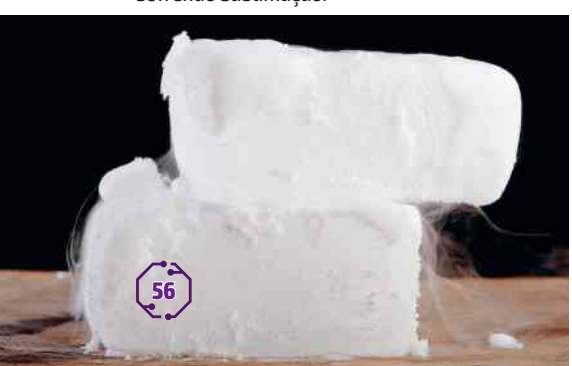
Curva de sublimação (sólido/vapor)



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.22

$A \rightarrow B$	sublimação por aquecimento sob pressão constante
$B \rightarrow A$	ressublimação por resfriamento sob pressão constante
$C \rightarrow D$	sublimação por redução da pressão sob temperatura constante
$D \rightarrow C$	ressublimação por aumento de pressão sob temperatura constante



Phloen/Alamy/Other Images

Figura 2.23 Gelo-seco sofrendo sublimação.

Observamos que um aumento de pressão acarreta um aumento na temperatura de sublimação.

Em nosso cotidiano, são poucas as substâncias que sublimam. Como exemplos, podemos citar a naftalina e o gelo-seco (CO_2), muito utilizado na conservação de sorvetes, pois mantém baixa a temperatura (**figura 2.23**).

No espaço sideral, onde a pressão é praticamente nula, há grandes blocos de gelo (CO_2, água, metano) misturados com **silicatos**. São os cometas. O aumento de temperatura provocado pela aproximação do Sol dá origem à sublimação. O vapor de água, resultado dessa sublimação, difunde a luz solar em todas as direções, formando a chamada cauda do cometa.

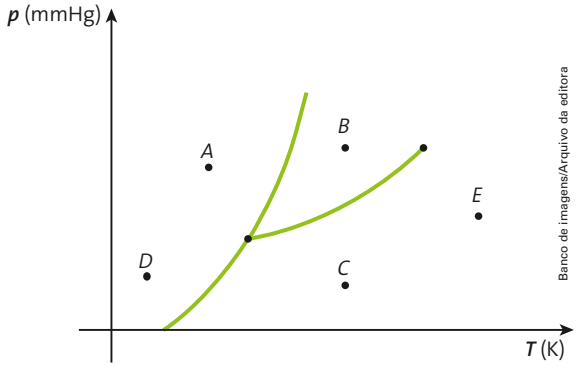
Silicato – Numeroso grupo de substâncias minerais constituídas pela combinação da sílica com um ou mais óxidos metálicos e água, e que constitui fração importante das rochas da crosta terrestre.

14. a) *A* e *D*: sólida; *B*: líquida; *C*: vapor; *E*: gasosa.
b) *AB*: fusão; *DC*: sublimação.
c) Não, pois está além da temperatura crítica.
d) Reduzir bastante a pressão ou aumentar bastante a temperatura.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

14. A figura a seguir representa o diagrama de fase para uma substância pura.



Responda às seguintes questões.
a) Em que fase se encontra a substância nas condições de temperatura e pressão descritas pelos pontos *A*, *B*, *C*, *D* e *E*?
b) Qual é o nome da transformação de *A* para *B*? E de *D* para *C*?
c) Mantendo-se a temperatura constante, é possível, a partir de *E*, liquefazer a substância? Por quê?
d) Descreva dois métodos para transformar a substância em vapor, a partir do ponto *A*.

15. O bismuto, assim como a água, ao se solidificar apresenta um aumento de volume. O que acontece com a temperatura de fusão do bismuto se a pressão for aumentada? Diminui a temperatura de fusão.

16. A altitude de determinada praça de uma cidade é 500 m. Nessa praça, há um carrinho de cachorro-quente com uma panela com água em ebulição. Qual é a temperatura dessa água? $T = 98{,}3\ °C$

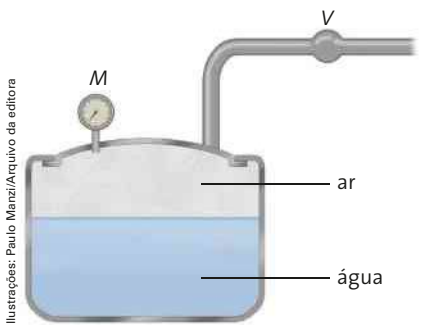
17. a) Aumentará.

17. Um cilindro dotado de um êmbolo móvel contém um líquido e o seu próprio vapor em equilíbrio, conforme a figura (sem escala e em cores fantasia).



O que acontece com a pressão no sistema se, sem alterar a temperatura:
a) comprimirmos o êmbolo, reduzindo o volume *V*, porém sem encostar no líquido;
b) puxarmos o êmbolo para cima, aumentando o volume (*V*).
Diminuirá.

18. Um recipiente hermeticamente fechado contém água e ar. A temperatura de todo o sistema é de 20 °C, constante, e a pressão externa é a pressão atmosférica normal. Se uma bomba *V* for ligada com o fim de obter o vácuo no recipiente, qual é o menor valor que poderá ser observado no manômetro *M*, enquanto houver água? $p = -742$ mmHg
Dados: pressão de saturação da água a 20 °C = = 18 mmHg; pressão atmosférica = 760 mmHg.



6 Umidade do ar

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

O ar atmosférico é uma mistura de gases, vapores e até de gotículas de líquido que ele contém em suspensão. Com relação aos gases e vapores, essa mistura consiste de aproximadamente 80% de nitrogênio, 18% de oxigênio, pequenas quantidades de **anidrido** carbônico, vapor de água e outras frações insignificantes de gases e vapores.

Anidrido – Composto binário de oxigênio e outro elemento que, ao reagir com a água, produz ácidos.

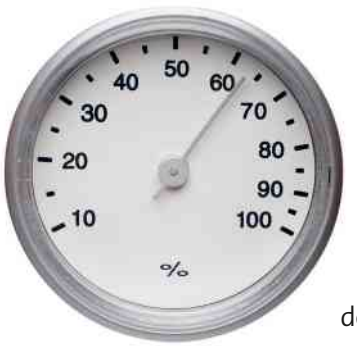
O ar úmido não é composto, como talvez fosse razoável presumir, de gotículas de água em suspensão no gás. Essa situação existe e um bom exemplo disso é a neblina, assim como a "fumaça" que se forma em uma sauna a vapor.

Quando essa observação é possível, estamos diante de minúsculas gotas de água líquida (vapor condensado) misturadas no ar, que é também o que se observa nas nuvens. Nessas situações, o que vemos não é vapor de água, pois o vapor é invisível.

Como a atmosfera é constituída por uma mistura de gases e vapores, esse conjunto exerce uma **pressão total**, resultante da soma das pressões parciais dos gases e vapores que compõem a mistura. A pressão parcial, exercida pelo vapor de água, é, evidentemente, menor ou igual à pressão de saturação na temperatura ambiente.

Assim, temos a **umidade relativa *h***, que é a razão entre a pressão parcial de vapor de água p_v e a pressão de saturação do vapor de água nessa temperatura p_s. Tratando-se de uma grandeza adimensional e menor ou igual à unidade, normalmente a expressamos em porcentagem. Algebricamente, temos:

$$h = \frac{p_v}{p_s} \text{ ou } h = \frac{p_v}{p_s} \cdot 100\%$$



Vblinov/Shutterstock/Glow Images

Figura 2.24 Higrômetro, aparelho utilizado para medir a umidade do ar.

Vemos que a grandeza *h* nos indica, percentualmente, a fração em que se encontra o vapor do ponto de saturação.

A umidade do ar é medida por meio de um aparelho chamado higrômetro (**figura 2.24**).

Um dos higrômetros mais antigos e conhecidos tem como elemento fundamental um fio de cabelo. O fio de cabelo, sob presença de vapor de água, fica mais dúctil (observe como nossos cabelos ficam mais macios em dias úmidos), como se fosse uma mola cuja constante elástica houvesse diminuído. Deixando-se o fio sob ação de uma força constante, exercida, por exemplo, por um pequeno corpo de peso *P* que o traciona, quanto maior for a umidade, maior será o seu comprimento, e podemos assim construir uma escala de umidade.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

19. Em uma sala a 20 °C, a pressão parcial do vapor de água é 12,25 mmHg. Nessa temperatura, a pressão de saturação é 17,5 mmHg.

a) Qual é a umidade relativa nesse local? $h = 70\%$

b) Se a temperatura da sala for baixada para 10 °C, e a pressão de saturação passar a ser 8,94 mmHg, qual será a nova umidade relativa? $h = 100\%$

20. (Unicamp-SP) O ar é capaz de reter certa concentração de vapor de água até atingir uma densidade de saturação. Quando a concentração de vapor de água atinge essa densidade de saturação ocorre uma condensação, ou seja, a água muda do estado gasoso (vapor) para o estado líquido. Essa densidade de saturação depende da temperatura, como mostra a tabela abaixo. A umidade relativa (em %) é definida como a razão entre a densidade de vapor de água existente no ambiente e a densidade de saturação.

Temperatura (°C)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
Densidade de saturação (g/m³)	11	12	14	16	18	20	22	24	26	28	31	34	36	41

Em um certo dia frio (12 °C) a umidade relativa é de 75%. Qual será a umidade relativa dentro de um quarto aquecido a 24 °C? $h = 37{,}5\%$

Em construção

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor

Jean-Baptiste Joseph Fourier

Matemático francês, famoso também como egiptólogo, Joseph Fourier exerceu forte influência na Física matemática com sua *Teoria analítica do calor*, publicada em 1822.

Fourier mostrou que a condução do calor nos sólidos pode ser analisada em termos de séries trigonométricas convergentes infinitas, atualmente conhecidas por "séries de Fourier". Além de transcender o particular fenômeno da condução do calor, seu trabalho estimulou uma ferramenta valiosa para várias pesquisas em Física matemática, a qual tem sido frequentemente identificada com a solução de problemas de contorno, abrangendo vários fenômenos naturais, como manchas solares, marés e clima. Seu trabalho teve também grande influência na teoria das funções de variáveis reais, um dos principais ramos da Matemática moderna.

Fonte de dados: FOURIER, Jean-Baptiste Joseph. In: *Encyclopaedia Britannica*. London: Britannica Editors, 2002.

- Converse com seu professor de História a respeito da viagem de Napoleão ao Egito e da participação de Fourier nesse evento.



SPL/Latinstock

Retrato de Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830).

Experimento

Veja comentários e sugestões sobre este experimento e respostas das atividades no Manual do Professor.

Regelo

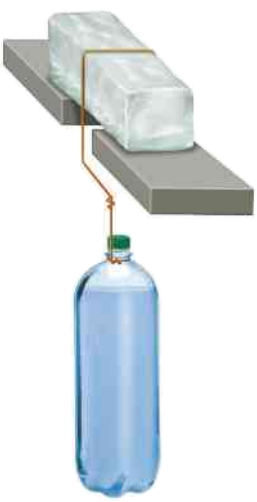
Esta atividade envolverá a observação de um fenômeno que comprova que a água na fase sólida é menos densa que na fase líquida.

Primeiro, será necessário fazer um bloco de gelo. Para isso, em um recipiente plástico comum, coloque água até uma altura de cerca de 3 cm. Depois ponha o recipiente no congelador e deixe por algumas horas, até que a água se solidifique.

Em seguida, retire o bloco de gelo do recipiente e, com um fio de cobre bem fino (quanto mais fino, melhor), de mais ou menos 2 metros de comprimento, faça a montagem indicada na figura ao lado.

Agora observe como se dá o processo de regelo. Como a área em que está pendurado o objeto pesado é muito pequena (por isso a lateral do bloco não pode ser muito larga), nessa região a pressão é elevada e provoca a fusão do gelo. Após a passagem do fio, a pressão volta à pressão ambiente e o produto da fusão volta à fase sólida. O fio vai transpassar o bloco inteiro, até o objeto pendurado cair, mas, ao final, o bloco continuará inteiro.

1. Com luvas, pegue duas "pedrinhas" de gelo do congelador de uma geladeira comum e pressione fortemente uma contra a outra. O que acontece? Por quê?
2. Repita o procedimento anterior, mas agora com "pedrinhas" de gelo de um *freezer*. A temperatura desse gelo deve estar em torno de −18 °C. O resultado foi o mesmo? Por quê?



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Representação (sem escala e em cores fantasia) da montagem do experimento.

Retomando

Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resolução dos exercícios deste capítulo.

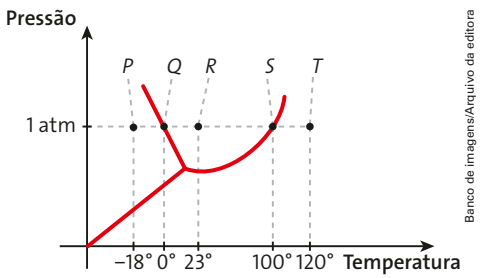
21. (Enem) Se, por economia, abaixarmos o fogo sob uma panela de pressão logo que se inicia a saída de vapor pela válvula, de forma a simplesmente manter a fervura, o tempo de cozimento:

a) será maior porque a panela "esfria".
b) será menor, pois diminui a perda de água.
c) será maior, pois a pressão diminui.
d) será maior, pois a evaporação diminui.
x e) não será alterado, pois a temperatura não varia.

22. (UEFS-BA) Uma amostra de 1,0 kg de chumbo é aquecida a 80 °C e depositada em um calorímetro contendo 400,0 g de água, inicialmente a 20 °C. Considerando-se a capacidade calorífica do recipiente igual a 20 cal/°C e os calores específicos do chumbo e da água iguais, respectivamente, a 0,03 cal/g°C e 1,0 cal/g°C, conclui-se que a temperatura final de equilíbrio do sistema, em °C, é igual a:

a) 36. b) 32. c) 28. x d) 24. e) 20

23. (Ufla-PAS-MG) Considere o diagrama de fases (ou diagrama de estado), ilustrado abaixo, em que uma amostra de gelo está inicialmente no estado *P*, a 1 atm e −18 °C.



Banco de imagens/Arquivo da editora

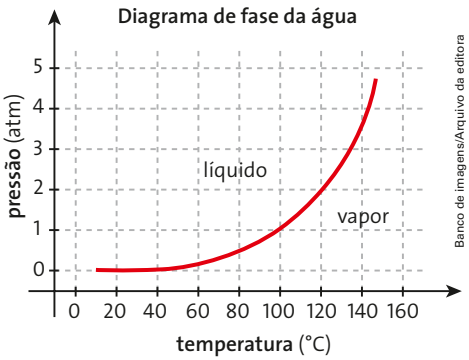
Durante o processo termodinâmico, essa amostra passará pelos estados *Q*, *R*, *S* e *T*, respectivamente. É correto afirmar que:

x a) Ao chegar no estado *Q*, tem-se a fusão do gelo; no estado *R*, tem-se água líquida; no estado *S*, a vaporização de água; e no estado *T*, o vapor de água.
b) Ao chegar no estado *Q*, tem-se a fusão do gelo; no estado *R*, tem-se água líquida; no estado *S*, a condensação do vapor; e no estado *T*, vapor de água.
c) Ao chegar no estado *Q*, tem-se a solidificação da água; no estado *R*, tem-se água líquida; no estado *S*, a condensação do vapor; e no estado *T*, vapor de água.
d) Ao chegar no estado *Q*, tem-se a solidificação da água; no estado *R*, tem-se água líquida; no estado *S*, a vaporização de água; e no estado *T*, o vapor de água.

24. (Enem) A panela de pressão permite que os alimentos sejam cozidos em água muito mais rapidamente do que em panelas convencionais. Sua tampa possui uma borracha de vedação que não deixa o vapor escapar, a não ser através de um orifício central sobre o qual assenta um peso que controla a pressão. Quando em uso, desenvolve-se uma pressão elevada no seu interior. Para a sua operação segura, é necessário observar a limpeza do orifício central e a existência de uma válvula de segurança, normalmente situada na tampa. O esquema da panela de pressão e um diagrama de fase da água são apresentados abaixo.



Antonio Robson/Arquivo da editora



Banco de imagens/Arquivo da editora

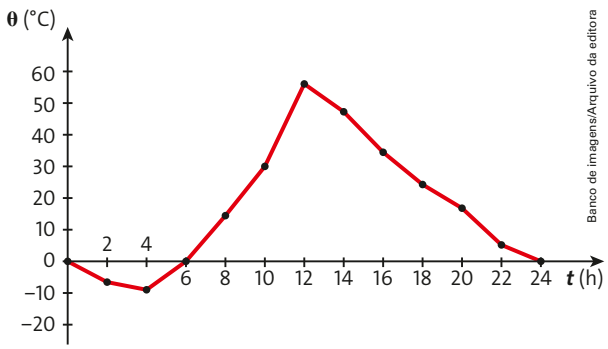
A vantagem do uso de panela de pressão é a rapidez para o cozimento de alimentos e isto se deve:

a) à pressão no seu interior, que é igual à pressão externa.
x b) à temperatura de seu interior, que está acima da temperatura de ebulição da água no local.
c) à quantidade de calor adicional que é transferida à panela.
d) à quantidade de vapor que está sendo liberada pela válvula.
e) à espessura da sua parede, que é maior que a das panelas comuns.

25. (UEA-AM) O aquecimento solar de água para banho é uma solução energética ecológica e econômica. Sistemas como esses, em dias de baixa insolação, devem compensar a falta de irradiação solar com o acionamento de resistores elétricos dentro de *boilers*, recipientes nos quais a água é mantida aquecida.
Um desses *boilers*, de capacidade 100 L, reteve a água a 24 °C e, por isso, um termostato teve que acionar o resistor elétrico para que a temperatura fosse elevada para 32 °C. Sendo o calor específico da água 1 cal/g · °C, 1 cal igual a 4,2 J e a densidade da água igual a 10^3 g/L, a energia elétrica, em J, que teve de ser empregada para promover esse aquecimento foi, aproximadamente:

a) 420 000.
b) 860 000.
X c) 3 400 000.
d) 3 800 000.
e) 5 300 000.

26. (Vunesp) O gráfico representa, aproximadamente, como varia a temperatura ambiente no período de um dia, em determinada época do ano, no deserto do Saara. Nessa região a maior parte da superfície do solo é coberta por areia e a umidade relativa do ar é baixíssima.

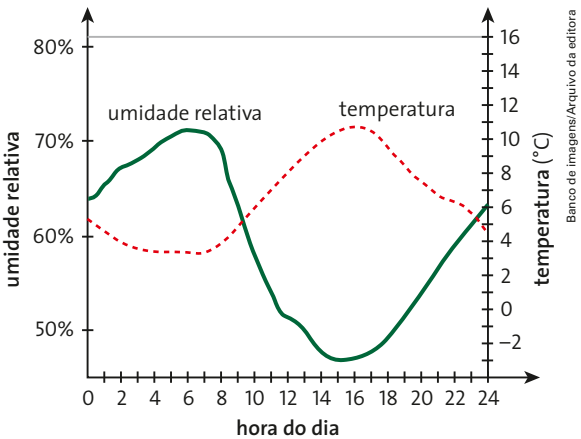


Banco de imagens/Arquivo da editora

A grande amplitude térmica diária, observada no gráfico, pode, dentre outros fatores, ser explicada pelo fato de que:

a) a água líquida apresenta calor específico menor do que o da areia sólida e, assim, devido à maior presença de areia do que de água na região, a retenção de calor no ambiente torna-se difícil, causando a drástica queda de temperatura na madrugada.
X b) o calor específico da areia é baixo e, por isso, ela esquenta rapidamente quando ganha calor e esfria rapidamente quando perde. A baixa umidade relativa do ar não retém o calor perdido pela areia quando ela esfria, explicando a queda de temperatura na madrugada.
c) a falta de água e, consequentemente, de nuvens no ambiente do Saara intensifica o efeito estufa, o que contribui para uma maior retenção de energia térmica na região.
d) o calor se propaga facilmente na região por condução, uma vez que o ar seco é excelente condutor de calor. Dessa forma, a energia retida pela areia durante o dia se dissipa pelo ambiente à noite, causando a queda de temperatura.
e) a grande massa de areia existente na região do Saara apresenta grande mobilidade, causando a dissipação do calor absorvido durante o dia e a drástica queda de temperatura à noite.

27. (Enem) Umidade relativa do ar é o termo usado para descrever a quantidade de vapor de água contido na atmosfera. Ela é definida pela razão entre o conteúdo real de umidade de uma parcela de ar e a quantidade de umidade que a mesma parcela de ar pode armazenar na mesma temperatura e pressão quando está saturada de vapor, isto é, com 100% de umidade relativa. O gráfico representa a relação entre a umidade relativa do ar e sua temperatura ao longo de um período de 24 horas em um determinado local.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Considerando-se as informações do texto e do gráfico, conclui-se que:

X a) a insolação é um fator que provoca variação da umidade relativa do ar.
b) o ar vai adquirindo maior quantidade de vapor de água à medida que se aquece.
c) a presença de umidade relativa do ar é diretamente proporcional à temperatura do ar.
d) a umidade relativa do ar indica, em termos absolutos, a quantidade de vapor de água existente na atmosfera.
e) a variação da umidade do ar se verifica no verão, e não no inverno, quando as temperaturas permanecem baixas.

UNIDADE 2

Energia e meio ambiente

CAPÍTULO 3

Primeira lei da Termodinâmica

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

Renata Mello/Pulsar Imagens



Prática de Stand Up Paddle na praia de Copacabana, Rio de Janeiro (RJ), 2015.

As calorias, energia química ingerida na forma de alimentos, se não utilizadas para realizar trabalho (exercício físico ou no metabolismo basal), ficam armazenadas em nosso organismo como gordura. Você "queima" as calorias ingeridas ou prefere armazená-las em seu organismo?



João Moura/Fotoarena

Figura 3.1 O desenvolvimento dos voos com balões e aviões está ligado aos estudos dos gases. 21º campeonato mundial de balonismo. Rio Claro (SP), 2014.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Estudo dos gases

A concepção do que é a fase gasosa da matéria foi sendo construída por muitas descobertas da Física, não sendo resultado da conceituação feita por apenas um pesquisador brilhante sobre essa questão como a entendemos hoje. Dessa forma, ela é resultado de vários aperfeiçoamentos ocorridos com o passar do tempo (figura 3.1).

Atualmente, dispomos de um modelo de gás que descreve, com excelente aproximação e simplicidade, o comportamento dos gases em geral, desde o oxigênio que respiramos até a grande quantidade de amônia da atmosfera de Júpiter.

Os gases não são uma extensão contínua de matéria, mas, sim, um conjunto de partículas muito distantes entre si, em relação às suas dimensões, que podemos considerar pontos materiais. O conjunto que chamamos de gás são as partículas e os grandes espaços vazios entre elas. As interações entre as partículas ocorrem somente durante os choques. A atração ou repulsão entre as partículas é desprezível em seu efeito global. Consequentemente, elas só trocam forças durante as colisões, que são extremamente rápidas. Em condições ambientes (pressão de 1 atm e temperatura de 25 °C), essas características se aplicam à maioria dos gases. Essa hipótese está intimamente relacionada com o princípio da conservação da energia.

Cerca de 10% dos elementos da tabela periódica, em condições ambientes, são gases. O ar que respiramos é uma mistura de gases composta basicamente de nitrogênio e oxigênio.

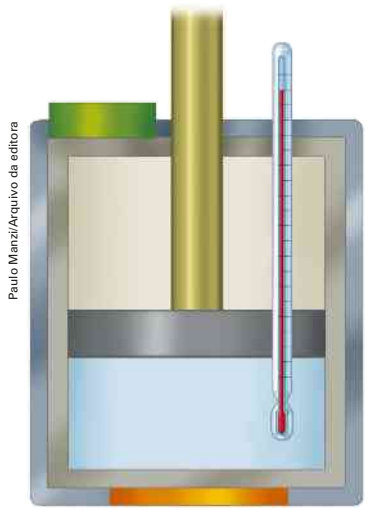
Embora os gases sejam constituídos de partículas, vamos nos preocupar apenas com três grandezas macroscópicas que caracterizam um sistema gasoso: pressão, volume e temperatura. Em função dessas grandezas, estudaremos o comportamento de um gás que consideraremos como **ideal** ou **perfeito**.

Na natureza, o gás ideal ou perfeito não existe. Experimentalmente, porém, verificamos que os gases submetidos a baixas pressões e altas temperaturas (ou seja, com densidades bem baixas) têm comportamentos muito próximos dos previstos para o gás ideal.

A pressão, o volume e a temperatura são as grandezas macroscópicas que definem a situação em que um gás se encontra, ou seja, o seu **estado termodinâmico**. Por isso recebem o nome de **variáveis de estado**. Podemos associá-las a um gás da seguinte forma:

- pressão p: colisões que as partículas constituintes do gás efetuam contra as paredes do recipiente que o contém;
- volume V: volume do recipiente;
- temperatura T: grau de agitação térmica molecular.

Quando uma dessas grandezas sofre alteração, ocorre mudança em pelo menos uma das outras duas grandezas. Nesse caso, dizemos que o gás sofre uma transformação (figura 3.2).



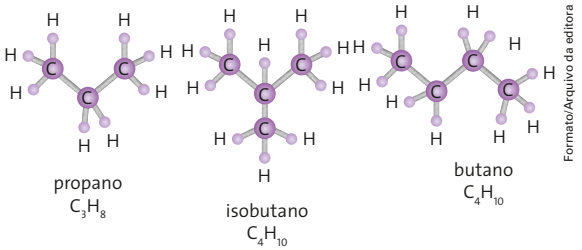
Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 3.2 Para ocorrer uma transformação gasosa, ao menos duas variáveis de estado devem ser alteradas. Representação, sem escala e em cores fantasia, de um calorímetro.

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

O gás liquefeito de petróleo

No Brasil o principal uso do gás liquefeito de petróleo (GLP) é na cozinha, mas no mundo ele desempenha papéis diferentes, como o aquecimento dos lares em certos lugares na Índia e algumas áreas rurais dos Estado Unidos, além de servir como combustível na Europa, Estados Unidos, Austrália e Ásia, mas seu uso em veículos é proibido no Brasil por determinação da Agência Nacional do Petróleo.



Representação (sem escala e em cores fantasia) de estruturas moleculares dos principais constituintes do GLP.

O GLP é formado por diversos hidrocarbonetos, mas os principais constituintes são o propano e o butano, dois gases de petróleo que são armazenados na forma líquida sob pressurização moderada. Outro elemento utilizado é o isobutano, que possui a mesma fórmula química do butano, mas com estrutura molecular diferente. O tipo de uso é que determina as proporções em que o butano e o isobutano serão misturados com o propano.

Como o ponto de ebulição do propano é –42 °C, ele se torna um combustível portátil útil, pois mesmo a temperaturas baixas ocorre a vaporização no momento em que é liberado do recipiente pressurizado. Por isso é um combustível que não requer muito equipamento para vaporizá-lo e misturá-lo com o ar, a única coisa necessária é um bico. O ponto de ebulição do butano é por volta de –0,6 °C, por isso ele possui usos mais limitados e é misturado com propano, em vez de ser usado na sua forma pura.

A tabela ao lado compara a energia liberada na queima de diversos combustíveis, de onde se conclui que a energia liberada pelo GLP é maior que as principais fontes do dia a dia.

Comparação entre diversos combustíveis em termo de energia

Combustível	Energia liberada (kcal por kg)
propano	10,85
butano	10,70
gasolina	8,80
carvão	5,00
madeira	3,50

- Considerando o diagrama de fases das substâncias no capítulo 2, nas condições em que é utilizado, o GLP é gás ou vapor?

Fonte de dados: GRABIANOWSKI, Ed. Como funciona o gás liquefeito de petróleo. Disponível em: <http://carros.hsw.uol.com.br/gas-liquefeito-de-petroleo.htm>. Acesso em: out. 2015.

Transformações gasosas

Normalmente, durante uma transformação gasosa, a pressão, o volume e a temperatura variam. Entretanto, sob determinadas condições, uma das variáveis de estado pode ser mantida constante; nesse caso, temos as transformações gasosas particulares: **isobárica** (pressão constante), **isométrica** (volume constante) e **isotérmica** (temperatura constante). A tabela 3.1 apresenta o comportamento das variáveis de estado para cada uma das transformações particulares e para a transformação **geral** (pressão, volume e temperatura variam). É importante ressaltar que, nas transformações gasosas apresentadas na tabela, a quantidade de gás não se altera.

Tabela 3.1 Transformações gasosas

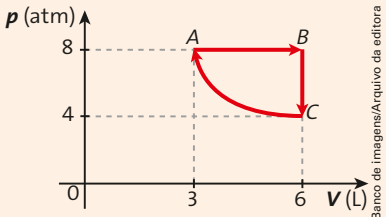
Transformação	Característica	Relação	Equação
isobárica	pressão constante	O volume é diretamente proporcional à temperatura absoluta.	$\frac{V}{T} = \text{constante}$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
isométrica	volume constante	A pressão é diretamente proporcional à temperatura absoluta.	$\frac{p}{T} = \text{constante}$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
isotérmica	temperatura constante	A pressão é inversamente proporcional ao volume.	$p \cdot V = \text{constante}$ $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$
geral	pressão, volume e temperatura variam	$\frac{p \cdot V}{T} = \text{constante}$	$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$

Trabalho em equipe

Façam uma pesquisa, em equipe, sobre os físicos franceses J. Charles (1746-1823) e J. L. Gay-Lussac (1778-1850) e sobre o físico e químico irlandês Robert Boyle (1627-1691), que desenvolveram as teorias sobre as transformações gasosas. Solicitem orientação do professor de Química e conversem com o professor de Matemática sobre as relações entre duas grandezas diretamente proporcionais e duas inversamente proporcionais. Apresentem seus resultados em um painel com os respectivos gráficos das transformações.

Exercício resolvido

1. Determinada massa de um gás ideal sofre uma sequência de três transformações, retornando ao estado inicial (ver gráfico ao lado). Uma das transformações é isotérmica. A temperatura do gás no estado *A* é 600 K.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Qual das transformações ($A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$ ou $C \rightarrow A$) é a isotérmica?
b) Classifique as duas transformações que não são isotérmicas.
c) Determine as pressões e temperaturas nos estados *B* e *C*.

Resolução:

a) O diagrama de uma isotérmica é uma hipérbole, portanto, é a transformação $C \rightarrow A$.
b) A transformação $A \rightarrow B$ é isobárica e a $B \rightarrow C$ é isométrica.
c) Na isobárica:
De acordo com o gráfico, no ponto *B*, temos:

$$p_B = p_A = 8 \text{ atm}$$

E a temperatura do ponto *B* é dada por:

$$\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_B}{T_B} \Rightarrow \frac{3}{600} = \frac{6}{T_B} \Rightarrow T_B = 1200 \text{ K}$$

De acordo com o gráfico, no ponto *C*, temos:
$p_C = 4$ atm
Como a transformação *AC* é isotérmica:
$T_C = T_A = 600$ K

Equação de estado de um gás – Clapeyron

Alguns números, por sua importância, recebem um nome. É o caso, por exemplo, do número obtido pela relação entre o perímetro e o diâmetro de um círculo, o qual chamamos **pi** ($\pi = 3{,}14159...$). Um corpo pode ter massa de π quilogramas, uma viagem pode durar π horas, e assim por diante.

A **dúzia**, muito utilizada no cotidiano, também é um exemplo disso. Fala-se em uma dúzia de ovos, meia dúzia de mangas, etc.

Um caso semelhante é o mol. Considera-se que 1 mol é a quantidade 602 000 000 000 000 000 000 000 ($6{,}02 \cdot 10^{23}$) de um mesmo tipo de elementos (átomos, moléculas, íons, elétrons), expressa em gramas, de determinada substância.

Um mol de qualquer substância contém sempre o mesmo número de partículas elementares, ou seja, $6{,}02 \cdot 10^{23}$, embora a massa que corresponde a 1 mol dependa do tipo de substância considerada. Por exemplo, 1 mol de carbono corresponde a 12 g, ou seja, $6{,}02 \cdot 10^{23}$ átomos de carbono têm massa de 12 g. Ao afirmarmos que 1 mol de gás carbônico (CO_2) corresponde à massa de 44 g, estamos dizendo que $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas de CO_2 têm massa de 44 g.

Esse número (**mol**) é também conhecido como **número de Avogadro** (N_A), em homenagem ao físico italiano Amedeo Avogadro (1776-1856):

$$1 \text{ mol} = N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ partículas, átomos, íons, moléculas, etc.}$$

Gás carbônico – Dióxido de carbono; é um gás inodoro, solúvel em água, encontrado na atmosfera e essencial na realização do processo de fotossíntese das plantas. É liberado no processo de respiração dos seres vivos e também na queima de combustíveis fósseis.

A massa, em grama, correspondente a 1 mol de partículas elementares de qualquer substância recebe o nome de massa molecular *M*. Se determinada quantidade de uma substância apresentar uma massa *m* diferente de sua **molécula-grama** *M*, então a quantidade de mols *n* de partículas elementares correspondentes a essa porção de substância é dada por:

Molécula-grama – É a soma das massas atômicas dos átomos da molécula, expressa em grama. Em uma molécula-grama há $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas.

$$n = \frac{m}{M}$$

O físico francês Paul Émile Clapeyron (1799-1864), analisando as relações entre as variáveis de estado com a quantidade e o tipo de gás, observou que a razão $\frac{p \cdot V}{T}$ é diretamente proporcional à quantidade de mols *n* de partículas do gás, que podemos escrever algebricamente como:

$$\frac{p \cdot V}{T} = n \cdot R$$

em que *R* é a constante de proporcionalidade, idêntica para todos os gases perfeitos, embora seu valor dependa do sistema de unidades adotado. A expressão acima pode ser escrita como:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), utilizamos a pressão em N/m^2; o volume em m^3 e a temperatura em kelvin. Nessas condições, o valor de *R* é:

$$R = 8{,}31 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Quando a pressão é dada em atmosfera (atm), o volume em litro (L) e a temperatura em kelvin (K), a transformação de unidades resulta, para a constante *R*, o valor de:

$$R = 0{,}082 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K}$$

Um estado do gás de particular interesse, chamado de Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), é observado à pressão atmosférica normal ($p = 1$ atm) e quando a temperatura é 0 °C (273 K). Assim 1 mol do gás em CNTP é 22,4 litros.

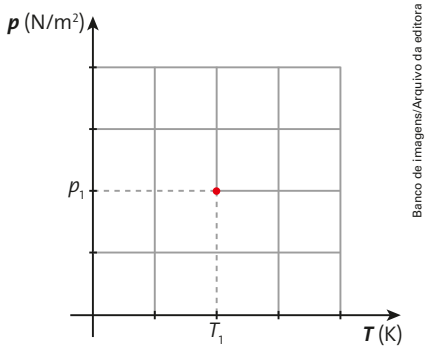
Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

1. Um gás está contido em um cilindro de volume V com pressão de 1 atm e temperatura de 27 °C. Esse cilindro tem uma válvula de segurança que libera o gás se a pressão exceder 3 atm. Qual é a temperatura máxima que esse gás pode atingir para que a válvula de segurança não entre em ação? $T = 627\ °C$

2. Uma lâmpada elétrica de filamento contém certa quantidade de um gás inerte. Quando a lâmpada está funcionando, o gás apresenta uma temperatura aproximada de 127 °C e a sua pressão é igual à atmosférica. Supondo-se que o volume da lâmpada não varie de forma apreciável, qual será a pressão do gás à temperatura ambiente, de 27 °C, quando a lâmpada estiver desligada? $p = 0{,}75$ atm

3. Um recipiente de volume constante contém certa massa de um gás ideal, à pressão p_1 e temperatura T_1. Retira-se do gás determinada quantidade de calor, e a temperatura cai à metade do valor inicial.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Qual é o novo valor da pressão do gás? $p_2 = \frac{1}{2}\,p_1$

b) Copie o gráfico da figura no caderno e localize os novos valores da temperatura e da pressão.
Veja resposta no Manual do Professor.

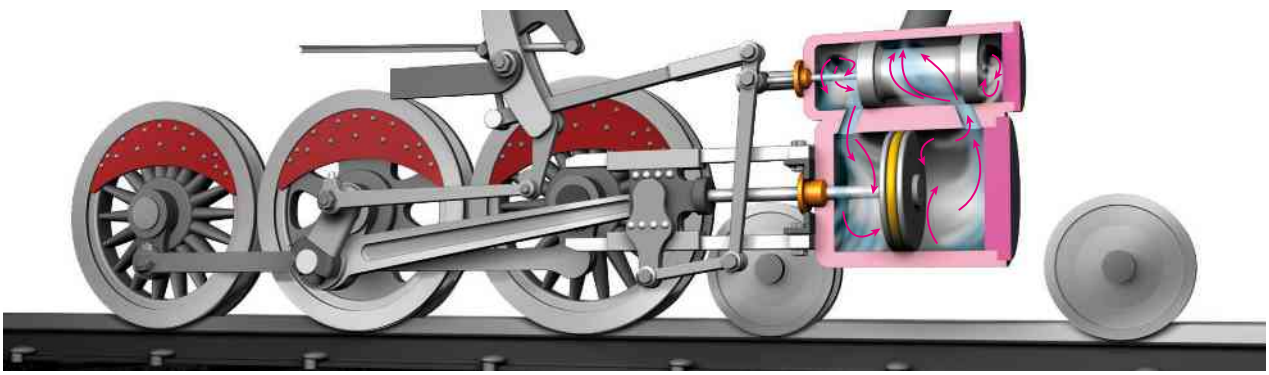
4. Explique por que é difícil abrir a porta de uma geladeira imediatamente após ela ter sido fechada.
Veja resposta no Manual do Professor.

2 Trabalho em Termodinâmica

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

Os gases podem experimentar variações de volume muito maiores que os sólidos e os líquidos. Durante a variação de volume de um gás, submetido a uma transformação na qual seu volume varia, o gás aplica forças nas paredes móveis do recipiente em que está contido durante esse processo, e essas forças realizam trabalho mecânico. É isso que ocorre, por exemplo, no motor de um automóvel. A expansão gasosa realiza trabalho e a energia térmica é transformada em mecânica (**figura 3.3**).

Vejamos como calcular esse trabalho nos vários tipos de transformação que um gás pode sofrer.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 3.3 A queima de um combustível aquece a água e o vapor empurra os pistões, produzindo o movimento das rodas. Representação sem escala e em cores fantasia.

Transformação isobárica

Consideremos o aquecimento de um gás contido em um recipiente fechado e provido de um êmbolo de massa *m* que pode se movimentar sem atrito.

O gás, recebendo calor da fonte térmica, consegue empurrar o êmbolo (pistão), realizando trabalho mecânico por meio das forças que aplica. Se o deslocamento $\Delta\vec{r}$ se efetuar com velocidade constante, a força aplicada pelo gás está equilibrando o peso do êmbolo e a pressão atmosférica. Assim sendo, a força aplicada pelo gás $\vec{F}$ permanece constante ao longo desse deslocamento.

O trabalho realizado por uma força constante em um deslocamento retilíneo é uma grandeza escalar que pode ser calculada por:

$$\tau = F \cdot \Delta r \cdot \cos\theta$$

Nessa expressão, θ é o ângulo entre a força e o deslocamento. Nas condições descritas e ilustradas pela figura 3.4, temos:

- $p = \dfrac{F}{A} \Rightarrow F = p \cdot A$
- $\theta = 0 \Rightarrow \cos\theta = 1$
- $\Delta V = V_{final} - V_{inicial} = A \cdot \Delta r$

Substituindo esses resultados no cálculo do trabalho, obtemos:

$$\tau = F \cdot \Delta r \cdot \cos\theta = p \cdot A \cdot \Delta r \cdot 1$$

$$\tau = p \cdot \Delta V$$

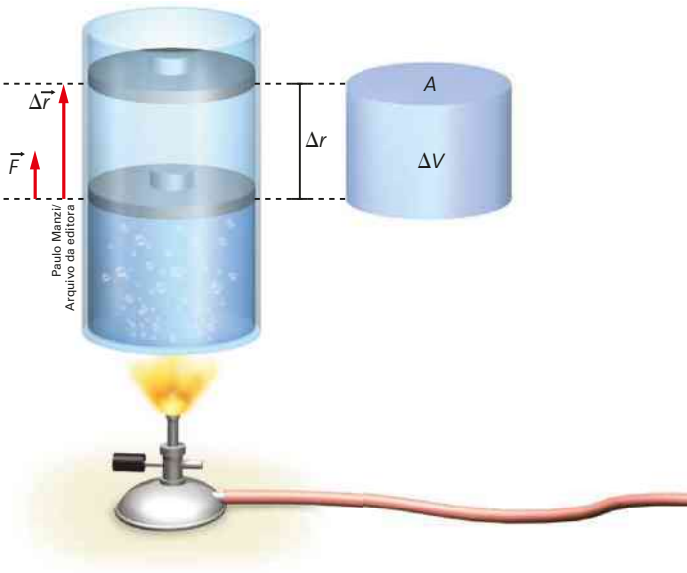


Figura 3.4 O gás, ao receber calor de uma fonte externa, empurra o pistão móvel e realiza trabalho por meio de uma força. Representação sem escala e em cores fantasia.

De acordo com o SI, a pressão é expressa em **pascal (N/m²)**, a variação de volume em **metro cúbico (m³)** e o trabalho em **joule (J)**.

São também muito utilizadas as unidades **atmosfera (atm)**, para pressão, e **litro (L)** para volume. Nesse caso, efetuamos os cálculos observando que:

$$1\ \text{atm} \cdot \text{L} = \left(10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \cdot (10^{-3}\ \text{m}^3) = 10^2\ \text{N} \cdot \text{m} = 100\ \text{J}$$

A expressão $\tau = p \cdot \Delta V$ é válida tanto para a expansão (aumento de volume) como para a compressão (redução de volume) de um gás. Em uma expansão, $\Delta V > 0$ (figura 3.5), como a pressão absoluta exercida por um gás é sempre positiva, o trabalho é positivo (motor). Já na compressão, $\Delta V < 0$ (figura 3.6), o trabalho é negativo (resistente).

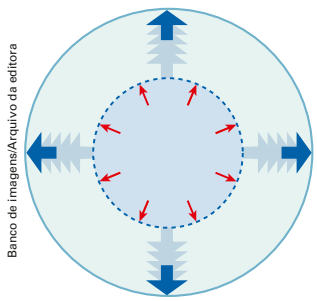


Figura 3.5 Expansão gasosa: $V_{final} > V_{inicial} \Rightarrow \Delta V > 0$. As forças aplicadas pelo gás favorecem a expansão. O trabalho do gás é motor (positivo).

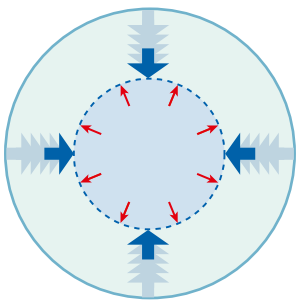
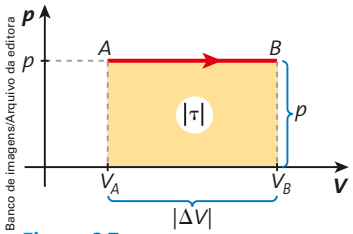


Figura 3.6 Compressão gasosa: $V_{final} < V_{inicial} \Rightarrow \Delta V < 0$. As forças aplicadas pelo gás se opõem à compressão. O trabalho do gás é resistente (negativo).

A expansão corresponde a um processo em que o gás transfere energia ao meio externo, pois o trabalho realizado por ele é motor; no entanto, na compressão, o gás recebe energia do meio externo.

Diagrama $p \times V$ em uma transformação isobárica



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 3.7

A transformação isobárica pode ser representada graficamente em um diagrama $p \times V$, conforme figura 3.7.

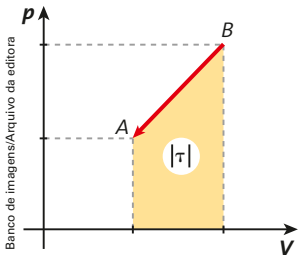
Com base na figura, temos:

$$\left.\begin{array}{l} \text{Área} \overset{n}{=} p \cdot |\Delta V| \\ |\tau| = p \cdot |\Delta V| \end{array}\right\} \Rightarrow |\tau| \overset{n}{=} p \cdot |\Delta V|$$

O módulo do trabalho é dado, numericamente, pela área da figura no diagrama $p \times V$. O valor algébrico é obtido considerando-se:

Expansão: $A \rightarrow B$	$\tau > 0$: motor
Compressão: $B \rightarrow A$	$\tau < 0$: resistente

Diagrama $p \times V$ para uma transformação na qual a pressão varia



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 3.8

Se a pressão for variável durante a transformação sofrida por determinada massa de gás, não podemos usar a expressão algébrica obtida para o caso da transformação isobárica. Entretanto, a área compreendida pelo diagrama $p \times V$ nos fornece, em módulo, o trabalho realizado pelo gás (figura 3.8).

$$|\tau| \overset{n}{=} \text{Área}$$

Exercício resolvido

2. Antes de uma longa viagem, o motorista de um automóvel calibra os pneus a 27 °C, para que todos tenham 32 psi, que popularmente seria dito 32 libras. Essa unidade ainda é usada por hábitos históricos de mais de meio século, quando a maioria dos carros era importada de países que adotam unidades britânicas. O psi é abreviação de libras por polegada quadrada (*pound per square inch*) sendo que a conversão é: 1 atm = 14,7 psi.
A medida de pressão dos pneus é feita com um manômetro, que mede quanto a pressão interna do pneu supera a atmosférica, mas não a pressão absoluta do ar em seu interior. Por exemplo, se o manômetro indica 0 (zero), isso não significa que reina o vácuo no interior do pneu, mas sim que a diferença entre a pressão interna e a atmosférica é nula.
Após um tempo rodando sobre asfalto quente, o motorista verifica que a pressão manométrica dos pneus passa de 35 psi.

a) Faça uma estimativa da temperatura do ar no interior dos pneus, considerando que não houve variação no volume.
b) Qual foi o trabalho realizado pelo ar dentro do pneu durante o aquecimento?
c) Considerando o ar como um gás ideal de massa atômica 29 u.m.a. e o volume interno do pneu 20 L, quantos mols de partículas do gás há dentro do pneu?
d) Na situação inicial, tendo em conta que a pressão externa é a atmosférica, qual é a pressão que suporta a estrutura do pneu?

Resolução:

a) Primeiro, vamos converter as pressões para valores absolutos, assim como a temperatura. As equações do gás perfeito são referentes a valores absolutos.

$p_i = 32 + 14{,}7 = 46{,}7$ psi

$p_f = 35 + 14{,}7 = 49{,}7$ psi

$T_i = 27 + 273 = 300$ K

Como o volume é constante, temos:

$$\frac{p_f}{T_f} = \frac{p_i}{T_i}, \text{ isto é, } \frac{49{,}7}{T_f} = \frac{46{,}7}{300} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_f = \frac{300 \cdot 49{,}7}{46{,}7} = 319 \text{ K} = 46 \text{ °C}.$$

b) Como não houve variação de volume, o trabalho é nulo.

c) Vamos considerar a situação inicial, com o ar mais frio. Podemos montar a seguinte proporção:

$$\left.\begin{array}{l} 1 \text{ atm} \rightarrow 14{,}7 \text{ psi} \\ p \text{ atm} \rightarrow 46{,}7 \text{ psi} \end{array}\right\} \Rightarrow p = \frac{46{,}7}{14{,}7} = 3{,}18 \text{ atm}$$

$pV = nRT$, assim $3{,}18 \cdot 20 = n \cdot 0{,}082 \cdot 300 \Rightarrow$
$\Rightarrow n = 2{,}6$ mol.

d) Como a pressão absoluta interna é 46,7 psi, mas a pressão atmosférica acarreta uma força contrária à devida pela pressão interna, a estrutura suporta apenas a diferença entre as duas, ou seja, apenas as 32 psi. Essa é uma das razões para o uso da pressão relativa.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

5. Para facilitar a compreensão, é comum considerar a força que o gás aplica nos pistões de um motor como compensada por um peso que se opõe à expansão do gás. Um cilindro, contendo um gás ideal, é vedado por um êmbolo de massa *M*, que pode deslizar livremente, como mostra a figura (sem escala e em cores fantasia).



Paulo Manzi/Arquivo da editora

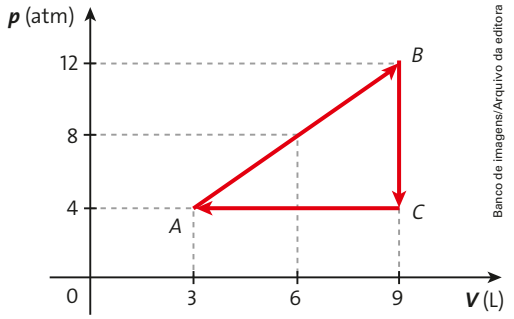
O gás ocupa um volume de $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ m³, e a pressão exercida sobre ele pelo êmbolo e pela coluna de ar atmosférico acima dele é igual a $1{,}4 \cdot 10^{5}$ N/m². Recebendo certa quantidade de calor, o gás expande-se e passa a ocupar um volume de $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ m³.

a) Que tipo de transformação o gás sofreu? Isobárica.

b) Qual foi o trabalho realizado nessa transformação?

$\tau = 70$ J

6. A sequência de transformações *ABCA*, sofridas por um gás ideal, está representada no diagrama $p \times V$ seguinte. Determine:



Banco de imagens/Arquivo da editora

$\tau_{AB} = 4800$ J; $\tau_{BC} = 0$; $\tau_{CA} = -2400$ J.

a) o trabalho realizado em cada uma das transformações (*AB*, *BC* e *CA*);

b) o trabalho total na transformação *ABCA*.

$\tau_{ciclo} = 2400$ J.

3 Primeira lei da Termodinâmica

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

A primeira lei da Termodinâmica é uma aplicação do princípio da conservação da energia. Especificamente em relação a um sistema termodinâmico, devemos levar em consideração:

- a quantidade de energia *Q*, na forma de calor, trocada pelo sistema com o meio externo;
- o trabalho mecânico τ trocado pelo sistema com o meio externo;
- a variação de energia interna ΔU do sistema termodinâmico.

Como a quantidade de calor e o trabalho já foram analisados, vamos completar com a energia interna *U*.

O gás ideal é constituído de partículas. Cada uma delas tem determinada velocidade, ou seja, cada uma das partículas que compõe o gás tem energia cinética E_C.

Não há energia potencial associada às interações entre as partículas do gás ideal, pois essas interações ocorrem somente durante os choques que, por hipótese, têm duração desprezível.

Assim, denominamos de **energia interna *U***, associada a um gás ideal monoatômico composto por *N* partículas, o somatório das energias cinéticas de translação de cada uma dessas partículas. Algebricamente, escrevemos:

$$U = \Sigma E_C$$

Nos processos termodinâmicos que envolvem realização de trabalho com o emprego de gases, é importante conhecer a variação de energia interna ΔU do sistema.

Para o caso específico de um gás ideal e monoatômico, em que não ocorrem reações químicas, a **variação de energia interna ΔU** corresponde somente à variação de energia cinética, que é diretamente proporcional à variação da temperatura absoluta.

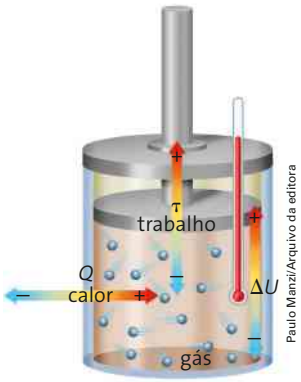
Assim:

- se a temperatura aumenta, a energia interna aumenta e $\Delta U > 0$;
- se a temperatura diminui, a energia interna diminui e $\Delta U < 0$;
- se a temperatura permanece constante, a energia interna é constante e $\Delta U = 0$.

Um gás pode receber energia do meio externo ou ceder energia a ele na forma de trabalho e de calor (**figura 3.9**).

Podemos, então, enunciar a **primeira lei da Termodinâmica**:

> Se um sistema gasoso recebe calor do meio externo, essa energia pode ser armazenada no sistema e/ou pode ser utilizada na realização de trabalho.
>
> $$Q = \Delta U + \tau \Rightarrow \Delta U = Q - \tau$$



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 3.9 Esquema de funcionamento de um sistema termodinâmico que troca calor e trabalho com o meio externo. Representação sem escala e em cores fantasia.

Observe que a variação sofrida pela energia interna do gás ΔU é exatamente o saldo de energia entre o que ele recebeu ou cedeu de energia na forma de calor e o que o gás recebeu ou cedeu na forma de trabalho.

O calor, o trabalho e a energia interna podem ser medidos em calorias ou joules. É usual medir o calor em calorias (cal) e o trabalho, bem como a energia interna, em joules (J). No entanto, ao aplicar a primeira lei da Termodinâmica, devemos ter um cuidado especial em relação às unidades: os três elementos que figuram na equação devem estar nas mesmas unidades.

Física tem História

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

A origem da Termodinâmica remonta a 1824, quando Nicolas Sadi Carnot, engenheiro francês, publicou o influente livro *Reflexões sobre a energia motora do fogo*. Nesse trabalho inovador, ele explicou o funcionamento das máquinas a vapor, de acordo com o seu ponto de vista, e como o calor movimenta objetos.

Carnot usou a expressão "energia motora" para descrever a capacidade de realizar trabalho ou provocar o movimento de objetos. As máquinas a vapor, por exemplo, utilizam a energia que provém do calor para elevar pesos consideráveis ou puxar trens.

Com a compreensão de que o calor está relacionado ao movimento de átomos e moléculas, os cientistas começaram a entendê-lo como uma forma de energia. Quando um objeto perde velocidade em razão do atrito, por exemplo, sua energia de movimento não é perdida – ela apenas se transfere, na forma de calor, para átomos e moléculas do objeto e suas vizinhanças. Em outras palavras, a energia do movimento – cinética – transforma-se em térmica (calor).


J-L Charmet/SPL/Latinstock

Retrato de Nicolas Sadi Carnot (1796-1832).

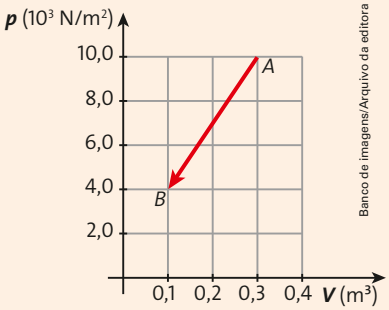
Durante a década de 1840, os cientistas confirmaram a ideia pesquisada por James P. Joule (1818-1889) e expressa matematicamente pelo físico alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894) de que a energia não pode ser criada nem destruída. Por volta de 1850, Rudolf Clausius (1822-1888), outro físico alemão, sugeriu que essa hipótese, chamada de conservação de energia, poderia ser a primeira lei da Termodinâmica.

Fonte de dados: HART-DAVIS, Adam. *160 séculos de ciência*: Revolução Industrial. São Paulo: Duetto Editorial, 2010. v. 3. p. 196.

- Faça uma pesquisa sobre as contribuições de Rudolf Clausius para a Termodinâmica.

Exercício resolvido

3. Um gás ideal monoatômico ($n = 0{,}50$ mol) sofre uma transformação termodinâmica *AB*, conforme a figura.
Sabendo-se que na transformação *AB* o gás cedeu 5 300 J de calor para o meio externo, determine:
a) o trabalho realizado nessa transformação;
b) a variação de energia interna do gás.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Resolução:

a) O trabalho realizado pelo gás na transformação *AB* é dado pela área do trapézio:

$$\tau = \frac{10 \cdot 10^3 + 4 \cdot 10^3}{2} \cdot (0{,}1 - 0{,}3) \Rightarrow \tau = -1{,}4 \cdot 10^3 \text{ J} = -1400 \text{ J}$$

b) A variação da energia interna do gás é obtida por meio da primeira lei da Termodinâmica:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = -5300 - (-1400) \Rightarrow \Delta U = -3900 \text{ J}$$

Portanto, na transformação AB (compressão gasosa), o gás recebeu energia na forma de trabalho do meio externo, pois $\tau < 0$; cedeu energia na forma de calor para o meio externo, $Q < 0$; e sofreu uma diminuição em sua energia interna (redução de temperatura).

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercícios

7. Um gás ideal absorve 50 cal de energia na forma de calor e expande-se, realizando um trabalho de 300 J. Considerando 1 cal = 4 J, determine a variação de energia interna desse gás. $\Delta U = -100$ J

8. Um sistema gasoso recebe uma quantidade de calor *Q* do meio externo e realiza um trabalho τ. Explique o que acontece com a energia interna do gás (aumenta, diminui ou permanece constante) nas seguintes condições:
a) a quantidade de calor recebida é, em módulo, menor do que o trabalho realizado; Diminui.
b) a quantidade de calor recebida é, em módulo, maior do que o trabalho realizado. Aumenta.

9. Um recipiente rígido e fechado contém um gás ideal monoatômico à temperatura de 300 K. O gás é aquecido a volume constante e a temperatura final passa a 600 K.
a) O que acontece com a energia cinética do gás? Energia cinética dobra.
b) O que acontece com a energia interna do gás? Energia interna dobra.
c) Ao se abrir uma válvula, mantendo a temperatura constante em 600 K, parte de um gás escapa e sua pressão assume novamente o valor que possuía a 300 K. Nessas condições, a energia interna do gás remanescente aumenta, diminui ou permanece constante? Justifique. Energia interna reduz-se à metade.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

4 Transformações termodinâmicas

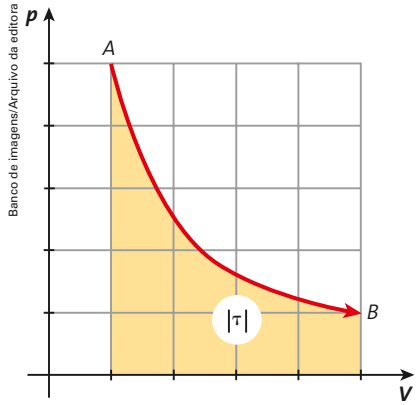
A seguir, vamos aplicar a primeira lei da Termodinâmica às principais transformações termodinâmicas (isotérmica, isométrica, isobárica e adiabática) e a uma transformação cíclica.

Transformação isotérmica

A energia interna de um gás ideal varia somente quando há mudança na temperatura. Logo, em um processo **isotérmico**, como a temperatura permanece constante, não há variação da energia interna. Temos, então:

$$\Delta U = 0$$

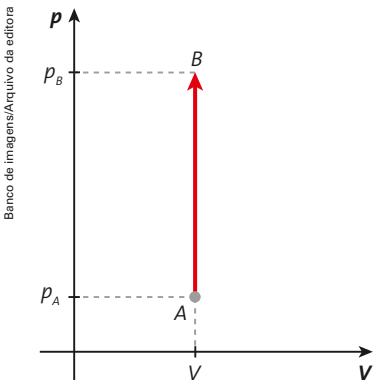
Trabalho na transformação isotérmica



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 3.10 A área abaixo da curva entre os pontos *A* e *B* indica o módulo do trabalho realizado na transformação.

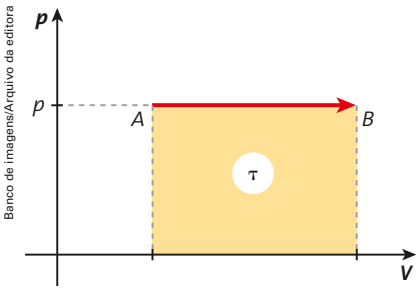
Trabalho na transformação isométrica



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 3.11 Na transformação isométrica não há realização de trabalho.

Trabalho na transformação isobárica



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 3.12 A área abaixo da reta entre os pontos *A* e *B* indica o módulo do trabalho realizado na transformação.

Aplicando-se a primeira da lei da Termodinâmica para essa transformação, obtemos:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow 0 = Q - \tau \Rightarrow Q = \tau$$

Caso o gás esteja recebendo calor, para que a energia interna permaneça constante durante todo o processo, ele deverá, simultaneamente, ceder ao meio externo a mesma quantidade de energia na forma de trabalho. Por outro lado, se o gás estiver cedendo certa quantidade de calor, simultaneamente, deverá receber essa mesma quantidade de energia na forma de trabalho.

Diferentemente do que ocorre com o trabalho, as trocas de calor são, em geral, processos muito lentos. Portanto, para que a igualdade entre a quantidade de calor e o trabalho realizado se mantenha ao longo de todo o processo, a transformação deve ser lenta.

Conforme a propriedade do diagrama $p \times V$, em que o trabalho, em módulo, é numericamente igual à área compreendida pelo diagrama, a área destacada na figura 3.10 indica o trabalho na transformação isotérmica.

Transformação isométrica

Na transformação **isométrica** não há variação de volume (figura 3.11). Essa situação ocorre nos recipientes indeformáveis. Nessas circunstâncias, embora o gás esteja aplicando força nas paredes do recipiente, essas forças não realizam trabalho, pois não deslocam o ponto de aplicação.

De acordo com a primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = Q - 0 \Rightarrow \Delta U = Q$$

A variação da energia interna corresponde à quantidade de calor cedida ou recebida durante o processo.

Transformação isobárica

O esquema da figura 3.12 representa uma expansão **isobárica**. O gás realiza trabalho e, simultaneamente, recebe calor.

O trabalho nessa transformação é obtido por:

$$\tau = p \cdot \Delta V$$

Na **expansão isobárica** ($\tau > 0$), como a temperatura do gás aumenta, a sua energia interna ($\Delta U > 0$) também aumenta. Aplicando-se a primeira lei da Termodinâmica, o calor fornecido ao gás é maior que o trabalho realizado por ele. A diferença entre ambos ($Q - \tau$) é o saldo remanescente de energia da transformação, que permanece no gás na forma de acréscimo da energia interna.

Reciprocamente, se o gás sofre uma **compressão isobárica**, a quantidade de energia cedida por ele na forma de calor é maior que a quantidade de energia recebida na forma de trabalho. Em decorrência, a variação da energia interna é negativa, portanto o gás esfria.

Transformação adiabática

A transformação **adiabática** ocorre quando o gás não troca calor com o meio externo. Portanto, $Q = 0$. Aplicando a primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = 0 - \tau \Rightarrow \Delta U = -\tau$$

A variação da energia interna em uma transformação adiabática é oposta ao valor algébrico do trabalho realizado pelo gás. Assim, podemos montar a tabela 3.2.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir

Na transformação adiabática, alguma das três variáveis de estado (pressão, volume e temperatura) permanece constante?

Tabela 3.2 Transformação adiabática

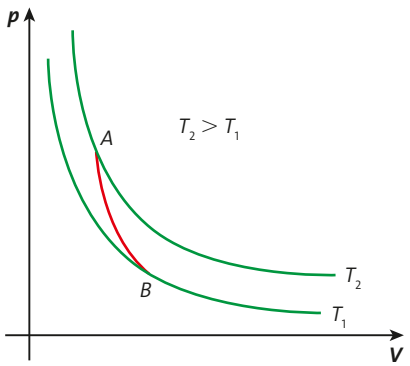
expansão	$\tau > 0$	$\Delta U < 0$	o gás esfria
compressão	$\tau < 0$	$\Delta U > 0$	o gás esquenta

Observações:

- Na expansão adiabática, o gás realiza trabalho sobre o meio externo; como ele não recebe calor, essa energia é transmitida ao meio externo à custa de uma redução em sua energia interna.
- Na compressão adiabática, o gás recebe energia na forma de trabalho do meio externo; como não há troca de calor, essa energia recebida eleva o valor da energia interna do gás.

Para esboçar o diagrama da transformação adiabática (figura 3.13), usamos como guias as isotermas. Na expansão adiabática, a energia interna do gás diminui; portanto, o estado final corresponde a uma temperatura menor que a inicial. Na compressão, ocorre o oposto.

Diagrama $p \times V$ de uma transformação adiabática



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 3.13 A transformação adiabática (em vermelho) comparada a duas isotermas.

Transformação cíclica

É comum o gás, após uma série de transformações, retornar ao estado inicial. Isso ocorre, principalmente, nas máquinas térmicas, como estudaremos no próximo capítulo.

O cálculo do trabalho é feito dividindo-se o ciclo (figura 3.14.a) em duas fases: a expansão (figura 3.14.b) e a compressão (figura 3.14.c).

Trabalho em uma transformação cíclica

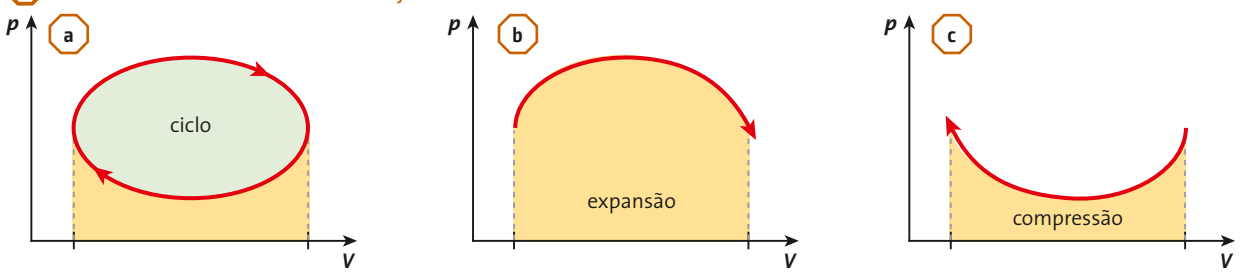


Figura 3.14 Transformação cíclica (**a**); expansão (**b**); compressão (**c**).

Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Se o ciclo tem sentido horário, a área relativa à expansão é maior que a relativa à compressão. A diferença entre essas duas áreas, a parte compreendida pelo ciclo, representa o saldo de trabalho, que, nesse caso, é positivo (**figura 3.15**).

No caso de o ciclo ser anti-horário, o saldo de trabalho é negativo (**figura 3.16**).

O trabalho do gás no ciclo, em módulo, é numericamente igual à área compreendida pelo ciclo.

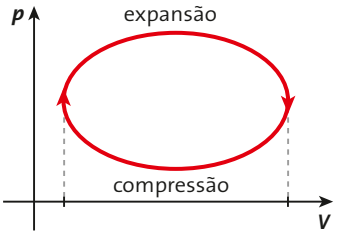


Figura 3.15 A área compreendida pela expansão é maior que a determinada pela compressão; o trabalho no ciclo é positivo.

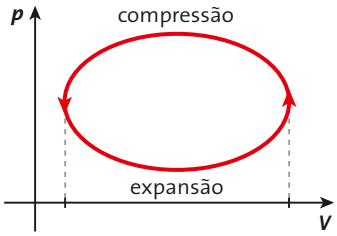


Figura 3.16 A área compreendida pela compressão é maior que a determinada pela expansão; o trabalho no ciclo é negativo.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

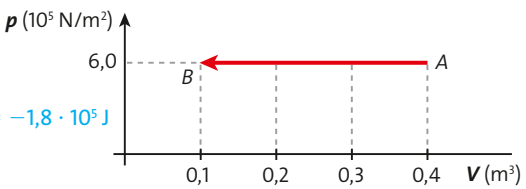
10. Numa expansão isotérmica, um gás cede para o meio externo 200 J de energia na forma de trabalho mecânico. Qual é a quantidade de calor trocada pelo gás com o meio externo? $Q = +200$ J

11. Três mols de um gás monoatômico ideal, inicialmente sob temperatura de 400 K, sofrem uma transformação isométrica recebendo 747 J na forma de calor.

a) Determine o trabalho realizado pelo gás e sua variação de energia interna. $\tau = 0$; $\Delta U = 747$ J

b) O que acontece com a temperatura do gás? Aumenta.

12. Um gás ideal monoatômico sofre a transformação isobárica representada no diagrama.



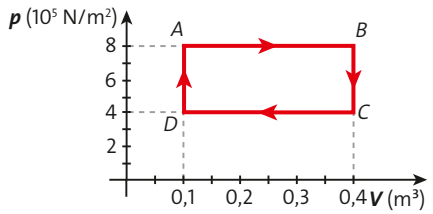
a) O gás sofreu expansão ou compressão? Compressão.

b) Qual foi o trabalho realizado pelo gás nessa transformação? $\tau = -1{,}8 \cdot 10^5$ J

c) A variação de energia interna é positiva ou negativa? Justifique. Negativa, pois diminuiu o produto $p \cdot V$.

13. Nos perfumes ou desodorantes aerossóis, o gás (na verdade, um vapor) sai do recipiente e expande-se muito rapidamente. Como as trocas de calor são processos lentos, podemos considerar desprezível o calor trocado por esse gás, o que ilustra um exemplo de expansão adiabática. O desodorante chega ao nosso corpo em uma temperatura maior ou menor que a do ambiente? Menor, pois sofre uma expansão adiabática.

14. Um gás perfeito sofre as transformações *AB*, *BC*, *CD* e *DA*, descrevendo o ciclo indicado no gráfico a seguir.



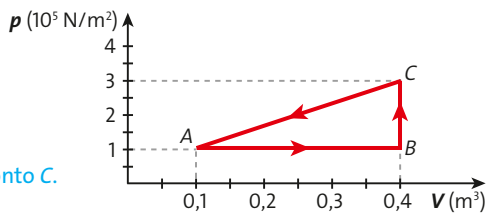
Determine para o ciclo:

a) o trabalho realizado pelo gás; $\tau = +1{,}2 \cdot 10^5$ J

b) a variação da energia interna; $\Delta U = 0$

c) a quantidade de calor trocada com o meio. $Q = +1{,}2 \cdot 10^5$ J

15. Um gás perfeito sofre as transformações *AB*, *BC*, *CA*, descrevendo o ciclo indicado no gráfico a seguir. A quantidade de gás é 0,02 mol.



Determine para o ciclo:

a) a quantidade de calor trocada com o meio; $Q = -3 \cdot 10^4$ J

b) em qual ponto, *A*, *B* ou *C*, a temperatura do gás é maior; No ponto *C*.

c) a transformação na qual o gás realiza trabalho motor.
Na transformação *AB* (expansão).

Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Em construção

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

Robert Boyle



Retrato de Robert Boyle (1627-1691).

Robert Boyle nasceu em uma família protestante inglesa radicada na Irlanda. Foi o décimo quarto filho, entre quinze, de Richard Boyle, conde de Cork.

Além de ser um dos responsáveis pelo estabelecimento da Química como ciência, ele redirecionou a metodologia da Física e da Química modernas em razão da valorização das medidas e da racionalidade das deduções experimentais. É considerado o fundador da análise química em virtude dos seus estudos sobre a composição dos corpos.

Por vinte anos, Boyle viajou pela Europa, inicialmente se dedicando à difusão da fé cristã e ao estudo das línguas continentais e, depois, aprofundando-se na pesquisa científica. Aprendeu italiano para visitar Veneza e, no começo de 1642, estava em Florença quando Galileu Galilei (1564-1642) morreu em uma vila próxima. Influenciado pela abordagem de Galileu para os fenômenos naturais utilizando a Matemática e a Mecânica, passou a ser um forte defensor dessas ideias.

Boyle notabilizou-se pelos estudos sobre a dilatação dos gases, publicados em *The Sceptical Chymist* (1661), um dos primeiros textos científicos em que a Química se diferenciou da alquimia e da Medicina. Essa obra abriu uma nova era na história da Química, à medida que predefiniu, ainda que vagamente, os modernos conceitos de átomo e de molécula. Boyle também formulou a importante lei de Boyle para os gases, posteriormente conhecida como lei de Boyle-Mariotte.

Fonte de dados: O'CONNOR, J. J.; ROBERTSON, E. F. *MacTutor Biographies*. Disponível em: <www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Boyle.html>. Acesso em: out. 2015. Texto traduzido.

Experimento

Veja comentários e sugestões sobre este experimento e respostas das atividades no Manual do Professor.

Lei de Boyle

Nesta atividade experimental, é possível verificar a lei de Boyle para os gases. Você vai precisar de uma seringa descartável (sem agulha). As seringas descartáveis, geralmente, vêm com uma tampinha para vedação do bico (caso a seringa que for usar não tenha essa vedação, você pode usar o dedo como tampa). Destampe a seringa, insira o êmbolo até a posição em que começa a escala dos volumes (volume máximo) e tampe novamente, como na figura **a**.



a) Seringa tampada e com o êmbolo na posição em que começa a escala dos volumes.



b) Pequeno balão com ar dentro da seringa.

- Nessas condições, podemos afirmar que a pressão no interior da seringa é a pressão atmosférica? O que acontece com o volume de ar dentro da seringa quando você empurra o êmbolo para dentro? O que acontece com a temperatura e a pressão dentro da seringa?

Agora, destampe a seringa e empurre o êmbolo até o final da escala (volume mínimo). Em seguida, tampe novamente e puxe o êmbolo para cima. O que acontece com o volume, a pressão e a temperatura dentro da seringa?

Por que no primeiro caso a seringa deve ser tampada somente após o êmbolo ser colocado no começo da escala? Por que, no segundo caso, ela deve ser tampada somente quando o êmbolo estiver no final da escala?

Coloque um pequeno balão com ar dentro da seringa (veja a figura **b**) e repita os procedimentos.

- O que acontece com o volume do balão quando o êmbolo da seringa é empurrado para dentro? E quando o êmbolo é puxado para fora? Justifique suas respostas.

Retomando

Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resolução dos exercícios deste capítulo.

16. A primeira lei da Termodinâmica explica o funcionamento de uma locomotiva a vapor: a água é aquecida e ferve, e o vapor em expansão realiza o trabalho que impulsiona a locomotiva para a frente.
Pesquise e responda: é possível o vapor impulsionar a locomotiva realizando trabalho ao condensar?

Veja resposta no Manual do Professor.

17. Leia o texto.

> Em uma garrafa de "champanhe", quando a rolha estoura, os gases pressurizados dentro da garrafa se expandem para o ar externo com tanta rapidez que não há tempo para haver troca de calor com o meio ambiente. À medida que os gases em expansão realizam trabalho sobre o meio ambiente, sua energia interna e temperatura caem; a temperatura reduzida faz com que o vapor de água condense e forme uma nuvem em miniatura.
>
> YOUNG, Hugh D. *Física II*: Termodinâmica e ondas. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008. p. 262.

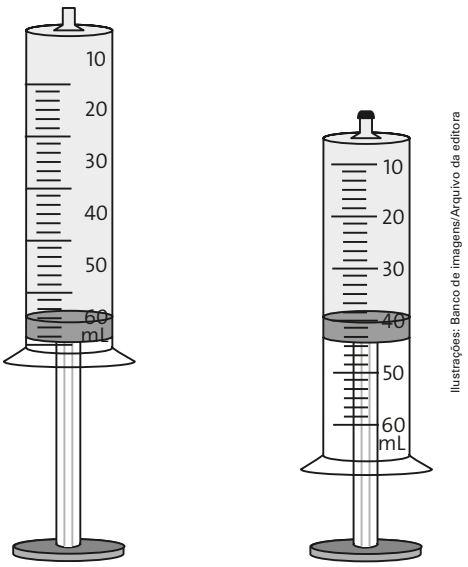
Com base no texto, podemos afirmar que a expansão dos gases de dentro da garrafa para o meio externo é:

a) isotérmica.
X b) adiabática.
c) isométrica.
d) isobárica.

18. Uma jovem com massa de 60 kg deseja comer um *sundae* com 900 Cal, após o almoço (1 Cal = 1 000 cal). Preocupada com a balança, ela pretende subir vários lances de escada para transformar as calorias ingeridas em trabalho mecânico. Sabendo-se que a energia potencial gravitacional é dada por $E_p = m \cdot g \cdot h$, em que h é a altura atingida por ela e $g = 10\ m/s^2$, e com base na primeira lei da Termodinâmica, responda: qual é a altura h que a jovem terá que subir para queimar todas as calorias do *sundae*? (Considere 1 cal = 4 J.)

a) 6 m
b) 60 m
c) 600 m
X d) 6 km
e) 60 km

19. (UEA-AM) Num local em que a pressão atmosférica vale $1{,}0 \cdot 10^5$ Pa e a temperatura 25 °C, uma pessoa puxa o êmbolo de uma seringa até a posição 60 cm^3 com a extremidade da seringa aberta. Em seguida, tampa a abertura da seringa e pressiona o êmbolo até a posição 40 cm^3, sem que haja vazamento de ar. O êmbolo é mantido nessa posição até que o ar no interior da seringa retorne à temperatura de 25 °C. As figuras ilustram as duas situações.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Posição inicial do êmbolo. Posição final do êmbolo.

Considerando o ar como um gás ideal, na situação final a pressão do gás, em Pa, ficou igual a:

a) $6{,}7 \cdot 10^4$.
b) $8{,}0 \cdot 10^4$.
c) $1{,}2 \cdot 10^5$.
X d) $1{,}5 \cdot 10^5$.
e) $1{,}8 \cdot 10^5$.

20. (UEA-AM) O pneu de um carro foi calibrado durante a noite à pressão de 27,0 psi (libra por polegada quadrada) e, atingido o equilíbrio térmico, o ar nele contido estava a 27 °C. Sabe-se que o ar no interior do pneu é bastante seco e que não há perda para o exterior. Nessas condições, após rodar por quilômetros durante o dia, sob uma temperatura de 37 °C, a nova pressão, em psi, no interior do pneu passou a ser (Considere que 1 atm = 14,7 psi):

a) 27,6
b) 27,9
c) 28,2
X d) 28,4
e) 28,8

CAPÍTULO 4

Segunda lei da Termodinâmica

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

Miguel Garcia SSaavedra/Shutterstock/Glow Images



Ateando-se fogo ao carvão, ele libera calor, que assa a carne, e transforma-se em cinzas. Após esse processo, é possível as cinzas transformarem-se em brasas e depois em carvão para ser estocado para o próximo churrasco?



Elena Talberg/Shutterstock/Glow Images

Figura 4.1 Mistura de leite frio com café quente. É possível o leite frio separar-se espontaneamente do café quente?

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Segunda lei da Termodinâmica

A pergunta da abertura do capítulo sobre o carvão nos remete à seguinte questão: por que alguns fenômenos podem ocorrer em determinada sequência e não em outra? Por exemplo, o fluxo de calor de um corpo frio para um corpo quente não viola a primeira lei da Termodinâmica (princípio da conservação da energia), pois a energia seria conservada; no entanto, esse fluxo não ocorre espontaneamente (**figura 4.1**).

A transformação total de energia mecânica em calor ocorre frequentemente em nosso cotidiano. Um exemplo é o ato de frear uma bicicleta até ela parar. Existem também vários dispositivos que convertem **parcialmente** o calor em energia mecânica. É o caso do motor do automóvel. Contudo, nem mesmo o mais especializado técnico em motores seria capaz de produzir uma máquina cíclica que convertesse integralmente o calor em trabalho mecânico.

Um dos primeiros enunciados da segunda lei da Termodinâmica, e talvez o mais simples e direto, estabelece:

> A energia térmica flui **naturalmente** do corpo mais quente para o mais frio.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir
Por que não é possível a conversão integral de calor em trabalho mecânico?

O destaque para o termo naturalmente é dado porque, no âmbito global de um processo, é possível transferir energia térmica de um corpo mais frio para um mais quente, mas essa transferência não é um processo espontâneo. Isso ocorre nas geladeiras, por exemplo.

Máquinas térmicas

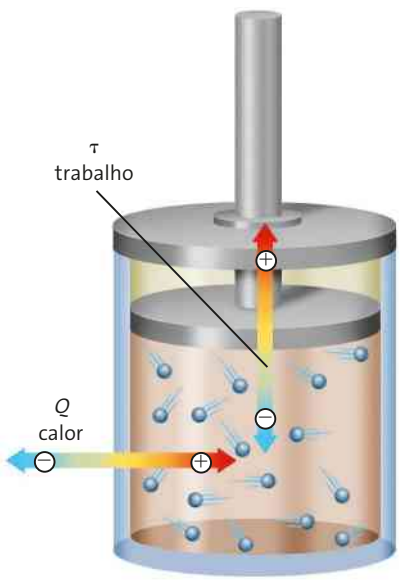
Chamamos genericamente de **máquina** qualquer dispositivo que tenha por finalidade transferir ou transformar energia.

As **máquinas térmicas** são dispositivos em que há troca de energia na forma de calor e nos quais também há troca de energia com o meio externo, na forma de trabalho mecânico, em um processo cíclico (**figura 4.2**).

Esses dispositivos têm a finalidade de obter energia mecânica (organizada) por trocas de calor, ou obter trocas de calor pelo fornecimento de energia organizada (mecânica).

Os motores dos automóveis, as geladeiras e os aparelhos de ar condicionado são exemplos de máquinas térmicas.

Se considerarmos, por exemplo, uma expansão adiabática, observamos que nesse processo é obtida energia na forma de trabalho sem o respectivo fornecimento de calor. Contudo, terminada a transformação, o gás não fica disponível para um novo processo, se considerarmos as mesmas temperaturas. Assim, para que o mesmo gás, ou pelo menos a mesma máquina, possa ser utilizado seguidamente, devemos retornar à condição inicial. Vemos assim que o processo deve ser cíclico. Discutiremos aqui, portanto, somente as máquinas térmicas que funcionam em processos cíclicos.

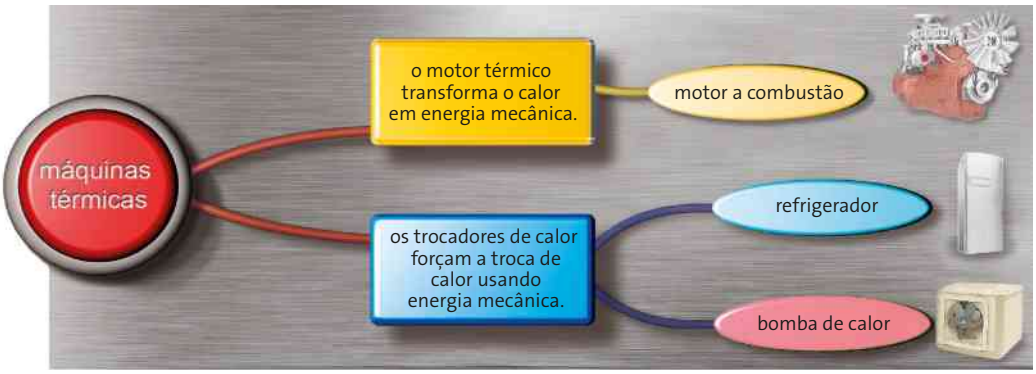


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 4.2 Esquema de funcionamento de uma máquina térmica, que troca calor e trabalho com o meio externo. Representação sem escala e em cores fantasia.

1. **I.** A energia térmica adquirida pelas mãos não pode ser convertida em mecânica, provocando movimento das mãos.
II. Não é possível que a tinta se separe da água espontaneamente, uma vez dissolvida. Essa ação requer energia mecânica adicional para filtragem.
III. Não é possível "devolver" a energia térmica trocada pelos corpos durante o processo.

De acordo com sua finalidade específica, as máquinas térmicas podem ser classificadas como exemplificado na **figura 4.3**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 4.3 Classificação das máquinas térmicas. Representações sem escala e em cores fantasia.

4. Não, pois é necessário energia para comprimir o ar, ou seja, realizar trabalho mecânico. Parte dessa energia será liberada à medida que o ar se expande.

Exercícios

2. Motor térmico. A máquina está recebendo calor (solar) e gerando energia mecânica (a energia potencial das águas nas hidrelétricas).

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

1. Os processos termodinâmicos que ocorrem na natureza são todos **processos irreversíveis**, pois ocorrem em um determinado sentido, porém não ocorrem no sentido contrário. O fluxo de calor de um corpo quente para um corpo frio ocorre irreversivelmente. Quando um livro desliza sobre uma mesa, sua energia mecânica é convertida em calor pelo atrito; esse processo é irreversível, pois ninguém jamais observou o processo inverso, no qual um livro em repouso sobre uma mesa começasse a se mover espontaneamente e a temperatura do livro e da mesa começasse a diminuir.

YOUNG, Hugh D. *Física II:* Termodinâmica e ondas. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008. p. 278.

Explique por que os processos apresentados a seguir são irreversíveis.

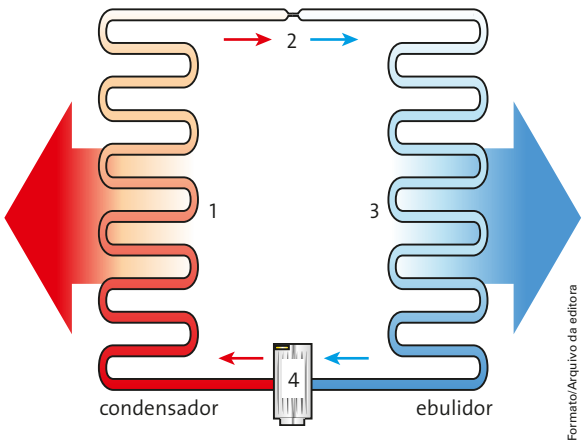
I. Esfregar as mãos uma na outra para aquecê-las.

II. Misturar tinta com água.

III. Dois corpos, em temperaturas diferentes, colocados em contato entram em equilíbrio térmico (mesma temperatura).

2. A água vaporizada pelo calor solar se eleva até grandes altitudes, condensa, forma nuvens e se precipita, renovando os reservatórios das usinas hidrelétricas. Nesse aspecto, a atmosfera é uma grande máquina térmica. Conforme a classificação apresentada neste tópico, que tipo de máquina é essa: motor térmico, refrigerador ou bomba de calor? Justifique.

3. A figura seguinte (sem escala e em cores fantasia) é um esquema simplificado de um aparelho de ar condicionado do tipo *split* (trocadores de calor separados).



Formato/Arquivo da editora

Na parte externa do cômodo a ser resfriado deve ficar o **condensador**, onde o vapor é comprimido e liquefeito, cedendo calor ao ambiente externo. Na parte interna fica o vaporizador, ou **ebulidor**, onde a expansão pela vaporização do líquido retira calor do cômodo.

a) O que aconteceria se, por engano, o instalador pusesse o condensador no cômodo a ser resfriado e o ebulidor na parte externa?

b) Nesse caso, o aparelho estaria funcionando como que tipo de máquina térmica: motor térmico, refrigerador ou bomba de calor? Bomba de calor.

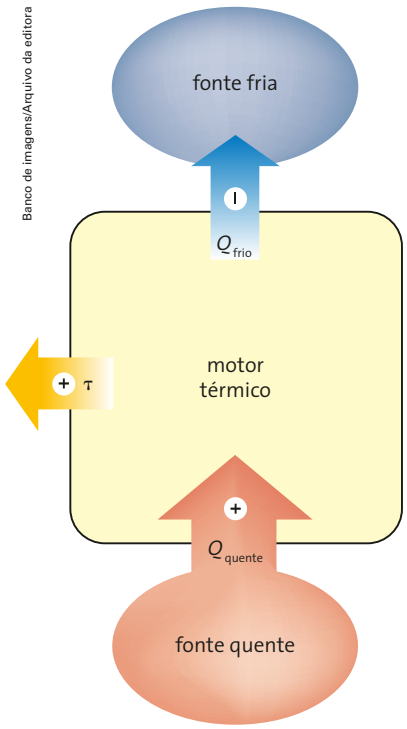
4. Um inventor afirma ter construído um motor que não gasta combustível. Segundo ele, basta comprimir bastante ar em um botijão do carro. A seguir, o ar comprimido é liberado lentamente, expandindo-se e movimentando os pistões, fazendo o carro percorrer cerca de 100 km. O inventor está correto quando afirma que o motor não gasta combustível? Justifique.

3. **a)** O interior do cômodo seria aquecido e a refrigeração passaria ao ambiente externo.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

2 Motor térmico

No diagrama $p \times v$ (pressão $\times$ volume), os ciclos dos motores térmicos têm sentido horário, isto é, em módulo, o trabalho realizado na fase de expansão é maior que o despendido na fase de compressão para atender à finalidade da máquina: transformar a energia recebida na forma de calor em energia mecânica.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 4.4 Esquema (sem escala e em cores fantasia) de funcionamento de um motor térmico, que realiza trocas de energia em um ciclo genérico.

A **figura 4.4** ilustra as trocas de energia em um ciclo genérico de um motor térmico.

Ele recebe energia na forma de calor de uma **fonte quente**, disponibiliza trabalho mecânico e, para que possa voltar ao estado inicial e começar um novo ciclo, cede energia na forma de calor para uma **fonte fria**.

Por essa descrição, fica evidente a necessidade das duas fontes. Uma para fornecer a energia ao motor, na forma de calor, e a outra para retirar a parcela do calor fornecido que não foi convertida em trabalho mecânico e fazer o motor retornar à condição inicial.

No caso de um motor comum de automóvel, a queima do combustível, que gera o calor, é a fonte quente; a atmosfera, para a qual o motor cede calor, é a fonte fria.

No motor térmico, temos:

- $Q_q > 0$ – o motor recebe calor da fonte quente;
- $Q_f < 0$ – o motor cede calor para a fonte fria;
- $\tau > 0$ – o motor fornece energia na forma de trabalho.

A primeira lei da Termodinâmica é a lei da conservação da energia, que incorpora o conceito de energia interna.

Completado um ciclo, o gás volta a possuir a mesma energia interna inicial.

Portanto:

$$Q_q = \tau + |Q_f|$$

Observe nessa expressão que a quantidade de energia cedida, na forma de calor, à fonte fria Q_f, é considerada em módulo, pois é negativa.

Rendimento

Em uma máquina térmica, o aproveitamento realizado é normalmente expresso pela relação entre a quantidade útil de energia que se obtém (trabalho mecânico) e a quantidade de energia térmica fornecida à máquina.

Nos motores, essa grandeza é denominada rendimento η. A expressão para o rendimento de um motor térmico é:

$$\eta = \frac{\tau}{Q_q}$$

Expresso em termos de porcentagem, o rendimento é:

$$\eta = \frac{\tau}{Q_q} \cdot 100\%$$

Potência

Muitas vezes, na execução de determinadas tarefas, além do trabalho a ser realizado, o intervalo de tempo gasto também é um elemento importante. Por exemplo, se um motor aciona uma bomba para encher uma caixa-d'água, quanto maior a rapidez com que a tarefa é realizada, maior é a potência útil do motor.

A potência pode ser calculada por:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \text{ou} \quad P = \frac{\tau}{\Delta t}$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de potência é o watt (W). Nos automóveis, é comum a utilização das antigas unidades de potência, hp (*horsepower*) e cv (cavalo-vapor), cujas relações com o SI são:

$$1\ \text{hp} = 746\ \text{W} \quad \text{e} \quad 1\ \text{cv} = 735\ \text{W}$$

A potência de um motor não deve ser confundida com o seu rendimento, que é a eficiência com que o motor transforma a energia. Há motores muito potentes, mas com rendimento muito baixo. É o caso, por exemplo, dos carros de corrida, que têm maior potência para ser mais rápidos, mas geralmente pouco rendimento, ou seja, apresentam alto consumo de combustível por quilômetro rodado.

Por outro lado, há motores de baixa potência, mas com ótimo rendimento, como é o caso de alguns carros de pequeno porte.

A potência total P_t refere-se à energia total entregue à máquina por unidade de intervalo de tempo. Desse total, uma parte é transformada em potência útil P_u e o restante é a potência dissipada P_d. Podemos escrever, então:

$$P_t = P_u + P_d$$

O rendimento da máquina pode ser expresso por:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \Rightarrow \eta_{(\%)} = \frac{P_u}{P_t} \cdot 100\%$$

Exercício resolvido

1. O motor térmico de um automóvel é alimentado por um combustível cujo calor de combustão é de 11 000 kcal/L. Esse motor está funcionando com rendimento de 30% e produzindo uma potência útil de 30 hp. Considere: 1 hp = 746 W e 1 cal = 4,2 J.

a) Qual é a potência total fornecida a esse motor?

b) Quantos litros de combustível esse motor consome em uma hora?

Resolução:

a) Na expressão do rendimento, dado pela relação entre a potência útil e a total, obtemos a potência total do motor:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \Rightarrow 0{,}30 = \frac{30}{P_t} \Rightarrow P_t = 100\ \text{hp}$$

b) O total de energia consumida pelo motor em 1 hora (3 600 s), em joule, é dado por:

$\Delta E = P \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta E = 100 \cdot 746 \cdot 3\,600 \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta E = 2{,}7 \cdot 10^8$ J

Como o combustível fornece 11 000 kcal por litro e 1 cal = 4,2 J, a quantidade de litros de combustível consumida em 1 h é obtida na proporção:

1 L $\Rightarrow 11\,000 \cdot 10^3 \cdot 4{,}2$ J

$x \Rightarrow 2{,}7 \cdot 10^8$ J

Portanto: $x = \dfrac{2{,}7 \cdot 10^8}{4{,}6 \cdot 10^7} \Rightarrow x = 5{,}9$ L

7. c) $\frac{\Delta E}{\Delta S} = 6{,}7 \cdot 10^7 \ \frac{J}{km}$. O consumo, em litros, depende da energia liberada por cada tipo de combustível (veja tabela 5.1).

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercícios

5. (Enem) Um motor só poderá realizar trabalho se receber uma quantidade de energia de outro sistema. No caso, a energia armazenada no combustível é, em parte, liberada durante a combustão para que o aparelho possa funcionar. Quando o motor funciona, parte da energia convertida ou transformada na combustão não pode ser utilizada para a realização de trabalho. Isso significa dizer que há vazamento da energia em outra forma.

CARVALHO, A. X. Z. *Física térmica*. Belo Horizonte: Pax, 2009 (adaptado).

De acordo com o texto, as transformações de energia que ocorrem durante o funcionamento do motor são decorrentes de a:

a) liberação de calor dentro do motor ser impossível.
b) realização de trabalho pelo motor ser incontrolável.
X c) conversão integral de calor em trabalho ser impossível.
d) transformação de energia térmica em cinética ser impossível.
e) utilização de energia potencial do combustível ser incontrolável.

6. Um fabricante declara que a potência máxima de determinado modelo de automóvel é 45 kW (60 hp) com o motor girando a 6 000 rotações por minuto.

a) Qual é a energia útil liberada por esse motor a cada volta? 450 J
b) Se com a potência máxima o carro mantém uma velocidade constante, em um trecho plano horizontal da estrada, a 30 m/s (108 km/h), qual é a intensidade das forças resistivas ao movimento dele? $1{,}5 \cdot 10^3$ N
c) Se a aerodinâmica do veículo fosse aprimorada de forma que a resistência do ar diminuísse, o que mudaria no desempenho desse veículo?

7. Um caminhão, carregado, com massa de 20 toneladas (caminhão + carga), está subindo uma ladeira com ângulo de inclinação α, tal que sen $\alpha = 0{,}1$, e com velocidade constante de 10 m/s (36 km/h).

a) Desprezando as forças dissipativas no movimento do caminhão, obtenha a potência útil desse motor. $2{,}0 \cdot 10^5$ W $\simeq$ 270 hp
b) Considerando de 30% o rendimento do conjunto motor + transmissão, qual é a potência total?
c) Nessa situação, qual o consumo do caminhão, em joules por quilômetro? **7. b)** $6{,}7 \cdot 10^7 \ \frac{J}{km}$.

8. Um motor térmico, operando em ciclos, executa 10 ciclos por segundo. Em cada ciclo recebe 800 J da fonte quente e cede 600 J à fonte fria.

a) Qual é a energia útil que se obtém desse motor a cada ciclo? 200 J
b) Qual é a potência útil desse motor? 2 000 W
c) Qual é o rendimento da máquina? 25%

9. Para um modelo de automóvel de 1.0, a montadora declara que a potência máxima é 72 cv com o motor girando a 5 250 rotações por minuto (rpm).

a) Qual é a energia útil liberada por esse motor a cada volta? 600 J
b) Supondo que o rendimento do motor seja de 28%, qual é a quantidade de energia térmica fornecida ao motor? 189 kW
c) Qual é a quantidade de energia térmica dispensada pelo motor? 136 kW
d) Qual é a potência do motor em hp? 71 hp

6. c) Diminuiria a intensidade das forças resistivas, em cada velocidade, reduzindo o consumo e proporcionando um valor de velocidade máxima maior. Com a redução das perdas, o rendimento seria melhorado.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

3 Trocadores de calor

O calor flui naturalmente do corpo mais quente para o mais frio. Mas é possível "bombear" calor do corpo mais frio para o mais quente por meio de um processo forçado por um trabalho mecânico.

Essa é a função dos **trocadores de calor**. Eles podem refrigerar mais ainda a fonte fria (refrigerador), ou aquecer mais ainda a fonte quente (bomba de calor).

A figura 4.5 representa, esquematicamente, as trocas de energia em um trocador de calor genérico (refrigerador ou bomba de calor).

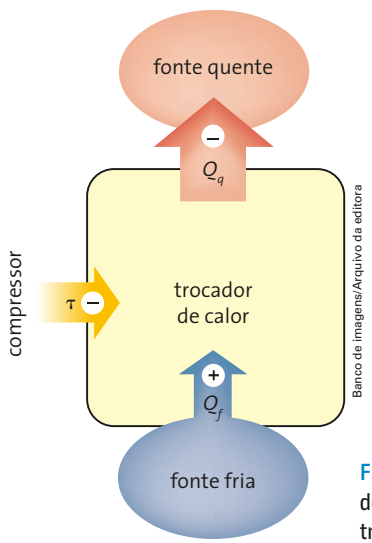


Figura 4.5 Esquema (sem escala e em cores fantasia) de funcionamento de um trocador de calor, que realiza trocas de energia em um ciclo genérico.

Nos trocadores de calor, temos:

- $Q_q < 0$ – a máquina cede calor à fonte quente;
- $Q_f > 0$ – a máquina recebe calor da fonte fria;
- $\tau < 0$ – a máquina recebe energia na forma de trabalho mecânico (compressor).

De acordo com o princípio da conservação da energia aplicado a um ciclo, obtemos:

$$Q_f + |\tau| = |Q_q|$$

Nos trocadores de calor, o termo **rendimento** é substituído pelo termo **eficiência** (ε), dada pela razão entre a quantidade de calor recebida pela fonte fria e o módulo do trabalho mecânico realizado pelo compressor (figura 4.6), ou seja:

$$\varepsilon = \frac{Q_f}{|\tau|}$$



Acervo do autor/Arquivo da editora

Figura 4.6 Dispositivo experimental para determinar a eficiência de um trocador de calor com base nas leituras das temperaturas.

Refrigerador

A figura 4.7 representa, esquematicamente, as trocas de energia em um refrigerador. O interior do refrigerador é mais frio que o ambiente externo. Utilizando o trabalho mecânico do compressor, a parte interna (mais fria) consegue transferir calor para a parte externa (mais quente).

Se as paredes da geladeira fossem perfeitamente isolantes, não haveria a necessidade contínua desse bombeamento de calor para fora. No entanto, não existe um isolante perfeito. O ambiente, que está mais quente que o interior da geladeira, transfere naturalmente calor à sua parte interna. Esse calor precisa ser bombeado de volta para fora, a fim de manter baixa a temperatura interna (fonte fria).

No refrigerador, a eficiência é dada por:

$$\varepsilon_{\text{refrig.}} = \frac{Q_f}{|\tau|}$$

Na maioria dos refrigeradores, a **eficiência** se situa em torno de 3 (300%), ou seja, a quantidade de calor retirada é maior que a de energia fornecida na forma de trabalho. Isso não contraria o princípio da conservação da energia, pois o trabalho mecânico é apenas um agente que direciona o fluxo de calor do mais frio para o mais quente.

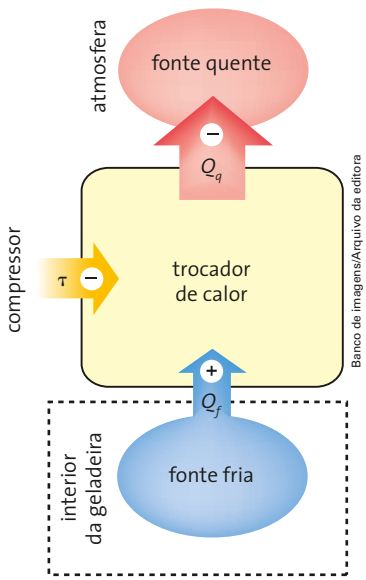


Figura 4.7 Representação (sem escala e em cores fantasia) de um trocador de calor funcionando como refrigerador.

Bomba de calor (aquecedor termodinâmico)

Um refrigerador doméstico refrigera os alimentos que estão na sua parte interna, mas, em compensação, aquece o ambiente externo a ele (figura 4.8). De forma semelhante, é possível, em um dia frio, bombear calor da atmosfera para um ambiente fechado qualquer (quarto, sala, etc.) com eficiência superior a 100%.

Essa situação é equivalente à de um aparelho de ar condicionado funcionando ao contrário (de fato, alguns têm essa opção).

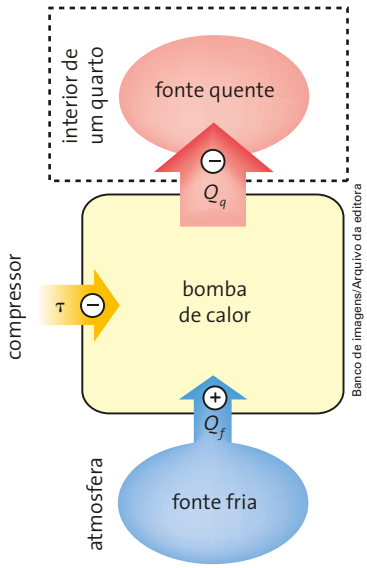


Figura 4.8 Representação (sem escala e em cores fantasia) de uma bomba de calor funcionando como aquecedor termodinâmico.

A eficiência de um aquecedor termodinâmico é dada por:

$$\varepsilon_{aquec.} = \frac{Q_q}{|\tau|}$$

Essa expressão pode ser escrita como:

$$\varepsilon_{aquec.} = \frac{Q_f + |\tau|}{|\tau|} = \frac{Q_f}{|\tau|} + 1$$

Portanto:

$$\varepsilon_{aquec.} = \varepsilon_{refrig.} + 1$$

Esta última relação demonstra que a eficiência do aquecedor termodinâmico é sempre maior ou igual à unidade.

Atualmente, há várias piscinas que utilizam bombas de calor para o aquecimento da água. Em uma situação como essa, quando comparadas com o aquecimento elétrico, essas bombas são em torno de cinco vezes mais eficientes. No entanto, ao se utilizar uma máquina térmica para produção da energia elétrica, o ganho com a bomba de calor, apesar de ser até um pouco maior, perde-se durante o processo, pois não existem máquinas ideais. Nesses casos, é mais econômico fazer o aquecimento diretamente com a queima do combustível.

Transformação reversível

Vamos considerar um gás sofrendo uma transformação em um determinado estágio intermediário, conforme a figura 4.9.

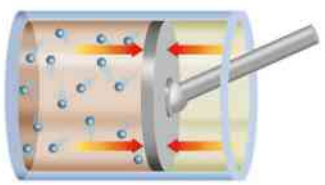

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 4.9 Representação (sem escala e em cores fantasia) de um gás sofrendo transformação.

Nesse estágio, a pressão exercida pelo gás sobre o êmbolo (interna) e a pressão exercida pelo meio em torno (externa) são iguais. Assim, o gás pode estar em expansão, realizando trabalho motor com o êmbolo movendo-se para a direita, ou pode estar sendo comprimido, realizando trabalho resistente, com o êmbolo movendo-se para a esquerda.

Além disso, vamos considerar que a temperatura externa (do meio) seja igual à interna (do gás). Dessa forma, pode haver fluxo de calor tanto do gás para o exterior, como ao contrário.

Em resumo, nesse estágio a transformação pode estar acontecendo tanto em um sentido como no outro, por isso é chamada de **reversível**. De fato, essa situação especial é um estado de equilíbrio entre o gás, as fontes térmicas e as forças externas. Considerar esse estágio como parte de uma transformação é uma abstração de extrema utilidade no estudo da Termodinâmica.


Edson Grandisoli/Pulsar Imagens

Figura 4.10 Um fenômeno irreversível – para a fumaça sair da chaminé, a pressão interna deve ser maior do que a externa. Usina de processamento de cana-de-açúcar em Araraquara (SP), 2013.

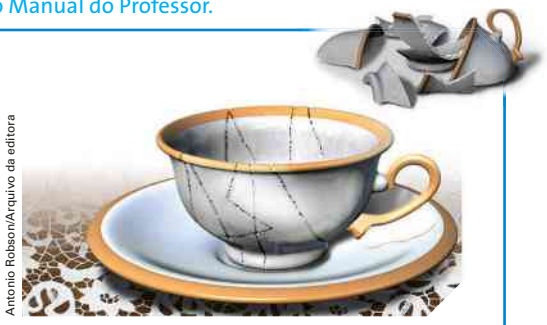
Globalmente, uma transformação é chamada de reversível se ela for uma sucessão de estágios como esse – estados de equilíbrio. Com esse conceito, podemos representar as transformações por gráficos e calcular o trabalho e as quantidades de calor envolvidas no processo.

A rigor, uma transformação gasosa reversível demandaria um tempo ilimitado para ocorrer, mas isso é indiferente quando consideramos apenas as variáveis pressão, volume e temperatura. Veja, na figura 4.10, um exemplo de transformação irreversível.

Física explica

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

O irreversível e o irremediável


Antonio Robson/Arquivo da editora

A quebra da xícara ilustra bem um processo irreversível, mas não irremediável.

O ditado popular "destruir é sempre mais fácil que construir" pode ser considerado, de certa forma, uma tradução da segunda lei da Termodinâmica. Destruir um castelo de cartas é um fenômeno irreversível. Não porque seja impossível reconstruí-lo, mas porque a energia que será despendida para tanto é bem maior do que a liberada na destruição. Isso quer dizer que a queda do castelo é irreversível, mas não irremediável.

Outro exemplo é uma xícara que cai da mesa e se quebra em três pedaços. É um fenômeno irreversível, pois, mesmo que tivéssemos uma forma de armazenar a energia sonora e a térmica liberadas na colisão, essa quantidade não seria suficiente para restaurar o estado inicial. No entanto, podemos colar cuidadosamente os pedaços e colocar a xícara na mesma posição de antes da queda. Portanto, a quebra da xícara é irreversível, mas não irremediável.

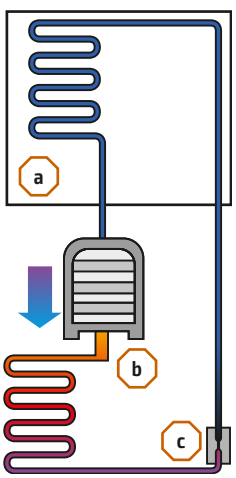
A segunda lei da Termodinâmica descreve a irreversibilidade dos fenômenos termodinâmicos naturais da matéria inanimada. Por outro lado, os seres vivos, recebendo a energia solar, organizam o ambiente, a memória, o conhecimento, remediando as situações. Parece exagero, mas talvez uma das maiores manifestações da vida seja remediar, organizar e aprender, tentando navegar na contramão dessa lei da Termodinâmica.

- Cite um efeito irreversível, porém remediável.

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercícios

10. (Enem) A invenção da geladeira proporcionou uma revolução no aproveitamento dos alimentos, ao permitir que fossem armazenados e transportados por longos períodos. A figura apresentada ilustra o processo cíclico de funcionamento de uma geladeira em que um gás no interior de uma tubulação é forçado a circular entre o congelador e a parte externa da geladeira. É por meio dos processos de compressão, que ocorrem na parte externa, e de expansão, que se dão na parte interna, que o gás proporciona a troca de calor entre o interior e o exterior da geladeira.



Formato/Arquivo da editora

Disponível em: <http://home.howstuffworks.com/refrigerator2.htm>. Acesso em: out. 2012. (Adaptado.)

Nos processos de transformação de energia envolvidos no funcionamento da geladeira:

a) a expansão do gás é um processo que cede a energia necessária ao resfriamento da parte interna da geladeira.

X b) o calor flui de forma não espontânea da parte mais fria, no interior, para a mais quente, no exterior da geladeira.

c) a quantidade de calor cedida ao meio externo é igual ao calor retirado da geladeira.

d) a eficiência é tanto maior quanto menos isolado termicamente do ambiente externo for seu compartimento interno.

e) a energia retirada do interior pode ser devolvida à geladeira abrindo-se a sua porta, o que reduz seu consumo de energia.

11. Você consegue resfriar sua casa deixando a porta do refrigerador aberta? Justifique.
Não. O conjunto libera calor.

12. O catálogo de um aparelho de ar condicionado que retira 3 500 J de energia térmica por segundo (12 000 BTU/hora) de determinado ambiente aponta que o aparelho tem eficiência 3 (300%). Considerando essas condições:

a) Qual é a potência útil do compressor? 3 500 W

b) Qual é a potência térmica do calor rejeitado para o ambiente externo? 4 667 W

c) Se esse aparelho estivesse sendo usado como aquecedor do ambiente externo, qual seria a sua eficiência? 400%

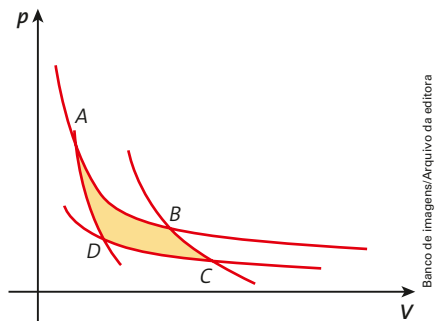
Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

4 O ciclo de Carnot

As máquinas a vapor foram os primeiros motores térmicos. A fonte quente desses motores era obtida com a queima de carvão e eles possuíam um rendimento muito baixo (menor que 5%). No começo do século XIX, os engenheiros e cientistas da época se perguntavam se era possível melhorar o rendimento dessas máquinas com aperfeiçoamento técnico, ou se esse baixo rendimento seria uma imposição das leis da Termodinâmica.

Sadi Carnot, físico francês e assessor científico do exército de Napoleão, respondeu a essa pergunta associando à fonte quente uma temperatura T_q, e à fonte fria, uma temperatura T_f. Criou, assim, um ciclo, o hoje denominado **ciclo de Carnot**, que proporciona rendimento máximo a uma máquina térmica, a **máquina de Carnot**. Em sua obra *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance* ['Reflexões sobre a potência matriz do fogo e sobre os meios adequados de desenvolvê-la'], Carnot demonstrou que nenhum motor térmico cíclico renderia mais que aquele que opera de acordo com o ciclo de Carnot. Reversível, esse ciclo é constituído de duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas, alternadas, conforme mostra o gráfico da figura 4.11.

Representação das transformações isotérmicas e adiabáticas no ciclo de Carnot



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 4.11

As transformações no diagrama ilustrado são:

$$\text{isotérmicas} \begin{cases} AB \\ CD \end{cases} \quad \text{e adiabáticas} \begin{cases} BC \\ DA \end{cases}$$

Em cada ciclo de Carnot, *ABCDA*, as quantidades de calor, Q_q e Q_f, trocadas com as fontes quente e fria, são proporcionais às respectivas temperaturas absolutas dessas fontes.

Em símbolos, temos:

$$\frac{Q_f}{Q_q} = \frac{T_f}{T_q}$$

O ciclo de Carnot propicia um **rendimento** dado por:

$$\eta = \frac{\tau}{Q_q} \Rightarrow \frac{Q_q - Q_f}{Q_q} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q}$$

E, em razão das temperaturas absolutas das fontes quente e fria, temos:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

Essa expressão nos dá o **rendimento máximo** de qualquer motor térmico operando em ciclos entre duas temperaturas, em kelvin, sendo $T_q > T_f$.

Observações:

- Trabalhando com várias fontes térmicas, podemos ter outros ciclos reversíveis diferentes do de Carnot, mas, se considerarmos a temperatura máxima e a mínima desses ciclos, nenhum deles rende mais do que o de Carnot.
- Se nenhum motor térmico rende mais do que o de Carnot, por que esse não é o ciclo usado na prática? A rapidez com que as trocas de calor ocorrem depende da diferença de temperaturas entre os dois corpos. Assim, nas expansões isotérmicas, o motor de Carnot despenderia um tempo infinito para trocar calor com qualquer uma das fontes. O motor ideal, em termos de rendimento, gastaria um tempo infinito para descrever um ciclo e, portanto, teria potência nula.
- Isso nos leva a outra pergunta: por que estudar um motor desse tipo? Porque essa teoria revela o limite superior para o rendimento de um motor térmico trabalhando entre duas fontes e pode ser o guia para sabermos se um motor pode ser melhorado, por estar muito aquém do rendimento de Carnot, ou não.
- É um erro comum pensar que as máquinas térmicas não atingem o rendimento de 100% por causa das perdas internas por atrito, mas não é esse o motivo. Mesmo o motor térmico cíclico ideal, com movimentos internos absolutamente sem atrito, tem o seu rendimento limitado pela temperatura da fonte fria. Ele só poderia atingir um rendimento de 100% se dispusesse de uma fonte fria no zero absoluto.
- A exigência de que as máquinas sejam cíclicas é feita para que possam ser utilizadas continuamente. Sem essa exigência, seria possível obter um motor com rendimento de 100% ou até mais. Por exemplo, em uma expansão isotérmica, como a quantidade de calor recebida pelo gás é totalmente transformada em trabalho, o rendimento seria de 100%. No entanto, como a máquina deve ser utilizada continuamente, é necessário despender determinada energia para fazer o pistão voltar à condição inicial, o que diminui o rendimento. Já no caso de uma expansão adiabática, em que o gás realiza trabalho sem sequer receber calor, ou seja, no qual o rendimento é infinito, fica a pergunta, ainda sem resposta: como fazer o gás voltar à condição inicial sem consumo de energia?

Exercício resolvido

2. A queima de combustível em um motor térmico resulta numa temperatura de 1000 K. Esse motor é resfriado pela atmosfera, cuja temperatura é de 27 °C. O rendimento desse motor é de 30%. Qual é o rendimento máximo de um motor cíclico trabalhando entre essas duas temperaturas?
Esses dados estão bem próximos do que ocorre nos atuais motores a gasolina.

Resolução:

O rendimento máximo de um motor cíclico que esteja funcionando entre duas temperaturas é dado pelo rendimento do ciclo de Carnot. Assim, temos:

$$\eta_{máx.} = 1 - \frac{T_f}{T_q} \Rightarrow \eta_{máx.} = 1 - \frac{27+273}{1000} \Rightarrow \eta_{máx.} = 0{,}70\ (70\%)$$

Enunciados para a segunda lei da Termodinâmica

Destacamos, a seguir, três enunciados equivalentes para a segunda lei da Termodinâmica.

- Enunciado de Kelvin-Planck:

> É impossível construir um motor térmico cíclico com rendimento de 100%.

- Enunciado de Clausius:

> É impossível construir uma máquina térmica cíclica que transfira, sem dispêndio de energia, calor de um corpo mais frio para outro mais quente.

- Enunciado derivado do ciclo de Carnot:

> O zero absoluto é inatingível.

Física explica

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

O zero absoluto

No estudo dos gases obteve-se uma escala de temperatura absoluta baseada no gás perfeito. Essa escala possibilitou identificar a menor temperatura possível para um gás. Mas qual é a garantia de que essa é a menor temperatura possível para um tijolo, por exemplo?

A garantia vem do teorema de Carnot. Primeiro ele demonstrou que nenhuma máquina térmica cíclica, qualquer que fosse o elemento de trabalho (elásticos, gases, barras), renderia mais do que uma reversível. Em seguida, Carnot demonstrou que todas as reversíveis têm o mesmo rendimento. Então ele escolheu uma reversível cujo rendimento soubesse calcular o ciclo de Carnot do gás perfeito. Ora, como todas as reversíveis têm o mesmo rendimento, qualquer outra, trabalhando com qualquer outro elemento, não renderia mais do que a máquina de Carnot.

Como nenhuma máquina térmica cíclica pode render mais que 100% qualquer que seja o elemento de trabalho, o limite inferior de temperatura no Universo, para qualquer elemento, é o zero do gás perfeito.

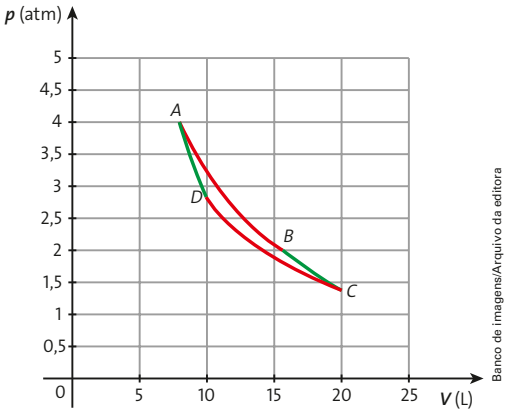
O trabalho de Carnot foi publicado em 1824. Somente 24 anos depois, em 1848, foi que William Thomson (1824-1907) pôde compreender a profundidade desse trabalho e a validade geral da escala de temperatura do gás perfeito, uma das razões pela qual foi condecorado com o título de Lord Kelvin.

1. De acordo com o texto, em termos de rendimento de motores térmicos, qual seria a consequência se existissem temperaturas inferiores a 0 K?
2. Como Carnot pôde estender o resultado do ciclo reversível do gás ideal para todos os ciclos reversíveis?

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

13. No gráfico, temos uma representação esquemática do ciclo de Carnot para um gás ideal.



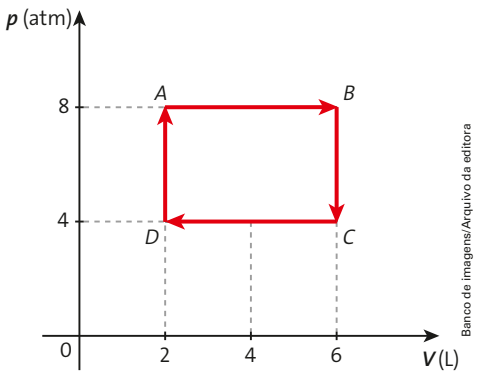
Sabendo-se que as transformações *AB* e *CD* são isotérmicas e as transformações *BC* e *DA* são adiabáticas, escreva em seu caderno a alternativa correta.

a) Na transformação *AB* ocorre uma expansão isotérmica; o gás realiza trabalho e rejeita calor para a fonte fria.
b) Na transformação *BC* ocorre uma compressão adiabática; é realizado trabalho sobre o gás e este recebe calor da fonte quente.
c) Na transformação *CD* ocorre uma expansão isotérmica; o gás realiza trabalho e rejeita calor para a fonte fria.
X d) Na transformação *DA* ocorre uma compressão adiabática; não há troca de calor e é realizado trabalho sobre o gás.

14. Uma pessoa alega ter construído uma máquina térmica que, operando entre duas fontes térmicas cujas temperaturas são 200 K e 100 K, em cada ciclo retira 100 J da fonte quente, cede 25 J para a fonte fria e realiza 75 J de trabalho. Como você pode comprovar a veracidade dessas informações?

Falsa, pois a suposta máquina renderia mais do que a máquina de Carnot, o que é impossível.

15. Um motor térmico, cujo fluido de trabalho é um gás monoatômico ideal, funciona de acordo com o ciclo esquematizado no diagrama $p \times V$ apresentado. Considere $T_B = 1200$ K.



a) Qual é o trabalho útil obtido em cada ciclo? 1600 J
b) Qual é a quantidade de calor recebida pelo gás em um ciclo? 9 200 J
c) Qual é o rendimento desse motor térmico? 17%
d) Qual seria o rendimento de um motor de Carnot que operasse entre as temperaturas máxima e mínima desse ciclo? 83%

16. Em uma usina termelétrica geradora de eletricidade, o vapor entra a 327 °C na turbina e sai dela a 127 °C. Essa turbina tem um rendimento que corresponde a 50% do que teria uma máquina de Carnot operando entre essas temperaturas.

a) Qual é o rendimento dessa turbina? 16,7%
b) Se a usina produz 60 MW de energia elétrica, qual é a potência térmica consumida? 360 MW

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

5 Motores de combustão interna

Pense em uma antiga locomotiva, com a fornalha aquecendo a caldeira. Boa parte do calor gerado na queima do carvão vai para as laterais e para baixo, restando apenas efetivamente uma parte para a caldeira. Como evitar essas perdas? Fazendo a combustão ocorrer dentro do próprio fluido de trabalho, isto é, com uma combustão interna dentro do fluido.

Em geral, os motores dos automóveis, ônibus e motocicletas são de combustão interna. As exceções ficam por conta dos ônibus elétricos e de alguns poucos automóveis elétricos ainda em fase experimental.

Os ciclos utilizados nesses motores são o ciclo Otto, para motores a gasolina, a álcool ou uma mistura deles, e o ciclo Diesel, para os que têm o óleo *diesel* como combustível.

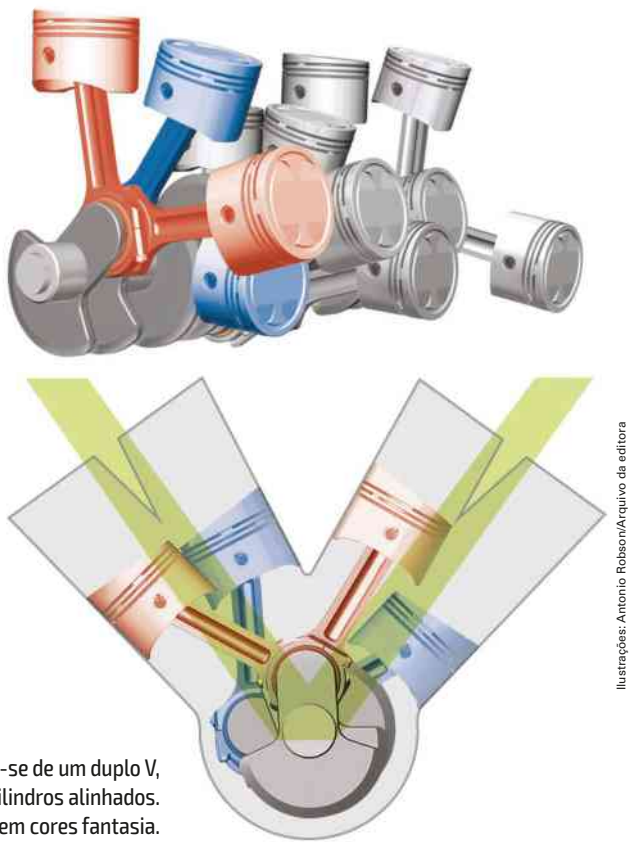


Yuyangc/Shutterstock/Glow Images

Figura 4.12 Dois cilindros de um motor 1.0 de 4 cilindros em linha, com 56,6 kW (77 cv). O volume aspirado por cilindro é 0,25 L.

Os motores de combustão interna utilizam pistões que executam um movimento de vaivém, alternando as várias fases de um ciclo. Geralmente, os fabricantes divulgam o volume total que pode ser aspirado pelos pistões em litro (L). Assim, o motor 2.0 é um motor cuja soma dos volumes de todos os pistões é 2 litros. Já nas motocicletas, esse volume é, normalmente, expresso em centímetro cúbico (cm^3), isto é, em uma moto 125, o volume aspirado é 125 cm^3.

Outra característica dos motores é a disposição dos cilindros. Eles podem estar alinhados (**figura 4.12**); alinhados e contrapostos em pares, em V, ou em W (**figura 4.13**).



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 4.13 Motor com os cilindros em W. Na verdade, trata-se de um duplo V, com diferentes aberturas. São quatro grupos de três cilindros alinhados. Representação sem escala e em cores fantasia.

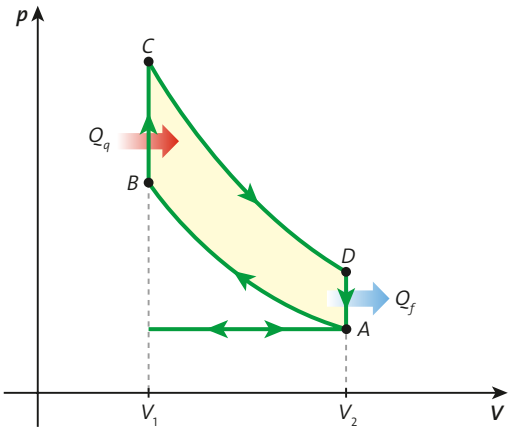
Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

Ciclo Otto: motor a álcool ou gasolina

Na câmara de um motor de combustão interna, uma mistura de vapor de gasolina (ou álcool) e ar é comprimida e inflamada por uma centelha das velas. Os gases produzidos expandem-se, realizando trabalho e, em seguida, são eliminados pelo escapamento, completando um ciclo que se repete.

A figura ao lado representa um modelo que descreve o comportamento da pressão em função do volume dentro da câmara de combustão. Esse modelo idealizado por Nikolaus August Otto (1832-1891) recebe o nome de **ciclo Otto**. Ele é constituído de quatro transformações, duas adiabáticas e duas isométricas, alternadas. Nessas condições, os motores são classificados como de quatro tempos.

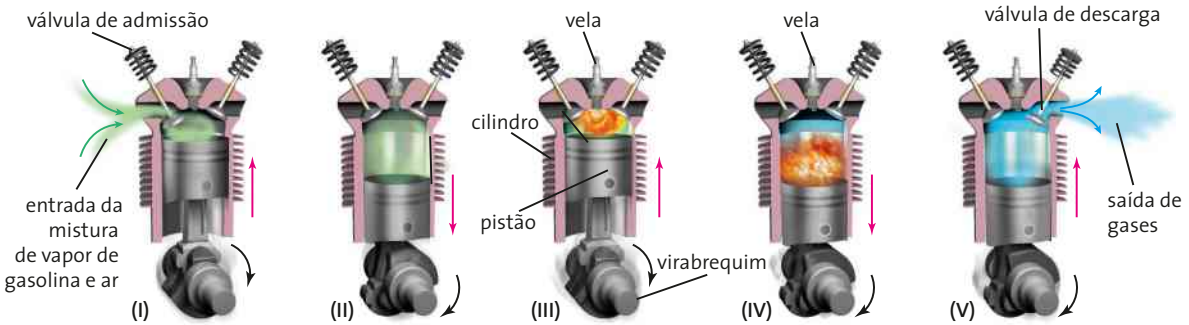
Gráfico $p \times V$ do ciclo Otto



Banco de imagens/Arquivo da editora

A mistura de vapor de gasolina (ou álcool) e ar entra em *A* (admissão) e é comprimida adiabaticamente (compressão) até *B*. De *B* para *C* (ignição), o volume permanece constante e a mistura é aquecida: a pressão e a temperatura aumentam em razão da ignição da mistura provocada pela centelha elétrica da vela. Em seguida, de *C* para *D* (expansão), os gases expandem-se adiabaticamente, realizando trabalho motor. Finalmente, de *D* para *A* (descarga), temos um resfriamento a volume constante, completando um ciclo.

A figura a seguir ilustra as várias fases descritas acima. No ciclo, V_1 e V_2 são, respectivamente, os volumes mínimo e máximo da mistura no cilindro.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Representação sem escala e em cores fantasia das várias fases de um motor conforme o ciclo Otto.

(I) Admissão: com a entrada da mistura de vapor de gasolina e ar na câmara de combustão, o pistão desce e o volume atinge o valor V_2.

(II) Compressão: o pistão sobe e reduz o volume da mistura de V_2 para V_1.

(III) Ignição: com o volume constante, acontece a ignição da gasolina, com o aumento da pressão e da temperatura da mistura.

(IV) Expansão: o pistão desce, aumentando o volume de V_1 para V_2, e o sistema realiza trabalho motor.

(V) Descarga: o pistão sobe e os gases queimados são ejetados da câmara.

O rendimento de um ciclo Otto ideal (reversível), sem levar em conta perdas de calor, irreversibilidades e forças dissipativas, é da ordem de 56%. Na prática, o rendimento dos motores reais do ciclo Otto situa-se em torno de 30%.

$p \times V$ do ciclo Diesel

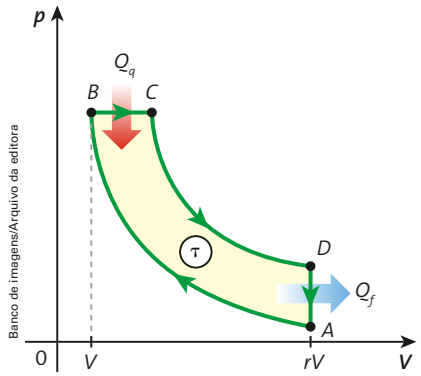


Figura 4.14

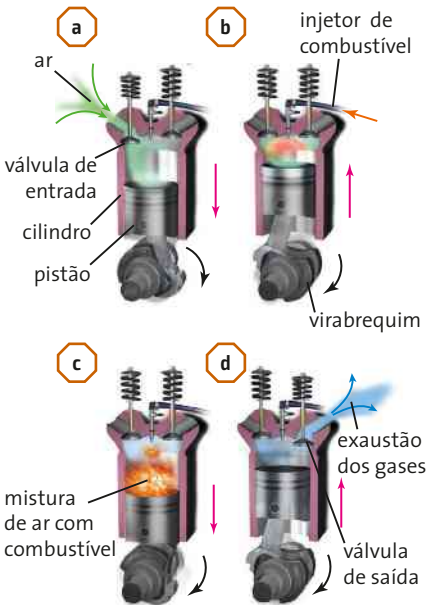


Figura 4.15 Sequência de operação de um ciclo Diesel. Representação sem escala e em cores fantasia.

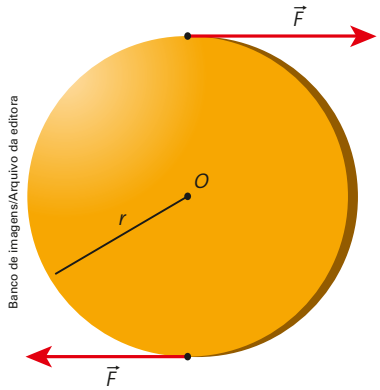


Figura 4.16 Binário gerado no eixo do motor responsável por seu torque.

Motores a *diesel*

A operação do motor a *diesel* é similar à do ciclo Otto. A diferença fundamental é que não há combustível no cilindro no começo da fase de compressão, o que evita a pré-combustão e permite taxas de compressão maiores. Um pouco antes de começar a fase de expansão motriz, os bicos injetores introduzem o combustível diretamente no interior do cilindro, com velocidade suficiente para manter a pressão praticamente constante durante a primeira parte dessa expansão. Em virtude da alta temperatura obtida pela compressão adiabática com alta taxa de compressão, a combustão se inicia espontaneamente, sem a necessidade de velas. O gráfico da **figura 4.14** mostra o ciclo Diesel idealizado (reversível).

Partindo do ponto *A*, o ar é comprimido adiabaticamente até o ponto *B*, aquecido sob pressão constante entre *B* e *C*, expande-se adiabaticamente até o ponto *D*, e é resfriado a volume constante até o ponto *A* (**figura 4.15**).

O rendimento do ciclo Diesel ideal varia entre 65% e 70%. Na prática, esse rendimento é bem menor, ficando em torno de 35%.

Torque de um motor

Já vimos que o rendimento de um motor e sua potência são parâmetros distintos. Melhor rendimento significa um aproveitamento da energia mais eficiente. Já, mais potência significa transformações mais rápidas, ou de quantidades de energia maiores no mesmo intervalo de tempo.

Um fator importante na caracterização dos motores é o **torque**. Ele corresponde ao binário motriz (par de forças que agem para girar o eixo) que o motor consegue entregar aos eixos de tração. Os motores a *diesel* caracterizam-se por apresentar valores de torque mais elevados em baixas rotações do que os motores a gasolina de mesma potência. Essa é uma das razões para que os motores a *diesel* sejam preferidos nos veículos de grande porte.

É comum os consumidores analisarem somente a potência dos motores dos automóveis como parâmetro de desempenho. No entanto, há motores com potências relativamente altas, mas com baixas curvas de torque. Isso acarreta baixas acelerações, ou seja, o automóvel até consegue atingir altas velocidades, mas necessita de longos intervalos de tempo para tanto. Além disso, pode não conseguir superar algumas subidas mais íngremes.

A seguir, vamos analisar uma relação entre o torque do motor e sua potência. A **figura 4.16** ilustra o binário motriz que o motor proporciona ao eixo que vai transmitir o movimento de rotação.

Como a soma vetorial dessas forças é nula, o resultado é o mesmo em qualquer ponto definido como polo para o cálculo do torque. Considerando, por exemplo, o centro *O* como polo, o torque desse binário é:

$$M = F \cdot r + F \cdot r \Rightarrow M = 2F \cdot r$$

Em uma rotação completa, o tempo despendido é um período *T*, e o trabalho realizado pelo par de forças é:

$$\tau = F \cdot 2\pi \cdot r + F \cdot 2\pi \cdot r = 2F \cdot r \cdot 2\pi$$

Lembrando que a potência é a razão entre o trabalho e o intervalo de tempo, temos:

$$P = \frac{\tau}{\Delta t} \Rightarrow P = \frac{2F \cdot r \cdot 2\pi}{\Delta T}$$

Como $M = 2F \cdot r$ e a velocidade angular é $\omega = \frac{2\pi}{T}$, a expressão anterior pode ser escrita como:

$$P = M \cdot \omega$$

A potência de um motor é o produto do torque pela velocidade angular.

17. a) Aproximadamente 55 cv, a 5 500 rpm.
b) Aproximadamente 13 m · kgf, a 2 200 rpm.

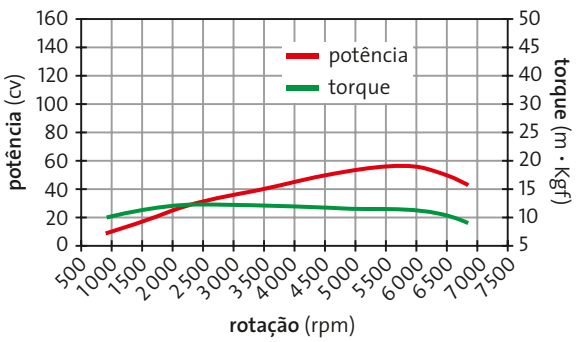
19. a) Veja resposta no Manual do Professor.
c) Porque a perda relativa de torque foi maior que o ganho com o aumento de rotação.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

17. O gráfico seguinte apresenta, hipoteticamente, as curvas de torque e potência de um modelo de veículo de pequeno porte, conforme a rotação do motor, em rotações por minuto. O motor utiliza o ciclo Otto e etanol como combustível.

Curvas características do motor

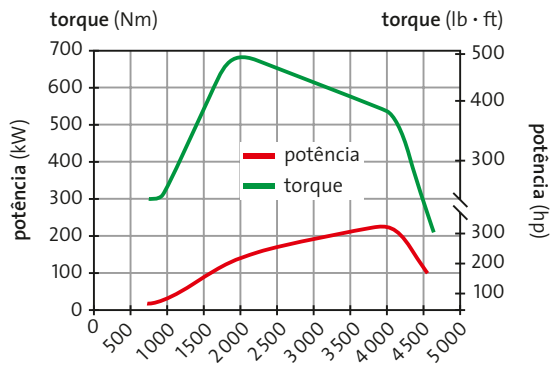


Nesse gráfico são utilizadas as unidades comercialmente mais comuns para potência e torque, que são cv e m · kgf, respectivamente. Sabe-se que 1 cv = 735 W e 1 m · kgf = 9,8 N · m.

a) Qual é a potência máxima desse veículo?
b) Qual é o torque máximo desse motor?

18. O gráfico seguinte apresenta, hipoteticamente, a curva de torque e potência de um motor de ciclo Diesel, 8 cilindros em V, 5,6 L, cuja potência máxima é 230 kW (~310 hp).

Curvas características do motor



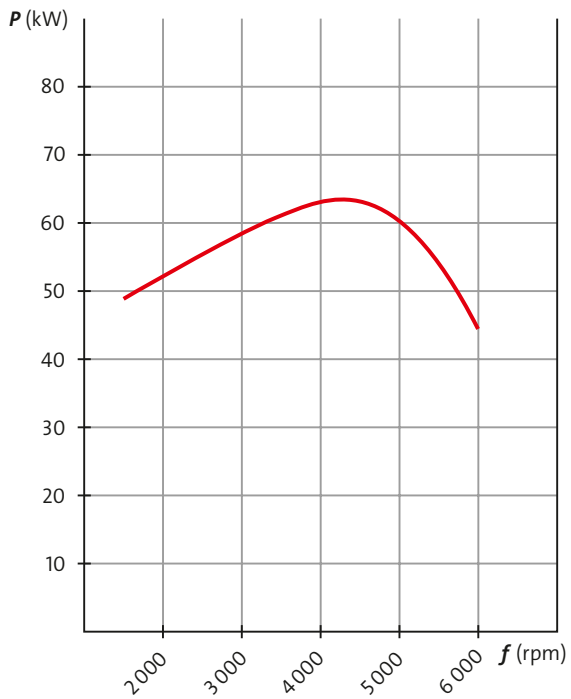
Observe os elevados valores em relação à curva de torque do exercício anterior.

a) Qual é o torque máximo desse motor?
b) Qual é o torque do motor na situação de potência máxima? Faça o cálculo utilizando a relação $P = M \cdot \omega$ e confira com o valor apresentado pelo fabricante.

Observe que 1 rpm $= \frac{\pi \text{ rad}}{30 \text{ s}} \simeq 0{,}105$ rad/s.

Cerca de 530 N · m.

19. A curva de potência de um motor de ciclo Otto é apresentada no gráfico seguinte.



a) Faça, em seu caderno, uma tabela com as potências para as rotações de 2 000, 3 000, 4 000, 5 000, 5 500 e 6 000 rpm, pela expressão $P = M \cdot \omega$.
b) Qual é, aproximadamente, a rotação do motor sob potência máxima? 4 500 rpm.
c) Por que na máxima rotação atingida pelo motor (6 000 rpm) a potência é menor que a máxima?

18. a) Aproximadamente 670 N · m, a 2 000 rpm.

Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

Em construção

Sadi Nicolas Léonard Carnot

Sadi Carnot (1796-1832) foi o primogênito de Lazare Carnot, membro da cúpula do governo revolucionário francês. Sob a orientação do pai, Carnot demonstrou grande talento para as ciências e foi enviado ao Liceu Charlemagne, em Paris. Com apenas 16 anos, ingressou na Polytechnique, onde teve como professores André Marie Ampère (1775-1836), Siméon Denis Poisson (1781-1840) e Dominique François Jean Arago (1786-1853), grandes cientistas da época.

No primeiro dos principais estudos, Carnot procurou estabelecer uma expressão matemática para o trabalho que poderia ser obtido com 1 kg de vapor, usando isotermas e adiabáticas. Esse estudo distinguia-se de outros da época pela clareza da análise e pela precisão matemática no desenvolvimento, mas só veio a público com a descoberta de seus manuscritos, em 1966.

A única publicação de Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance* ['Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre os meios adequados de desenvolvê-la'], ocorreu em 1824, mas o livro só veio a ficar mais conhecido em 1834, após as reformulações de Benoit Paul Émile Clapeyron (1799-1864) para que as ideias ali contidas ficassem mais acessíveis.

O'CONNOR, J. J.; ROBERTSON, E. F. Carnot's Biography. Disponível em: <www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Carnot_Sadi.html>. Acesso em: out. 2015. Texto traduzido.

1. Qual é a importância do ciclo de Carnot para as máquinas térmicas?
2. Pesquise sobre a importância das máquinas térmicas para a Revolução Industrial. Converse com o professor de História.

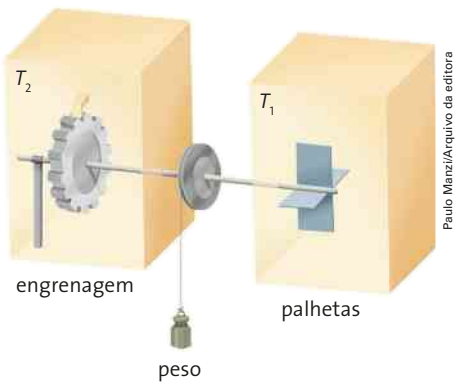
Veja comentários e sugestões sobre este experimento e respostas das atividades no Manual do Professor.

Experimento

Catraca/lingueta

Durante o século XX, houve várias tentativas de criar o moto-perpétuo, isto é, um conjunto capaz de converter calor em trabalho sem que haja uma fonte quente e uma fonte fria no mesmo conjunto.

Propomos, então, que você e os colegas criem um moto-perpétuo: no interior de uma caixa, contendo um gás (que pode ser o ar) a certa temperatura, montem um eixo de roda com dentes. Pelo bombardeamento das moléculas de gás nos dentes, estes oscilam e se movimentam.



Representação (sem escala e em cores fantasia) do moto-perpétuo a ser construído.

Aparentemente, se encaixarmos na outra extremidade do eixo uma roda (catraca/lingueta), como mostra a figura, ela girará em um único sentido, ainda que lentamente, produzindo trabalho.

FEYNMAN, R. F.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *Lições de Física de Feynman*. Porto Alegre: Bookman, 2008. v. 1.

Após a montagem do dispositivo, responda às questões.

1. Houve movimento efetivo do eixo em um dado sentido?
2. Caso prendêssemos um pequeno corpo por um barbante a uma polia do cabo, seria possível levantá-lo?
3. Do ponto de vista de troca de energia, qual é o papel da catraca/lingueta?
4. O segundo princípio da Termodinâmica foi violado nesse experimento?

Retomando

Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resolução dos exercícios deste capítulo.

20. (Fuvest-SP) O desenvolvimento de teorias científicas, geralmente, tem forte relação com contextos políticos, econômicos, sociais e culturais mais amplos. A evolução dos conceitos básicos da Termodinâmica ocorre, principalmente, no contexto:

a) da Idade Média.
b) das grandes navegações.
X c) da Revolução Industrial.
d) do período entre as duas grandes guerras mundiais.
e) da Segunda Guerra Mundial.

21. Um inventor apresenta a você a ideia de um motor a gasolina que funciona em um novo ciclo termodinâmico. O projeto é totalmente feito de cobre e é resfriado a ar. O inventor alega que o rendimento desse motor é de 85%, o que revolucionaria as montadoras de automóveis. Sabendo que a temperatura ambiente é da ordem de 300 K (27 °C) e que a temperatura de liquefação do cobre é 1356 K (1083 °C), você investiria nesse projeto? Justifique.

Inviável, pois o rendimento alegado é impossível.

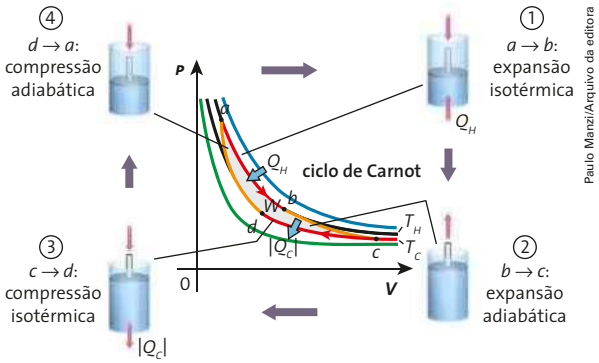
22. (UEPB) No século XVIII, a primeira Revolução Industrial, ocorrida na Inglaterra, foi movida a carvão, com a máquina a vapor impulsionando a indústria têxtil e a metalúrgica; mais tarde, locomotivas e barcos a vapor também impeliram o transporte de longa distância.

KANTOR, C. A. et al. *Física* 1º ano. Coleção Quanta Física, Editora Pearson. São Paulo, 2010.

A energia obtida da combustão do carvão mineral era transformada em energia mecânica, que produzia o movimento das máquinas industriais. Até 1824, acreditava-se que uma máquina térmica poderia atingir o rendimento total. Contudo, Sadi Carnot (1796-1832) demonstrou a impossibilidade desse rendimento. Considerando uma máquina teórica idealizada por Carnot, que opera entre duas fontes, uma fria e outra quente, cujas temperaturas são respectivamente 27 °C e 227 °C, o seu rendimento é igual a:

a) 88%
b) 66,6%
X c) 40%
d) 69%
e) 100%

23. No gráfico, temos uma representação esquemática do ciclo de Carnot para um gás ideal. As transformações *ab* e *cd* são isotérmicas e as *bc* e *da* são adiabáticas.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Em relação à quantidade de calor Q e ao trabalho W em cada uma das transformações mostradas na representação gráfica, assinale a alternativa correta.

	Transformação	Quantidade de calor	Trabalho
a)	1	$Q = Q_H > 0$	$W = 0$
b)	2	$Q = 0$	$W < 0$
X c)	3	$Q = Q_C < 0$	$W < 0$
d)	4	$Q = 0$	$W = 0$

24. (UEM-PR) Uma máquina térmica ideal funciona de acordo com o ciclo de Carnot. As fontes fria e quente são mantidas nas temperaturas de −21 °C e 357 °C, respectivamente. A máquina térmica opera realizando cinco ciclos por segundo e a sua potência útil é de 3 000 W. Indique a soma das alternativas corretas.

(01) O rendimento da máquina térmica é 0,5.
X (02) A quantidade de calor transferida para a fonte fria em cada ciclo é de 400 J.
X (04) A potência fornecida pela fonte quente é de 5 000 W.
X (08) O trabalho útil realizado pela máquina térmica em cada ciclo é de 600 J.
X (16) Se a temperatura da fonte quente for mantida constante e a diferença de temperatura entre as fontes quente e fria for reduzida à metade de seu valor, o rendimento da máquina também será reduzido à metade.

Soma: 30

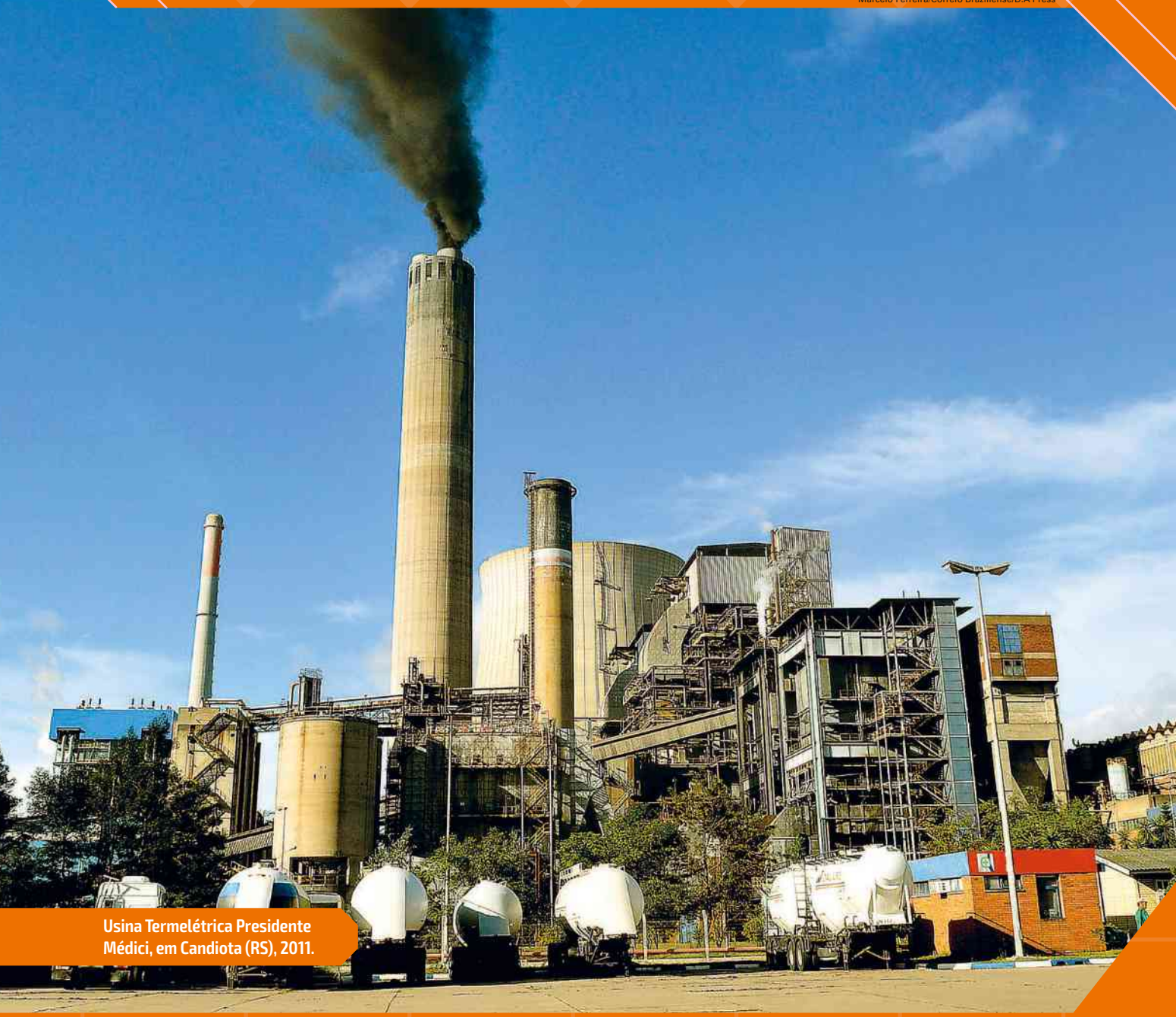
25. Em equipe, façam uma pesquisa sobre a utilização de carros híbridos inteligentes e redijam um texto sobre as vantagens e desvantagens em relação aos carros de combustão, levando em consideração o contexto ambiental, energético e de segurança no trânsito. Veja comentários no Manual do Professor.

CAPÍTULO 5

Fontes de energia e impactos ambientais

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

Marcelo Ferreira/Correio Braziliense/D.A Press



Usina Termelétrica Presidente Médici, em Candiota (RS), 2011.

Segundo o Balanço Energético Nacional 2015 (BEN-2015), em 2014, o total de emissões geradas da matriz energética brasileira atingiu 485,2 $MtCO_2$ (tonelada métrica equivalente de dióxido de carbono). Em sua opinião, quais são os danos que a alta emissão de dióxido de carbono pode ocasionar? O que leva a humanidade a poluir o meio ambiente?

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 A energia que provém do Sol

Em 1969, uma edição especial da conceituada revista estadunidense *Life* destacava:

> Em 15 minutos o Sol irradia sobre nosso globo tanta energia quanto a humanidade consome em todas as demais formas durante um ano inteiro. Não obstante convertamos, agora, apenas diminuta fração dessa torrente de luz solar para nosso uso, uma riqueza enorme de energia radiante está à nossa disposição, e um dia virá em que seremos capazes de captá-la e transformá-la.

Na época da publicação dessa matéria, era quase irrelevante o uso de formas de energia alternativas: existiam relativamente poucas centrais de energia nuclear por fissão no mundo (que usam materiais radioativos criados na formação da Terra), era pequeno o aproveitamento da energia das marés (resultado do sistema gravitacional Terra-Lua) e também da energia **geotérmica**.

Geotérmica – Formas de energia que não têm origem no Sol.

Em resumo, o Sol é responsável por praticamente toda a energia disponível em nosso planeta. É dele que as plantas retiram energia para fazer a fotossíntese e armazenar energia química (**figura 5.1**).

Serg/Shutterstock/Glow Images



Figura 5.1 O aproveitamento direto da energia solar ainda é um desafio tecnológico a ser vencido pela humanidade.

A energia solar aquece camadas de ar, gerando convecção e ventos que, por sua vez, geram as ondas do mar. Essa forma de energia é também a responsável pela vaporização das águas, formando nuvens que trarão as chuvas para reabastecer lagos, rios, oceanos, reservatórios de usinas hidrelétricas, etc. Até mesmo os combustíveis fósseis, como o carvão mineral, o petróleo e o gás natural, são herança do que a energia solar construiu há centenas de milhões de anos.

Considerando uma superfície plana perpendicular aos raios solares na distância média que a Terra está desse astro, a intensidade da radiação, definida como potência dividida por unidade de área, é de 1397 W/m^2. Essa é a quantidade de energia que chega à Terra por unidade de tempo e por unidade de área. Parte desse fluxo é refletida por nossa atmosfera, parte é absorvida, e o restante chega ao solo.

Na região tropical, na qual se situa a maior parte do Brasil, em dias ensolarados, a intensidade da radiação solar que chega ao solo, chamada de **insolação**, é de cerca de 1000 W/m^2.

À medida que a latitude aumenta, a intensidade da insolação vai diminuindo, tanto pelo aumento da inclinação quanto pelo aumento da quantidade de atmosfera que os raios precisam atravessar.

A energia não pode ser destruída, apenas transformada ou transferida. Por isso, a expressão "consumo de energia", muito usada em nosso dia a dia, está fisicamente errada. De fato, o que fazemos fisicamente são transformações de energia que sejam convenientes, conforme a finalidade de cada tarefa. Mas, por conveniência, vamos usar o termo "consumo", sabendo que, na realidade, o real significado é **transformação/transferência** da energia.

G. Evangelista/Opção Brasil Imagens



Figura 5.2 Com a maioria do território localizado na faixa intertropical, a posição geográfica do Brasil sugere um uso mais amplo de coletores solares nas residências. Ouro Preto (MG), 2015.

A energia solar pode ser usada em:

- aquecimento da água (**figura 5.2**), por meio de coletores solares. Essa medida diminui drasticamente o consumo de energia elétrica;
- evaporação da água na secagem de roupas, grãos (**figura 5.3**), etc.;
- fotossíntese das plantas (**figura 5.4**), processo em que a energia solar é transformada em energia química;
- conversão direta em energia elétrica por meio de grandes placas de células fotovoltaicas (**figura 5.5**).

Além disso, quando usamos os combustíveis fósseis, a energia dos ventos, das ondas ou das hidrelétricas (**figura 5.6**), estamos usando também a energia solar, embora não diretamente.

João Prudente/Pulsar Imagens



Figura 5.3 O processo de secagem do café pode ser feito em terreiros ou em câmaras de aquecimento. Embora um pouco mais lenta, a secagem por simples exposição ao Sol dispensa o consumo de combustíveis. Serra Negra (SP), 2013.

Fabio Colombini/Acervo do fotógrafo



Figura 5.4 Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a safra brasileira 2014/2015 de cana-de-açúcar foi de 634,8 milhões de toneladas. A produção de etanol combustível é o motivo de grande parte desse cultivo. Canavial e usina de açúcar e álcool em Santa Rita do Passa Quatro (SP), 2014.

Eduardo Zappia/Pulsar Imagens



Figura 5.5 As células fotovoltaicas podem ser uma solução para a eletrificação rural. Independência (CE), 2013.

Gerson Gerloff/Pulsar Imagens



Figura 5.6 As chuvas que mantêm o nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas são uma consequência da evaporação provocada pela energia solar. Barragem da usina hidrelétrica Foz do Chapecó. Alpestre (RS), 2015.

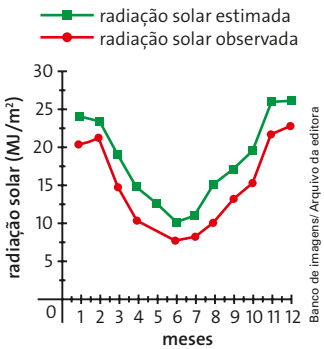
Trabalho em equipe

Análise da insolação de um local

Nesta atividade, sob orientação do professor, sua equipe vai utilizar um gráfico obtido em um trabalho científico publicado por pesquisadoras da Universidade Federal de Pelotas (RS), em 1999. Um dos temas do trabalho é a avaliação da insolação diária medida ao longo de um ano na cidade de Pelotas.

Analisem o gráfico e respondam às questões a seguir.

1. Em qual mês a insolação diária foi menor? Discuta com sua equipe e aponte a causa dessa baixa insolação.
2. Observem que o gráfico mostra a energia total recebida ao longo de um dia. Considerando um período diário de insolação de dez horas, calculem a insolação média em J/(m² · s), ou seja, W/m², ao final do mês 12.
3. Considerando que a radiação solar que nos atinge nas camadas mais altas da atmosfera é 1400 W/m², qual é o percentual dessa radiação que efetivamente chega ao solo, considerando ainda o mês 12?



QUEIROZ, M.; NOGUEIRA, C.; ASSIS, S. *Avaliação de um método empírico para estimativa da radiação solar global*. Disponível em: <www.cbmet.com/cbm-files/12-e28878866bb9808f983ba37af27c858.pdf>. Acesso em: out. 2015.

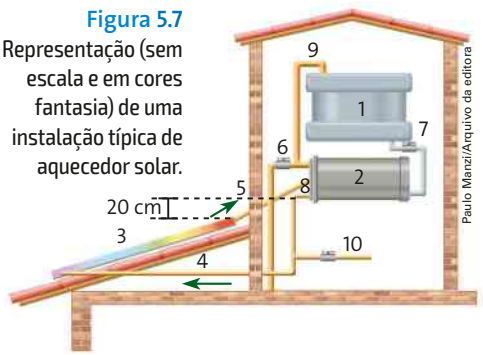
Aquecedor solar

Um sistema básico de aquecimento de água por energia solar é composto de placas coletoras e reservatório térmico, chamado comercialmente de *boiler* (cuja tradução seria ebulidor, mas é apenas um reservatório), representado esquematicamente na figura 5.7.

As placas coletoras são responsáveis pela absorção da radiação solar. O calor do Sol, captado pelas placas do aquecedor solar, é transferido para a água que circula no interior de suas tubulações de cobre. Essas placas precisam estar em um nível abaixo do reservatório para garantir o fluxo de água mais quente, por convecção, no sentido correto – das placas para o reservatório.

O fato de as placas serem de vidro minimiza as perdas de calor para o ambiente, pois o vidro permite que a radiação solar penetre nas placas. Na faixa de temperatura do interior da placa, a radiação térmica predominante que sairia dela seria na faixa do infravermelho, na qual o vidro transmite muito pouco. Dessa forma, o vidro facilita a entrada da radiação no interior, mas minimiza as perdas pela radiação que sai para o exterior. Esse é o chamado **efeito estufa**, que será tratado ainda neste capítulo.

Figura 5.7
Representação (sem escala e em cores fantasia) de uma instalação típica de aquecedor solar.



1. reservatório de água fria
2. reservatório de água quente (*boiler*)
3. placas coletoras
4. descida de água menos quente para o coletor
5. retorno da água aquecida para o *boiler*
6. tubulação que conduz a água quente para consumo
7. entrada da água fria proveniente da caixa-d'água
8. sistema auxiliar de aquecimento
9. respiro
10. dreno

O reservatório térmico é um recipiente para armazenamento da água aquecida. Normalmente, são cilindros de aço inoxidável isolados termicamente com **poliuretano expandido**. Dessa forma, a água é conservada aquecida para consumo posterior. A caixa de água fria alimenta o reservatório térmico do aquecedor solar, mantendo-o sempre cheio.

Poliuretano expandido – Polímero que possui cadeias orgânicas unidas por ligações uretânicas.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir

Por que não contribuir com o meio ambiente utilizando os aquecedores solares de baixo custo feitos de garrafas PET?



Gerson Gerloff/Pulsar Imagens

As placas de vidro podem ser substituídas por garrafas PET.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Em sistemas convencionais, a água circula entre os coletores e o reservatório térmico através de um sistema de circulação natural, a convecção, chamado **termossifão**. Nesse sistema, a água dos coletores fica mais quente e, portanto, menos densa que a água no reservatório. Assim, a água fria "empurra" a água quente, gerando a circulação. Essa circulação permanece e a água é continuamente aquecida.

A circulação da água também pode ser feita com motobombas, em um processo chamado **bombeado** ou **circulação forçada**. As motobombas são normalmente utilizadas em piscinas e sistemas de grandes volumes, como a irrigação de plantações.

Quando os raios do Sol atravessam o vidro da tampa do coletor, eles esquentam as aletas, que são feitas de cobre ou alumínio e pintadas com uma tinta especial e escura que ajuda na absorção máxima da radiação solar. O calor passa, então, das aletas para os tubos (serpentina), geralmente de cobre, onde se encontra a água, que esquenta e vai diretamente para o reservatório do aquecedor solar.

Os coletores recebem um cuidadoso isolamento térmico. São instalados sobre telhados ou lajes, sempre o mais próximo possível do reservatório térmico. A eficiência térmica dos modernos aquecedores solares situa-se em torno de 60%.

Se a intenção no aquecimento solar for obter altas temperaturas, a energia solar pode ser concentrada em uma pequena região: o foco de um espelho refletor parabólico (figura 5.8). Neste caso, temos um aquecedor solar parabólico.



J.D.S./Shutterstock/Glow Images

Figura 5.8 Aquecedor solar parabólico, que pode chegar a fornecer água no estado de vapor.

Células fotovoltaicas

Radiante – Energia que se propaga por meio da radiação.

As células fotovoltaicas convertem a energia radiante em energia elétrica pelo chamado efeito fotovoltaico. Há grandes vantagens nessa conversão direta.

Duas das vantagens dessa conversão direta são:

- a energia pode acionar motores elétricos, os quais apresentam rendimento muito maior do que os motores térmicos. Mesmo os motores elétricos mais simples têm rendimento em torno de 90% (figura 5.9).
- a energia elétrica pode ser armazenada em baterias para uso posterior (figura 5.10), como iluminação noturna, por exemplo. Essa utilização, contudo, requer lâmpadas elétricas de alta eficiência, tais como as lâmpadas halógenas.



Tricia Daniel/Shutterstock

Figura 5.9 Carro elétrico alimentado por energia solar, que é captada por meio das células fotovoltaicas instaladas sobre o teto do veículo. Competição de carros movidos a energia solar. Austin, Texas (EUA), 2014.



Elwynn/Shutterstock/Glow Images

Figura 5.10 Representação do uso de células fotovoltaicas para carregar baterias, visando a iluminação doméstica.

Outra vantagem é a **durabilidade** desses painéis. Por não conterem componentes mecânicos que se desgastam com o uso, as estimativas apontam que os painéis podem ser usados por mais de trinta anos (figura 5.11).

Um ponto negativo que pode ser citado é que, em razão do elevado grau de pureza do silício e a exata quantidade de dopagem, necessários para a construção de células fotovoltaicas, a fabricação dessas células exige ambientes isolados, pois até algumas partículas de poeira podem comprometer a produção de um dia inteiro. Inicialmente, os custos são muito elevados para uso comercial em larga escala, mas, apesar disso, a produção de células fotovoltaicas vem dobrando a cada dois anos desde 2002.

O **rendimento** das mais modernas células atinge 23%, mas a Universidade de Delaware (Estados Unidos), em parceria com empresas privadas, vem desenvolvendo células que poderão atingir 42% de rendimento.

Já há células com rendimento próximo a 40%, cujos custos são restritivos para o uso comercial, que somente são utilizadas em tecnologia espacial, como no fornecimento de energia elétrica para satélites, por exemplo.



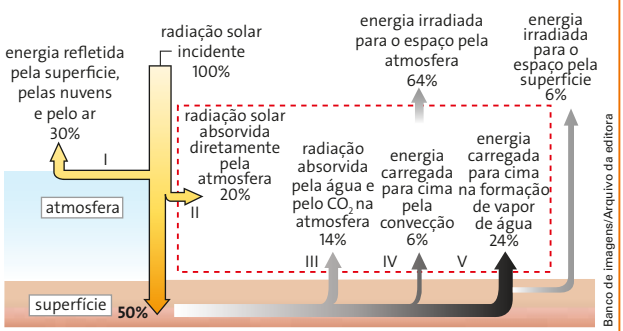
Pen_85/Shutterstock

Figura 5.11 Árvore de células fotovoltaicas, em Burgas, Bulgária, 2016.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

1. (Enem) O diagrama abaixo representa, de forma esquemática e simplificada, a distribuição da energia proveniente do Sol sobre a atmosfera e a superfície terrestre. Na área delimitada pela linha tracejada, são destacados alguns processos envolvidos no fluxo de energia na atmosfera.



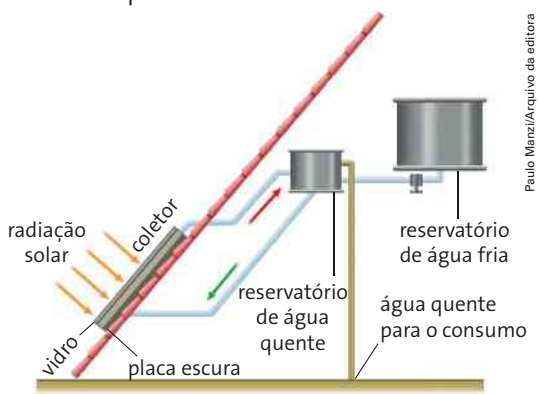
Banco de imagens/Arquivo da editora

Raymond A. Serway e John W. Jewett. *Princípios de Física*, v. 2, fig. 18.12 (com adaptações).

Com base no diagrama acima, conclui-se que:

a) a maior parte da radiação incidente sobre o planeta fica retida na atmosfera.
b) a quantidade de energia refletida pelo ar, pelas nuvens e pelo solo é superior à absorvida pela superfície.
c) a atmosfera absorve 70% da radiação solar incidente sobre a Terra.
X d) mais da metade da radiação solar que é absorvida diretamente pelo solo é devolvida para a atmosfera.
e) a quantidade de radiação emitida para o espaço pela atmosfera é menor que a irradiada para o espaço pela superfície.

2. (Enem) O resultado da conversão direta de energia solar é uma das várias formas de energia alternativa de que se dispõe. O aquecimento solar é obtido por uma placa escura coberta por vidro, pela qual passa um tubo contendo água. A água circula, conforme mostra o esquema abaixo.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Adaptado de: PALZ, Wolfgang. *Energia solar e fontes alternativas*. São Paulo: Hemus, 1981.

São feitas as seguintes afirmações quanto aos materiais utilizados no aquecedor solar:

I. O reservatório de água quente deve ser metálico para conduzir melhor o calor.
II. A cobertura de vidro tem como função reter melhor o calor, de forma semelhante ao que ocorre em uma estufa.
III. A placa utilizada é escura para absorver melhor a energia radiante do Sol, aquecendo a água com maior eficiência.

Dentre as afirmações acima, pode-se dizer que apenas está(ão) correta(s):

a) I.
b) I e II.
c) II.
d) I e III.
X e) II e III.



Fabio Colombini/Acervo do fotógrafo

Figura 5.12 Rocha de carvão mineral, também chamado de carvão coque.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

2 Combustíveis fósseis

Os combustíveis fósseis, também chamados de combustíveis minerais em virtude do processo de extração, foram formados pela decomposição anaeróbica de organismos como fitoplâncton e zooplâncton, que viveram há cerca de 300 milhões de anos em mares ou lagos e foram soterrados. Ao longo das eras geológicas, como resultado das altas pressões e temperaturas, essa matéria orgânica foi se alterando quimicamente, tornando-se rica em carbono e hidrocarbonetos.

Por outro lado, as plantas terrestres soterradas deram origem ao chamado carvão mineral (**figura 5.12**).

Diferentemente do carvão vegetal, obtido com o processamento da lenha, o carvão mineral é mais denso e tem maior poder calorífico. Além do uso em usinas elétricas – usinas termoelétricas –, ele também é usado na siderurgia e na produção de cimento.

Os tipos de combustíveis fósseis variam de alguns muito voláteis, com pouquíssimo carbono em relação à quantidade de hidrogênio, como o metano, passando pelo petróleo líquido, não volátil, até o carvão mineral, praticamente carbono puro.

Os combustíveis fósseis são de grande importância porque podem ser queimados (oxidados, formando dióxido de carbono e água), produzindo grande quantidade de calor. O uso do carvão como combustível remonta à Pré-História.

Física tem História

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

O uso de combustíveis fósseis e a emissão de dióxido de carbono

A exploração comercial de petróleo começou a se expandir no século XIX, inicialmente para alimentar lamparinas, que antes eram supridas com óleos vegetais ou animais, principalmente o óleo de baleia.

O gás natural, antes queimado como resíduo desnecessário com a obtenção do petróleo, é hoje em dia uma fonte valiosa de energia.

O petróleo pesado, muito mais viscoso que o petróleo convencional, e o alcatrão arenoso, onde o betume é encontrado misturado com areia e argila, também vêm se tornando importantes fontes de combustível.

O xisto betuminoso e os similares, rochas sedimentares contendo complexas misturas de componentes orgânicos de alto peso molecular, são extraídos da rocha por aquecimento, dando origem ao chamado petróleo "sintético".

Antes da metade do século XVIII, os moinhos de vento e de roda-d'água eram usados para tarefas como moagem de grãos e bombeamento de água. A queima de madeira ou de turfa provia a energia necessária para os aquecimentos domésticos.

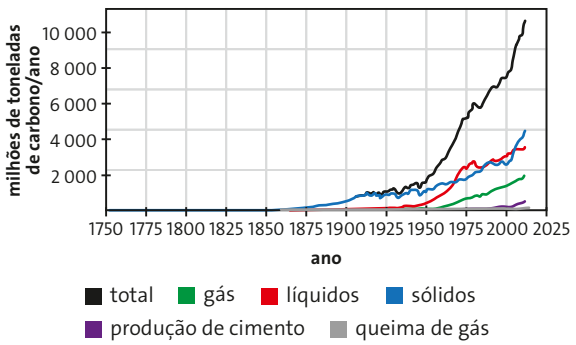
O uso de combustíveis fósseis em larga escala, primeiro o carvão mineral e depois o petróleo, provendo calor para as máquinas a vapor, possibilitou a chamada Primeira Revolução Industrial, iniciada no fim do século XVIII. No final do século XIX, a invenção dos motores de combustão interna e seu uso nos automóveis e caminhões aumentou significativamente a demanda por gasolina e óleo *diesel*, ambos derivados do petróleo. Outras formas de transportes, como trens e navios e, no começo do século XX, os aviões, também passaram a usar derivados do petróleo.

O piche, inicialmente um resíduo da refinação do petróleo, revelou-se um produto essencial na pavimentação de ruas e rodovias para a composição do asfalto, e também para uso como impermeabilizante.

Os combustíveis fósseis também são usados na geração de eletricidade e na indústria petroquímica, produzindo lubrificantes, fertilizantes e vários tipos de plásticos.

O gráfico abaixo mostra o crescimento no uso de combustíveis fósseis, a partir do ano de 1750 até 2025, pela emissão do dióxido de carbono (CO_2). A produção de cimento também está presente no gráfico, em virtude do uso de carvão mineral no processo.

Emissão global de dióxido de carbono de origem fóssil

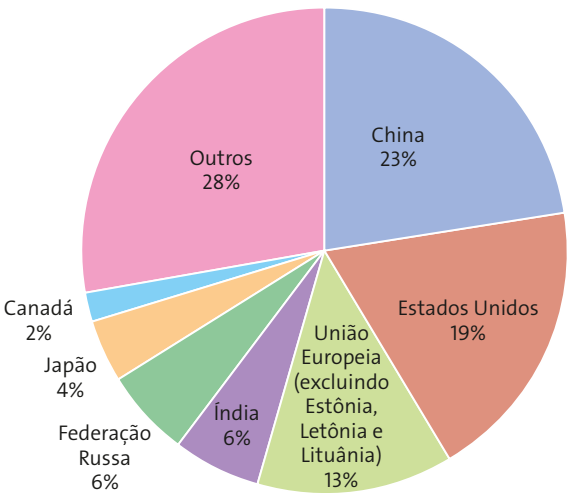


Banco de imagens/Arquivo da editora

Fonte: BODEN, T.A.; MARLAND, G.; ANDRES, R. J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO_2 Emissions. Carbon dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn. U.S.A., 2015. Disponível em: <cdiac.ornl.gov/images/global_fossil_carbon_emissions_google_chart.jpg>. Acesso em: 7 jan. 2016.

- Compare a emissão global total de dióxido de carbono a cada período de 50 anos, entre 1800 e 2000. Em qual período o crescimento foi maior? Como você explica esses números?
- Analisando o gráfico seguinte, comente a afirmação de que os Estados Unidos, a China e a União Europeia produzem mais emissões de CO_2 do que todos os outros países juntos.

Países que mais emitem CO_2



Banco de imagens/Arquivo da editora

Fonte: United States Environmental Protection Agency. Disponível em: <www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html#four>. Acesso em: out. 2015.

Consumo e reservas

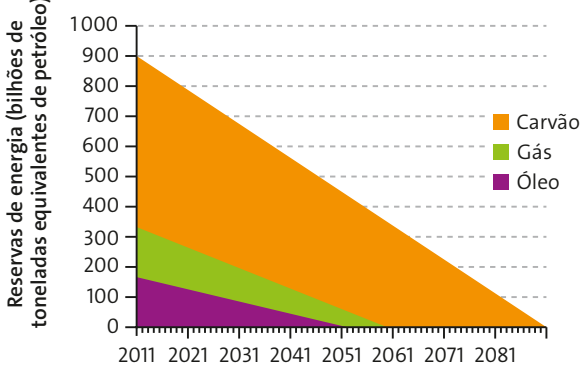
A famosa lei econômica da oferta e da procura sugere que, à medida que as reservas de petróleo forem diminuindo, o preço do produto deve ir aumentando.

O desenvolvimento tecnológico na detecção e extração do petróleo a grandes profundidades vem poupando as perspectivas de sua escassez. Por exemplo, as recentes descobertas da Petrobras nas camadas de pré-sal estimam reservas adicionais de 8 bilhões de barris (1 barril = 159 L), mas a exploração do petróleo a essas profundidades envolve investimentos que podem tornar o produto final mais caro do que o que seria obtido por fontes renováveis.

Os **combustíveis fósseis são esgotáveis**. Para se ter uma ideia, estima-se que para a formação de 1 litro de gasolina são necessárias 23,5 toneladas de matéria orgânica.

Dois fatores são importantes para o cenário futuro: quanto se produz por unidade de tempo (fluxo), em estreita correlação com o consumo, e quanto há disponível (reservas).

Reservas de combustíveis fósseis



Banco de imagens/Arquivo da editora

Fonte: The End of Fossil Fuels (com base em dados da CIA – Central Intelligence Agency). Disponível em: <www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energy-independence/the-end-of-fossil-fuels>. Acesso em: 6 jan. 2016.

Figura 5.13 Previsão do comportamento das reservas de combustíveis, considerando a média anual de consumo.

O gráfico da **figura 5.13** mostra a previsão da disponibilidade dos combustíveis fósseis, considerando que o fluxo de produção permaneça o mesmo de 2011, e sem considerar a descoberta das novas reservas.

Para avaliar a energia disponível em determinado combustível, utiliza-se o chamado **calor de combustão**, grandeza que mede a quantidade de energia que o combustível oferece por unidade de massa ou de volume.

O carvão mineral, por exemplo, apresenta algumas variedades que dependem de seu período de formação e de outros fatores.

A **tabela 5.1** apresenta os valores do calor de combustão dos principais tipos de carvão mineral, da gasolina pura, do *diesel* e do etanol.

Tabela 5.1 Calor de combustão por tipo de combustível

Tipo de combustível		Calor de combustão (kJ/g)
carvões minerais	turfa seca	15
	linhito	15
	antracito	27
gasolina		47,3
diesel		44,8
etanol		29,7

Fonte: INTERNATIONAL Energy Agency. *Key World Energy Statistics*, 2005. p. 59.

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercício

3. É comum algumas pessoas acharem que os motores a álcool (etanol) são menos eficientes porque gastam mais litros de combustível por quilômetro rodado nas mesmas condições. Considere a densidade da gasolina 0,7 g/cm³, a do etanol 0,8 g/cm³, e os valores de energia, em kJ/g, apresentados na **tabela 5.1**.

a) Se um modelo de carro a gasolina, em determinadas condições, faz 10 km com um litro de combustível, qual foi a energia despendida? $E = 3{,}3 \cdot 10^7$ J

b) Quanto, em litros, um modelo idêntico, mas movido a etanol, nas mesmas condições do caso anterior, gastaria para fazer os mesmos 10 km? $V = 1{,}39$ L

3 Biocombustíveis

Como o próprio nome diz, os biocombustíveis são obtidos de matéria orgânica. Esse termo nos remete, na maioria das vezes, a combustíveis obtidos de vegetais, como o milho, a cana-de-açúcar e a mamona.

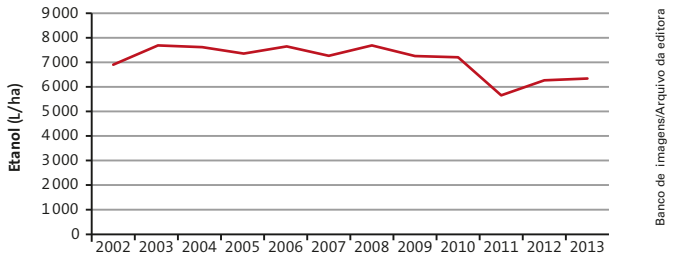
Etanol

Um fator importante na agricultura é a produtividade que determinada cultura permite por unidade de área, por ano. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), no caso da cana-de-açúcar, cada hectare (10 000 m²) produz, em média, 80 toneladas de cana por ano (2013-2014). Cada tonelada de cana produz aproximadamente 90 litros de etanol, portanto, em média, cada hectare rende cerca de 7 000 litros de **álcool etanol**.

Essa média pode variar conforme a qualidade da safra, de acordo com o gráfico da figura 5.14.

Para produzir etanol da cana-de-açúcar, primeiro é necessário prensá-la e extrair dela a garapa, restando desse processo apenas o bagaço. A garapa é posta em um processo de fermentação e depois é destilada. O calor necessário para destilação é obtido com a queima do bagaço, cujas sobras se transformam em combustível, que, em muitas usinas modernas, é utilizado para acionar turbinas a vapor que geram energia elétrica. Essa energia oriunda do bagaço é suficiente para suprir toda a energia elétrica da usina e ainda pode ser vendida a distribuidoras de eletricidade. Assim, as modernas usinas de álcool são mais do que autossustentáveis: são também miniusinas de eletricidade.

Rendimento da produção de etanol (em L/ha e kg/ha)



Fonte: SANTOS, Gesmar Rosa. Produtividade na agroindústria canavieira. In: *Radar*: tecnologia, produção e comércio exterior, ed. esp., n. 39, jun. 2015. p. 52. Disponível em: <www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/radar/150630_radar_39.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2016.

Figura 5.14 Rendimento da produção de etanol (em litros por hectare) de 2002 a 2013.

Após todo o processo, uma tonelada de cana-de-açúcar produz 80 litros de etanol. Considerando toda a energia utilizada na produção, desde a preparação do solo, colheita, transporte, destilação, etc., gasta-se um litro de álcool para cada nove produzidos.

Biodiesel

Utilizando-se alguns processos físico-químicos é possível obter *diesel* a partir do metanol e de outros derivados de petróleo. Mas por que sua utilização como combustível não é vantajosa?

A razão é que os motores que utilizam o ciclo Diesel têm rendimentos e torques muito superiores aos do ciclo Otto por causa das taxas de compressão. Além disso, para motores de grande porte, como os de caminhões, ônibus, navios, geradores estacionários e tratores, o ciclo Otto não é adequado.

Como a quantidade de óleo *diesel* obtida por barril na destilação fracionada (craqueamento) do petróleo é limitada, essa transformação de metanol (e outros derivados) em *diesel* tem se revelado interessante, possibilitando até estender o uso do *diesel* para automóveis comuns. Mas permanece uma desvantagem: a dependência do petróleo, de onde normalmente se obtém o metanol.

O Brasil vem desenvolvendo processos para obtenção de óleo *diesel* diretamente de vegetais, como mamona, soja, dendê, girassol, babaçu, amendoim, pinhão, etc. (figura 5.15).

O *biodiesel* não é, de fato, uma novidade. Rudolf Diesel (1858-1913) apresentou o seu primeiro motor, que era movido a óleo de amendoim, no fim do século XIX. Naquele tempo, o petróleo era muito caro. O *biodiesel* pode ser usado diretamente nos motores que utilizem o ciclo Diesel (figura 5.16), ou misturado com *diesel* convencional, em proporções variáveis, que podem ser identificadas por siglas. Por exemplo, B2 significa que aquele *diesel* tem 2% de *biodiesel*, e B100, que é 100% *biodiesel*. A Alemanha é responsável por mais da metade da produção europeia de combustíveis e já conta com centenas de postos que vendem o *biodiesel* puro (B100), com plena garantia dos fabricantes de veículos.

Rubens Chaves/Pulsar Imagens



Figura 5.15 Usina de açúcar e álcool. União dos Palmares (AL), 2015.

Nereu JR/Fotoarena



Figura 5.16 Ônibus movido a *biodiesel*. Curitiba (PR), 2015.

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

ITER – Uma esperança de energia limpa

No final do século XX, cientistas de todos os cantos do mundo se juntaram ao projeto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor* – 'Reator Termonuclear Experimental Internacional') com um nobre objetivo: produzir energia limpa pela fusão de átomos para prover uma ajuda à crescente demanda de energia da civilização.

O ITER é um experimento científico de larga escala cuja meta é provar a viabilidade da fusão nuclear como fonte de energia, como acontece no núcleo das estrelas (nosso Sol, por exemplo), e os dados necessários para projetar a primeira instalação industrial de produção de eletricidade com a fusão de átomos.

De fato, já há reatores de fusão de pequena escala, os Tokamaks, mas a energia que produzem é inferior à necessária para colocá-los em funcionamento.

Diante dos atuais reatores nucleares baseados na fissão, os reatores termonucleares são absolutamente seguros, pois, em caso de uma avaria, como a que ocorreu na usina nuclear de Chernobyl, a reação termonuclear é suspensa em milésimos de segundo. Ao contrário das atuais centrais nucleares, os reatores termonucleares não produzem resíduos radioativos nocivos, apenas liberam hélio, um gás inerte e inofensivo.

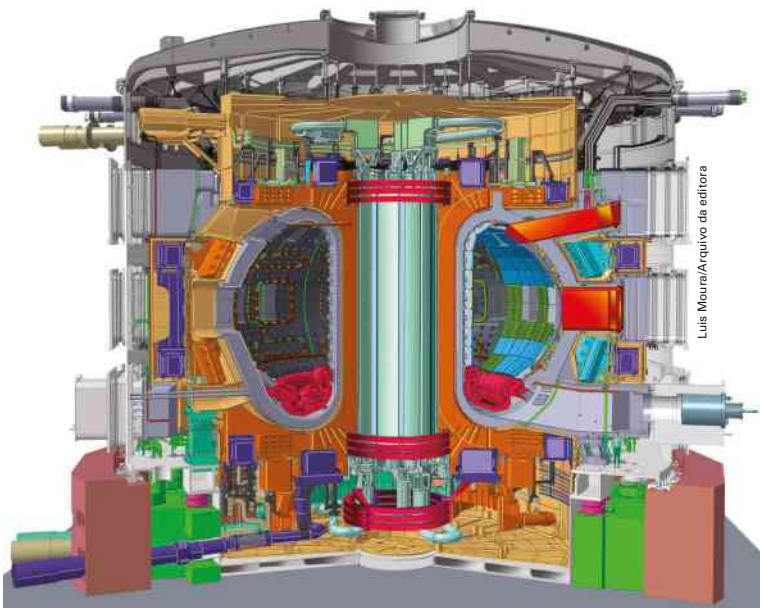
O acordo internacional para o desenvolvimento do ITER foi assinado por China, União Europeia, Índia, Japão, Coreia do Sul, Rússia e Estados Unidos. Esses membros do acordo vão patrocinar o custo do projeto pelos 10 anos da fase de construção e mais 20 anos da fase operacional.

Em Cadarache, no sul da França, iniciou-se, em 2007, a construção do ITER com os primeiros equipamentos científicos. A fabricação dos componentes está em curso nas indústrias dos países-membros. O nível de coordenação requerido para o pleno sucesso da integração de mais de um milhão de partes do ITER Tokamak, por si só, é a criação de um novo modelo de colaboração científica internacional. A produção de energia prevista é de 500 MW.

1. A área destinada ao projeto inteiro do ITER é de 180 hectares, ao passo que a área inundada pela hidrelétrica de Itaipu é de 1350 km^2 (1 km^2 = 100 hectares), na qual é produzida uma potência de 12 GW. Compare as potências produzidas por hectare das duas instalações.

2. Pesquise sobre a utilização do gás hélio, subproduto que haverá da fusão, e os atuais meios de obtenção desse gás.

Fontes dos dados: SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA. *Construção de reator de fusão nuclear avança na França*. Disponível em: <www.sbfisica.org.br/v1/index.php?option=com_content&view=article&id=425:construcao-de-reator-de-fusao-nuclear-avanca-na-franca&catid=152:acontece-na-sbf&Itemid=270>; ITER. *The Project*. Disponível em: <www.iter.org>. Acessos em: out. 2015.



Luis Moura/Arquivo da editora

O incrível complexo do ITER Tokamak terá 23 000 toneladas e cerca de 30 metros de altura, que corresponde a um prédio de doze andares. Já o edifício que o abriga terá 60 metros de altura e 13 metros de subsolo. Representação sem escala e em cores fantasia.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

4 Fontes alternativas de energia

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

O consumo de combustíveis fósseis, de certa forma, é o gasto rápido de uma poupança acumulada por centenas de milhões de anos e que certamente se esgotará. Em uma analogia financeira, o planeta está gastando mais do que ganha.

A expressão "desenvolvimento sustentado" liga várias preocupações em relação ao modo de vida e de produção das nações. Uma delas é estabelecer o equilíbrio entre o consumo de energia e a produção, de forma que nossos descendentes possam também dispor de energia e qualidade de vida. Com isso em mente se desenvolveu a produção de energia elétrica através da transformação das energias eólica, das marés, das ondas do mar e a geotérmica.



Education Images/UIG/Getty Images

Figura 5.17 Antigo moinho de vento em Castilla-La Mancha, Espanha, 2013.

Energia eólica

Na antiga mitologia grega, Éolo, filho de Zeus, era o deus dos ventos, daí o sentido da palavra eólico como 'aquilo que é gerado pela ação do vento'. Assim, a energia oriunda dos ventos é denominada energia eólica. O aproveitamento desse tipo de energia já era feito desde a Idade Média com os moinhos de vento (figura 5.17), que tinham uma eficiência relativamente baixa.

Recentemente, foram desenvolvidos rotores para captar a energia eólica com apurado desenho aerodinâmico de suas pás, cujo ângulo de ataque é variável de acordo com a velocidade do vento (figura 5.18).



Geraldo Bubniak/Fotoarena

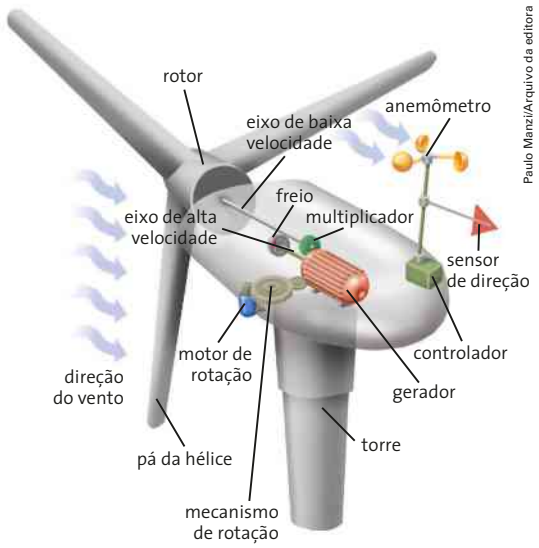
Figura 5.18 Conjunto de rotores eólicos em Fortaleza (CE), 2013.

A orientação dos rotores também acompanha a direção dos ventos. Esses rotores acionam um dínamo que vai transformar a energia de rotação em energia elétrica (figura 5.19).

Essa forma de aproveitar a energia dos ventos em zonas rurais pode ser uma alternativa, usando-se vários conjuntos de rotores.

Vários países da Europa ocidental têm aproveitado essa energia, cujo uso vem crescendo ano a ano. Na Alemanha, por exemplo, há cerca de 22 664 desses rotores instalados em grandes conjuntos, por toda parte, já respondendo por mais de 20% da produção total de energia do país, gerando 30 GW.

A velocidade dos ventos é variável, por isso às vezes há períodos de calmaria, nos quais as pás da turbina não giram. Essa é uma desvantagem dessa forma de energia alternativa: **ela pode não estar disponível o tempo todo**. Procura-se minimizar essa desvantagem colocando-se várias turbinas, em vários locais diferentes, produzindo um sistema interligado de geração.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

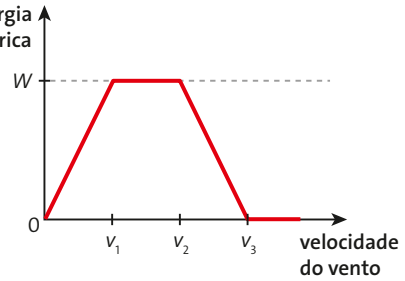
Figura 5.19 Representação esquemática dos componentes de um rotor eólico.

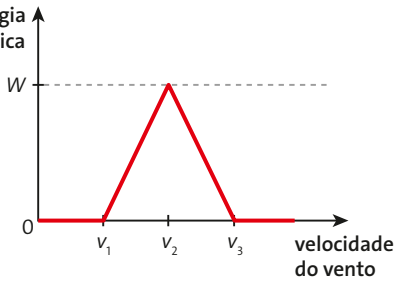
ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

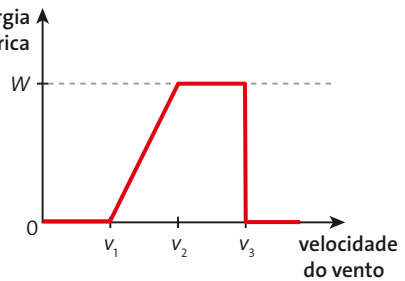
4. (Pisa-Inep) Quanto mais forte o vento, mais rapidamente giram as pás dos geradores eólicos e mais energia elétrica é gerada. No entanto, em uma situação real, não há uma relação direta entre a velocidade do vento e a energia elétrica produzida. A seguir, apresentamos quatro condições de funcionamento de uma central de energia eólica em situação real.

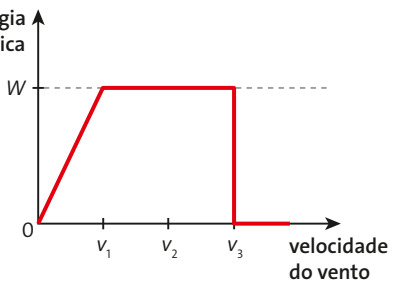
- As pás começarão a girar quando a velocidade do vento for v_1.
- Por razões de segurança, a rotação das pás não aumentará quando a velocidade do vento for maior que v_2.
- A potência elétrica está no máximo (W) quando o vento atinge a velocidade v_2.
- As pás irão parar de girar quando a velocidade do vento alcançar v_3.

Qual dos gráficos a seguir melhor representa a relação entre a velocidade do vento e a energia elétrica gerada sob as condições de funcionamento descritas?

a)


c)


X b)


d)


5. (Pisa-Inep) A uma mesma velocidade do vento, quanto mais elevada for a altitude, mais lenta será a rotação das pás. Qual das alternativas a seguir explica melhor por que as pás dos geradores eólicos giram mais lentamente em lugares mais altos, já que a velocidade do vento é a mesma?

X a) O ar é menos denso, à medida que a altitude aumenta.
b) A temperatura é mais baixa, à medida que a altitude aumenta.
c) A gravidade torna-se menor, à medida que a altitude aumenta.
d) Chove com mais frequência, quando a altitude aumenta.

6. (Enem) Não é nova a ideia de se extrair energia dos oceanos aproveitando-se a diferença das marés alta e baixa. Em 1967, os franceses instalaram a primeira usina maremotriz, construindo uma barragem equipada de 24 turbinas, aproveitando-se a potência máxima instalada de 240 MW, suficiente para a demanda de uma cidade com 200 mil habitantes. Aproximadamente 10% da potência total instalada são demandados pelo consumo residencial.

Nessa cidade francesa, aos domingos, quando parcela dos setores industrial e comercial para, a demanda diminui 40%. Assim, a produção de energia correspondente à demanda aos domingos será atingida mantendo-se:

I. todas as turbinas em funcionamento, com 60% da capacidade máxima de produção de cada uma delas.
II. a metade das turbinas funcionando em capacidade máxima e o restante, com 20% da capacidade máxima.
III. quatorze turbinas funcionando em capacidade máxima, uma com 40% da capacidade máxima e as demais desligadas.

Está correta a situação descrita:

a) apenas em I.
b) apenas em II.
c) apenas em I e III.
d) apenas em II e III.
X e) em I, II e III.

Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/ Arquivo da editora

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

5 Impactos ambientais

O texto de Carl Sagan nos revela a preocupação que devemos ter com nosso modo de vida, hábitos de consumo e métodos de produção em todo o planeta. A natureza tem seus próprios mecanismos de estabilidade, mas eles são limitados.

> A história humana pode ser vista como um lento acordar do ser humano para a consciência de pertencer a um grupo mais vasto. Inicialmente a nossa lealdade ia para nós próprios e para aqueles que nos eram próximos; depois se alargou aos bandos de caçadores nômades, depois às tribos, às pequenas colônias, às cidades-Estado, às nações. Alargamos o círculo daqueles que amamos. Temos agora organizadas aquilo que modestamente são descritas como superpotências, que incluem pequenos grupos de pessoas com antecedentes étnicos e culturais divergentes trabalhando de certa forma em conjunto. É certamente uma experiência humanizante e formadora do caráter. Se tivermos de sobreviver, a nossa lealdade tem de se alargar até incluir toda a comunidade humana: o planeta Terra inteiro. Muitos daqueles que dirigem as nações considerarão esta ideia desagradável. Irão recear a perda de poder. Ouviremos muita coisa sobre a traição e a deslealdade. Os Estados ricos terão de partilhar a sua riqueza com os Estados pobres. Mas a escolha, como uma vez disse H. G. Wells em outro contexto, é ou o Universo, ou nada.
>
> SAGAN, Carl. *Cosmos*. Lisboa: Gradiva, 2009. p. 339.

Os estudos de temas ecológicos, antes uma parte da Biologia, estão presentes hoje em todas as disciplinas. É preciso discutir os impactos ambientais de cada uma das fontes de energia utilizadas pelo homem, além do problema do lixo, da água potável, do ar e da radiação solar que banha o nosso planeta. Os estudos científicos do meio ambiente nos alertam e, ao identificar as causas de mudanças ambientais, também nos apontam as correções que devem ser feitas.

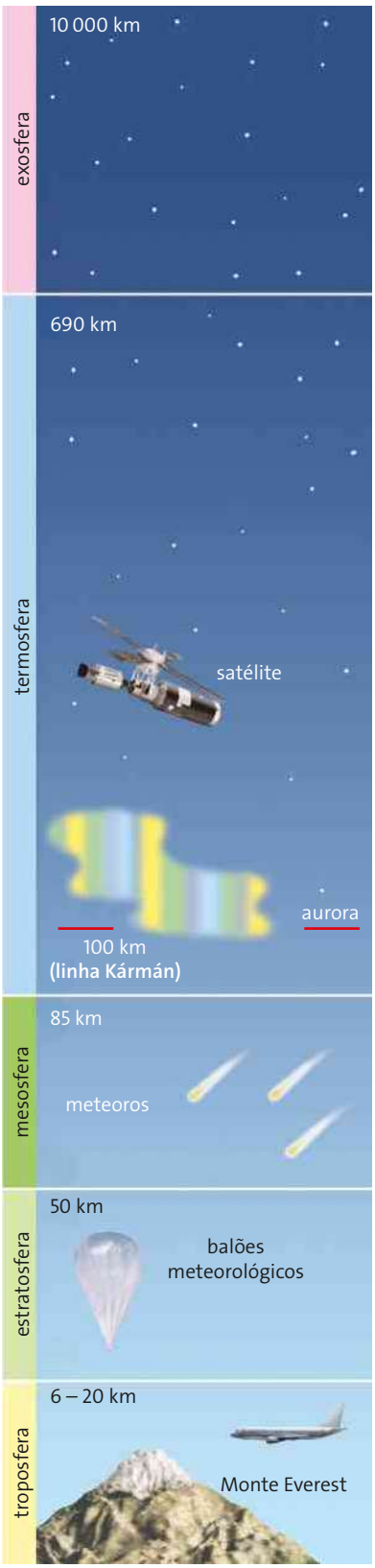
O que mantém o planeta habitável

A temperatura na superfície da Terra depende de nossa **atmosfera**. Sem ela, além de as temperaturas médias serem diferentes, as diferenças entre a temperatura diurna e a noturna seriam insuportáveis para os seres vivos.

Não há um limite definido para o extremo superior de nossa atmosfera que a separe do espaço interplanetário. Cerca de 75% de toda massa de ar está abaixo de 11 km de altitude, onde a pressão é aproximadamente 20% da pressão ao nível do mar.

À medida que a altitude aumenta, o ar vai ficando mais rarefeito e a pressão diminui. Na altitude de 120 km, por exemplo, temos cerca de um milionésimo da pressão ao nível do mar.

A figura 5.20 ilustra várias camadas atmosféricas com algumas de suas características.

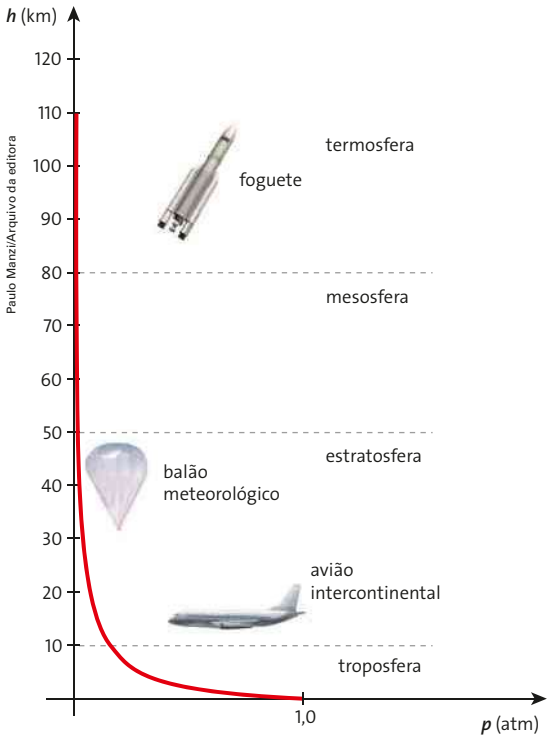


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 5.20 As várias camadas atmosféricas e algumas de suas características. Representação sem escala e em cores fantasia.

Os gráficos da figura 5.21 ilustram o comportamento da pressão e da temperatura ao longo da altitude e nomeiam algumas camadas de nossa atmosfera.

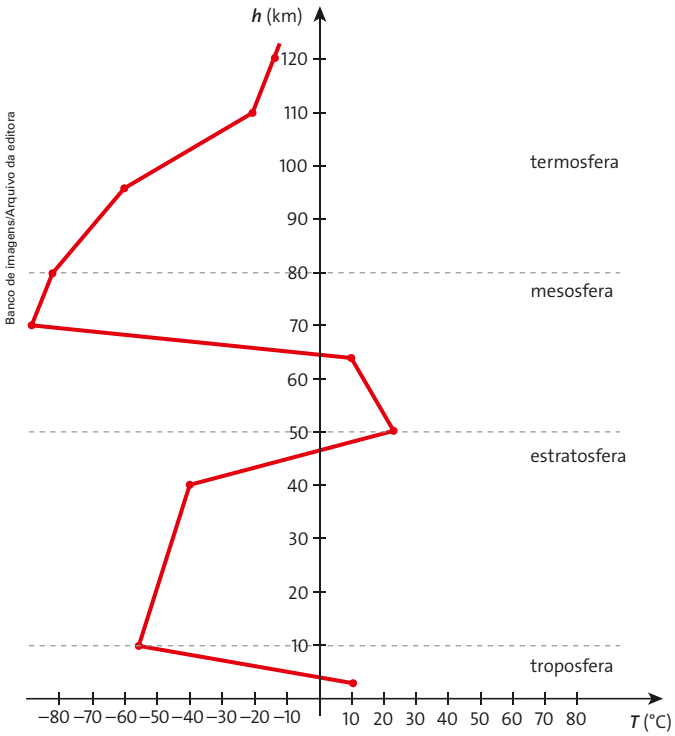
Valor da pressão em função da altitude



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Fonte: Pressão. Encyclopædia Britannica. Disponível em: <www.britannica.com/science/pressure>. Acesso em: 7 jan. 2016.

Valor da temperatura em função da altitude



Banco de imagens/Arquivo da editora

Fonte: Global Change Course. Disponível em: <www.meteor.iastate.edu/chem/evol/images/image3.gif>. Acesso em: 6 jan. 2016.

Figura 5.21 Gráficos da pressão e da temperatura em função da altitude.

Na Terra, a temperatura varia de acordo com a região e com as estações do ano. Contudo, a temperatura média da superfície da Terra, quando a consideramos em sua totalidade, é praticamente constante, ou seja, o planeta não está ganhando nem perdendo energia térmica. Assim, a taxa de radiação que a Terra emite deve ser igual à taxa de radiação solar que ela recebe (não incluindo a energia solar que ela reflete).

Uma vez que a taxa de emissão de radiação de um corpo depende de sua temperatura, essa condição pode ser usada para obter a temperatura média da Terra, cujo valor médio é 9 °C. O responsável por manter a temperatura média em torno de 9 °C é o chamado **efeito estufa**. Sem esse efeito, nosso planeta seria em média cerca de 30 °C mais frio e praticamente inabitável. Isso acontece porque alguns gases da atmosfera terrestre, formada em grande parte por vapor de água, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonetos (CFC), entre outros, retêm parte da radiação que escaparia para o espaço.

Mas por que esses gases não retêm a entrada da energia térmica, uma vez que eles retêm sua saída?

Na verdade, eles agem da mesma forma ao receber a radiação solar. No entanto, como a radiação que chega à Terra é emitida por um corpo com temperatura em torno de 5 800 K (aproximadamente 6 000 °C), o Sol, e apenas uma pequena parte dessa radiação está na região do **infravermelho** – faixa na qual atuam os gases do efeito estufa –, as portas estão abertas para a maior parte da radiação banhar a superfície e as camadas mais baixas da atmosfera.

Infravermelho – Radiação eletromagnética. A radiação emitida pelo Sol é composta de infravermelho, a luz visível e o ultravioleta, e é fundamental para o desenvolvimento da vida na Terra.

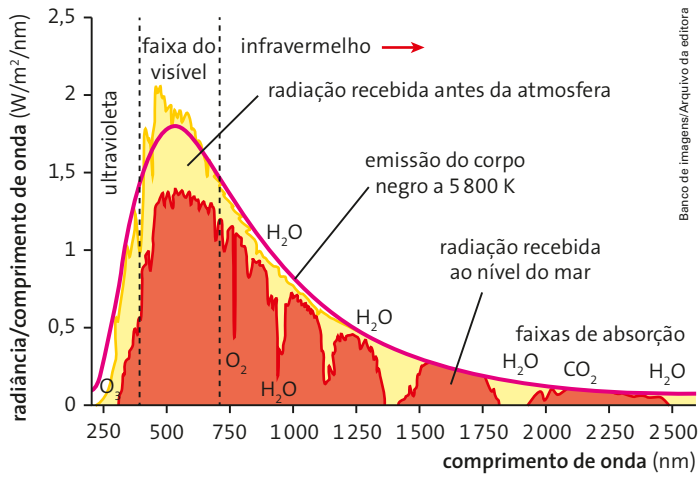
Na emissão, a maior parte da radiação que iria para o espaço está na faixa do infravermelho, e a ação seletiva dos gases estufa permite a retenção de boa parte da radiação que escaparia, ou seja, a ação seletiva na entrada é muito menor que na saída (figura 5.22).



Figura 5.22 Pequenas mudanças de hábitos são necessárias para melhorar nossa interação com o planeta.

O gráfico da figura 5.23 ilustra a distribuição da energia solar que chega ao nosso planeta comparando a radiação antes de atingir a atmosfera – dados obtidos por satélites artificiais – com a que chega à superfície. Observe como a absorção feita pelo vapor de água é alta para os grandes comprimentos de onda (ondas longas) e a ação do O_3 (ozônio) na absorção da radiação ultravioleta.

Distribuição da energia solar na atmosfera e na superfície da Terra



Fonte: GRIMM, Alice Marlene. Meteorologia básica – Notas de aula. Disponível em: <física.ufpr/br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>. Acesso em: 6 jan. 2016.

Figura 5.23 Radiação solar antes de atingir a atmosfera e ao atingir a Terra.

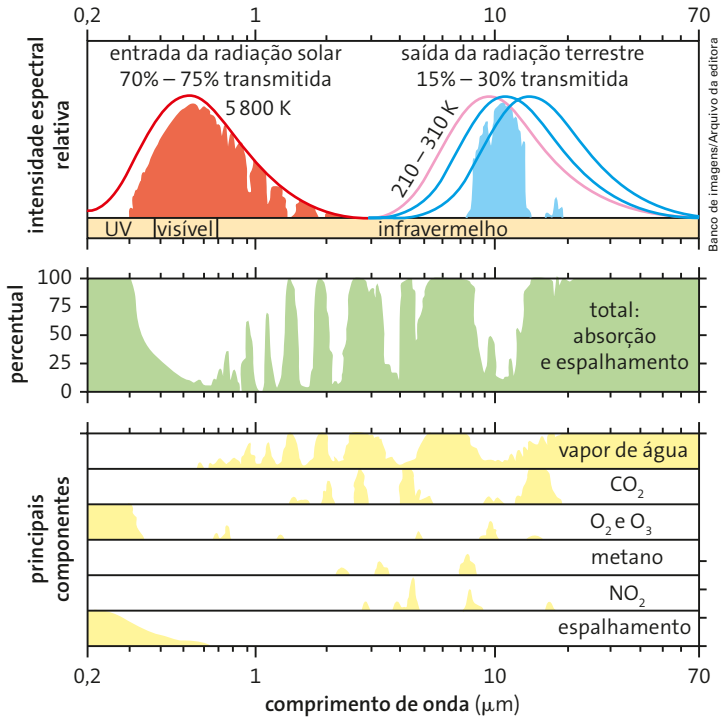
Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

A descoberta do efeito estufa

Em 1681, o cientista francês Edme Mariotte (1620-1684) já observara que, embora o calor da radiação solar passasse facilmente pelo vidro, o calor de uma lareira não o fazia. Em 1760, o geólogo e físico suíço Horace Benedict Saussure (1740-1799) construiu o heliotermômetro, um aparato formado por um termômetro dentro de uma caixa escura envolta por placas de vidro. Benedict mostrou que as temperaturas medidas eram bem maiores quando as placas de vidro eram colocadas.

Em 1824, o cientista francês Joseph Fourier (1768-1830), citando Benedict, argumentou: "a temperatura da Terra é aumentada pela interposição da atmosfera, porque o calor luminoso encontra menos resistência para penetrar através do ar do que o calor não luminoso repassado pela Terra". Contudo, não se sabia exatamente quais substâncias eram responsáveis por essa diferença.

Distribuição dos percentuais da radiação solar e da emissão da Terra



Fonte: UEMS. Física – Literatura plena. Disponível em: <física.uems.br/arquivos/fismeioamb/cap2-Radiacao.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2016.

Em 1859, o físico inglês John Tyndall (1820-1893) identificou, por meio de experimentos, que moléculas mais complexas do que as simples diatômicas O_2 e N_2, como o CO_2 e H_2O, absorviam muito mais o "calor não luminoso" (infravermelho).

O vidro comum e outros materiais também têm a propriedade de retenção do infravermelho. Por exemplo, algumas plantas necessitam de temperaturas maiores que as do ambiente local em que são cultivadas para sobreviver. Por isso, elas são cultivadas em uma estufa: um galpão, geralmente de vidro, que permite a entrada da maior parte da radiação solar, mas bloqueia boa parte do que seria emitido na faixa do infravermelho, tornando o ambiente interno mais quente do que o externo. Daí a razão do nome efeito estufa. Como há uma cobertura hermética impedindo a saída do ar quente que escaparia após subir por convecção, esses fenômenos não são exatamente análogos.

Em um carro com os vidros fechados, parado por muito tempo sob Sol intenso, verificamos claramente o aumento da temperatura interna. Deixar os vidros ligeiramente abaixados (alguns milímetros) vai permitir o escape do ar quente, diminuindo um pouco o aquecimento.



Grandpa/Shutterstock/ID/BR

Estufa de baixo custo. Em vez de vidro, é coberta com plástico.

Efeito estufa e aquecimento global

O efeito estufa tem aspectos benéficos para o planeta, propiciando temperaturas médias adequadas para os seres vivos. Entretanto, o excesso desse efeito pode ser prejudicial, ocasionando temperaturas médias maiores.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC – em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), órgão internacional criado em 1988 pelas Nações Unidas e pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, na sigla em inglês), é composto de cientistas de todo o mundo dedicados à pesquisa e ao monitoramento das mudanças climáticas em nosso planeta.

A Terra já passou por várias eras geológicas, com grandes variações de temperatura em razão de ciclos e fenômenos naturais. A ação humana, também conhecida como **ação antropogênica**, principalmente a partir de 1800, depois do início da Revolução Industrial, tem influído fortemente no clima.

O aumento do efeito estufa, cuja maior parte é provocada pela queima de combustíveis fósseis – uma ação antropogênica –, é uma das grandes preocupações climáticas. A queima de combustíveis fósseis produz CO_2, e o aumento de CO_2 na atmosfera pode ampliar o efeito estufa, o que provoca aumento na temperatura média da Terra.

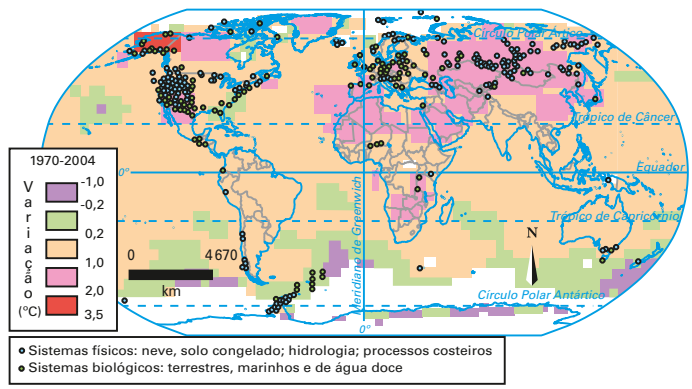
Na **figura 5.24** temos um mapeamento feito pelo IPCC do aumento das temperaturas médias em diferentes regiões do planeta.

A complexidade do sistema dinâmico que é a Terra dificulta muito a elaboração de projeções apuradas sobre o futuro do clima. Embora hoje as previsões do tempo sejam confiáveis, há margens de erro.

Para ter uma projeção mais assertiva em relação ao clima da Terra, seria necessário responder a perguntas como: o consumo de combustíveis fósseis permanecerá nos mesmos níveis atuais? O rendimento dos motores térmicos aumentará? A população mundial mudará significativamente?

Essas são perguntas para as quais não temos uma resposta definitiva. Diante disso, os cientistas do clima procuram trabalhar com os chamados "cenários" . Um desses cenários, chamado de A1B, do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE – em inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), considera que a emissão de CO_2 continuará crescendo na mesma taxa atual até 2050 e depois deve decair, pela escassez que haverá de petróleo e de outros combustíveis fósseis e pelo crescimento do uso de fontes de energia mais limpas (**figura 5.25**). Esse cenário considera ainda pequeno o aumento na área desmatada.

Variações de temperatura em diferentes regiões da Terra

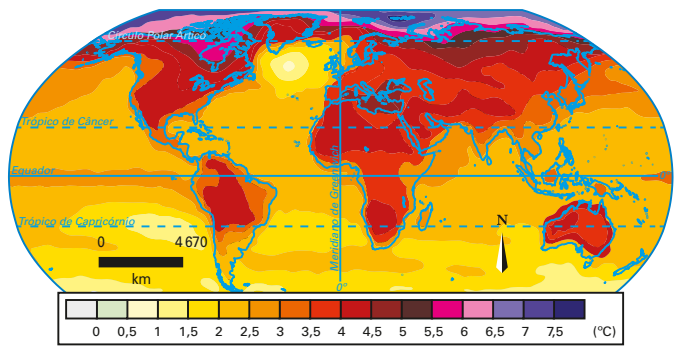


Banco de imagens/Arquivo da editora

Fonte: OMM/PNUMA. Sumário para os formuladores de políticas, 2007. Disponível em: <www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/portuguese/ar4-wg2-3pm.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2016.

Figura 5.24 Mapa baseado em cerca de 29 000 medidas selecionadas de um conjunto de 80 000, correspondente a 577 estudos independentes.

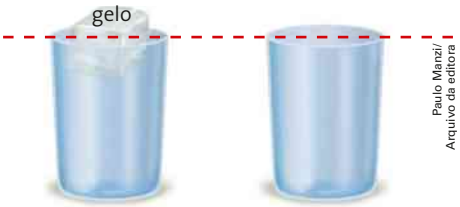
Variações de temperatura ao final do século XXI



Banco de imagens/Arquivo da editora

Fonte: ScienceBlogs. Disponível em: <scienceblogs.com/illconsidered/2014/03/another-week-of-global-warming-news-march-23-2014>. Acesso em: 6 jan. 2016.

Figura 5.25 Projeção (entre 2090 e 2100) segundo o cenário A1B do IEEE, considerando como base a década de 1980.



Paulo Manzi/ Arquivo da editora

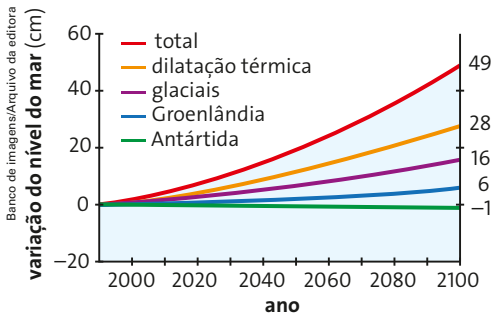
Figura 5.26 Nível do recipiente antes e depois de o gelo ter derretido. Representação sem escala e em cores fantasia.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir

O derretimento das calotas polares aumenta o nível dos mares?

Elevação do nível dos mares



Banco de imagens/Arquivo da editora

Fonte: RealClimate. Disponível em: <www.realclimate.org/index.php/archives/2013/10/sea-level-in-the-5th-ipcc-report/>. Acesso em: 6 jan. 2016.

Figura 5.27 Previsão considerando um aumento de 2,5 °C na temperatura da Terra.

Nível do mar

Vamos realizar um experimento simples. Em um copo com água, coloque uma pedra de gelo de tal forma que o copo fique totalmente cheio, sem derramar água. Se você aguardar o gelo derreter totalmente, vai verificar que não houve transbordamento de água. A água, fruto da fusão do gelo, vai ocupar o volume que era ocupado pela parte submersa do bloco e o nível da água no recipiente ficará exatamente como estava (**figura 5.26**).

Há uma pequena diferença entre a densidade da água salgada (do mar) e a água pura (gelo). Como essa diferença é de cerca de 1%, o derretimento de gelo flutuante não teria uma contribuição tão significativa para a elevação do nível dos oceanos. Contudo, há muito gelo em cordilheiras e também camadas de gelo sobre o solo na Groenlândia, e, nesses casos, o derretimento afetaria o nível dos mares. Portanto, o maior impacto no nível dos mares é originado de outro fenômeno: a dilatação térmica da água.

O gráfico da **figura 5.27** ilustra a elevação prevista para o nível dos mares, considerando um cenário no qual a temperatura média da Terra iria aumentar 2,5 °C nos próximos cem anos. Observe a contribuição de cada um dos fatores.

Alguns podem estranhar o fato de que, nesse cenário, a contribuição da Antártida para a elevação do nível dos mares é praticamente nula, mas isso pode ser explicado por três fatores. Primeiro, porque boa parte do gelo antártico é flutuante, o que, como vimos, não afeta o nível do mar ao derreter. Segundo, porque entre 0 °C e 4 °C o coeficiente de dilatação da água é negativo, isto é, o aumento de temperatura nessa faixa acarreta redução de volume. Por último, o aumento de temperatura provocará aumento da evaporação.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

7. (Enem) A Terra é cercada pelo vácuo espacial e, assim, ela só perde energia ao irradiá-la para o espaço. O aquecimento global que se verifica hoje decorre de pequeno desequilíbrio energético, de cerca de 0,3%, entre a energia que a Terra recebe do Sol e a energia irradiada a cada segundo, algo em torno de 1 W/m^2. Isso significa que a Terra acumula, anualmente, cerca de $1{,}6 \cdot 10^{22}$ J. Considere que a energia necessária para transformar 1 kg de gelo a 0 °C em água líquida seja igual a $3{,}2 \cdot 10^5$ J. Se toda a energia acumulada anualmente fosse usada para derreter o gelo nos polos (a 0 °C), a quantidade de gelo derretida anualmente, em trilhões de toneladas, estaria entre:

a) 20 e 40.
X b) 40 e 60.
c) 60 e 80.
d) 80 e 100.
e) 100 e 120.

8. (Enem) Em nosso planeta a quantidade de água está estimada em $1{,}36 \cdot 10^6$ trilhões de toneladas. Desse total, calcula-se que cerca de 95% são de água salgada e, dos 5% restantes, quase a metade está retida nos polos e geleiras. O uso de água do mar para obtenção de água potável ainda não é realidade em larga escala. Isso porque, entre outras razões:

X a) o custo dos processos tecnológicos de dessalinização é muito alto.
b) não se sabe como separar adequadamente os sais nela dissolvidos.
c) comprometeria muito a vida aquática dos oceanos.
d) a água do mar possui materiais irremovíveis.
e) a água salgada do mar tem temperatura de ebulição alta.

9. (Enem) Qual das seguintes fontes de produção de energia é a mais recomendável para a diminuição dos gases causadores do aquecimento global?

a) Óleo *diesel*.
b) Gasolina.
c) Carvão mineral.
d) Gás natural.
X e) Vento.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

6 A camada de ozônio

A chamada camada de ozônio (O_3) não contém somente esse gás (figura 5.28). Na verdade, nessa camada, a proporção de ozônio é de apenas algumas partes por milhão (ppm).

O ozônio é uma molécula que existe em toda a atmosfera. Na parte mais baixa, a troposfera, região entre o solo e 10 km de altura, sua concentração é relativamente baixa. Na estratosfera, que fica entre 10 e 50 km, a concentração de ozônio alcança seu máximo a aproximadamente 35 km. Com mais de 90% de todo o ozônio, podemos, arbitrariamente, definir essa região como a **camada de ozônio.**

O ozônio tem uma função muito importante: na atmosfera, ele é o único com a propriedade de absorver a radiação ultravioleta tipo *B* (UV-B) que vem do Sol e é prejudicial à vida humana, aos animais e às plantas. Essa camada absorve mais de 90% desse tipo de radiação. Níveis altos desse tipo de radiação têm ações mutagênicas, podem ser muito danosos e, em médio prazo, cancerígenos, principalmente pela sua ação sobre nossa pele.

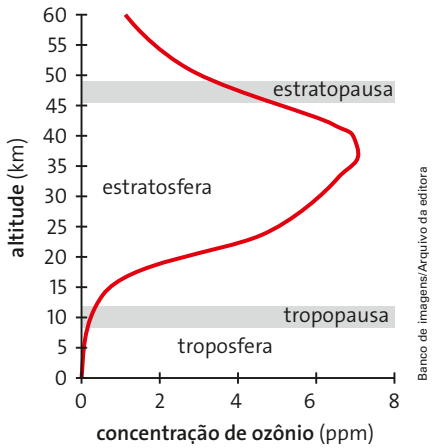
O monitoramento da concentração de ozônio em nossa atmosfera foi desenvolvido pelo meteorologista britânico G. M. Dobson (1889-1976), que inventou um tipo de espectrômetro capaz de fazer medições da concentração de ozônio na estratosfera a partir de aparelhos instalados no solo.

Entre 1928 e 1958, Dobson desenvolveu uma vasta rede desses aparelhos, espalhada por todo o planeta. Muitas dessas estações de monitoramento continuam operando até hoje. Em homenagem a esse cientista, foi criada a unidade Dobson (DU, no Brasil), um modo prático de comparar as concentrações de O_3 ao longo da coluna de ar que está acima do aparelho de medida.

Cada 100 unidades Dobson correspondem a aproximadamente 1 mm de espessura, com a camada concentrada ao nível do mar. Concentrações de ozônio na atmosfera abaixo de 220 DU são consideradas perigosas para a sobrevivência.

A concentração de ozônio tem dois efeitos sobre a temperatura da Terra: ao absorver a radiação ultravioleta, emite calor, aquecendo a estratosfera. Na baixa atmosfera (troposfera), atua como poluente: absorve a radiação infravermelha que vem do solo, contribuindo para o aquecimento da baixa atmosfera. Mas seu maior efeito está relacionado à radiação UV-B, que afeta diretamente a vida no planeta.

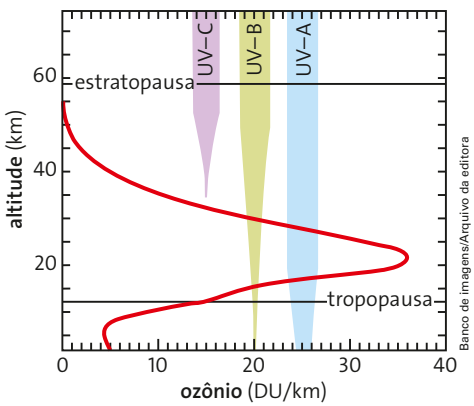
Concentração de ozônio na atmosfera



Fonte: Nasa. Disponível em: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/SH.html>. Acesso em: 6 jan. 2016.

Figura 5.28 Concentração de O_3 (em partes por milhão) na atmosfera, de acordo com a altitude.

Concentração de ozônio em função da temperatura



Fonte: IPCC: experimentos realizados pelo grupo GOME, de 1994 a 2003.

Figura 5.29 Concentração de O_3 (em unidade Dobson por quilômetro) na atmosfera, de acordo com a altitude.

Compare o gráfico da figura 5.29 com o gráfico da figura 5.28, considerando em ambos a altitude de 0 a 60 km, e observe como há uma correlação entre a concentração de O_3 (representada em DU/km) e as temperaturas nas camadas atmosféricas e a sua efetividade na absorção dos raios ultravioleta.

O tamanho total da coluna de ozônio geralmente cresce quando nos movemos da região tropical para altas latitudes nos dois hemisférios. Contudo, as concentrações nas altas latitudes do hemisfério norte são maiores do que no hemisfério sul, por diferenças nas circulações estratosféricas planetárias. Essas diferenças existem por causa, basicamente, da distribuição assimétrica da quantidade terra-mar de cada um dos hemisférios e outros fatores topográficos. Por exemplo, a calota polar do hemisfério norte é totalmente de gelo flutuante, o que não ocorre no hemisfério sul.

Exercício

10. Nossa pele é muito sensível à radiação ultravioleta. Algumas regiões são mais sensíveis que outras, por efeito cumulativo dessa radiação. Observe ao lado duas fotos simultâneas de uma mesma pessoa.
A imagem à direita foi feita com câmera comum, captando luz visível, e a da esquerda foi obtida com uma câmera especial, que capta a luz ultravioleta. Nesta, vemos regiões com várias manchas escuras, ou seja, que estão absorvendo mais e, portanto, refletindo menos.
Qual é a importância da camada de ozônio na preservação da vida na Terra?



Reprodução/<www.youtube.com/watch?v=o9BqrSAHbTc>

Proteção contra radiações eletromagnéticas nocivas à vida, principalmente a UV–B.

7 Poluição

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

A poluição do ambiente é um fenômeno decorrente principalmente da atividade humana em vários aspectos, entre os quais podemos destacar:

- rápido crescimento populacional, industrial e econômico;
- concentração populacional e industrial;
- hábitos da população.

Nossos três recursos naturais básicos – solo, ar e água –, no passado, eram capazes de diluir, a concentrações aceitáveis, as substâncias neles lançadas por processos naturais normais em processos cíclicos. Contudo, as emissões antropogênicas começam a ameaçar nosso planeta pelo esgotamento dessa capacidade de autodepuração, particularmente no último século.

Poluição atmosférica

A poluição atmosférica refere-se ao lançamento de substâncias no ar que podem trazer efeitos nocivos à saúde humana, danos aos recursos naturais, aos seres vivos e aos ecossistemas.

O grau de poluição das substâncias poluentes depende da sua composição química, da concentração na massa de ar, ou mesmo das condições climáticas, que podem influenciar a sua dissipação ou os mecanismos de reação que dão origem a novos poluentes.

Combustão dos hidrocarbonetos

A grande maioria dos motores de automóveis, motocicletas, navios e das usinas termelétricas utiliza hidrocarbonetos – como combustível – e oxigênio do ar – como comburente – para ocorrência da reação química que libera grande quantidade de calor, fornecendo a energia necessária para o funcionamento desses motores. Na combustão, são lançados na atmosfera dióxido de carbono e vapor de água. Em alguns casos, também pode ocorrer o lançamento do carbono puro (fuligem) na atmosfera.

Órgãos governamentais, como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), por exemplo, impõem determinados limites às emissões de poluentes, mas é comum a circulação de veículos desregulados, deixando para trás uma densa fumaça escura, principalmente alguns caminhões (figura 5.30). O que eles ganham com isso? Um pouco mais de potência, sacrificando o rendimento e a qualidade do ar.



Blickwinkel/Alamy/Other Images

Figura 5.30 Fumaça densa emitida por veículo desregulado.

Principais poluentes atmosféricos

Existem níveis de referência para diferenciar a atmosfera poluída da atmosfera não poluída. O nível de referência sob o aspecto legal é denominado **Padrão de Qualidade do Ar**.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), pertencente ao Ministério do Meio Ambiente, por meio da Resolução Conama n. 3, de 28 de junho de 1990, descreve os padrões para todo o território nacional.

Os poluentes considerados foram: partículas totais em suspensão (PTS), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3), fumaça, partículas inaláveis e dióxido de nitrogênio (NO_2). Foram estabelecidos **Padrões Primários**, destinados à proteção da saúde púbica, e **Padrões Secundários**, para proteção do meio ambiente em geral e do bem-estar da população, bem como os métodos de referência a ser utilizados nas medições.

Entre as fontes antropogênicas de poluição do ar, podemos destacar os processos e operações industriais, a queima de combustíveis, as queimadas e a incineração de lixo. Alguns tipos de indústrias caracterizam-se pela emissão principalmente de **material particulado** (MP), como a mineração. Outras, pela emissão de gases e vapores, como as indústrias químicas e petroquímicas (figura 5.31).

Os efeitos da poluição do ar caracterizam-se tanto pela alteração de condições consideradas normais como pelo aumento de problemas já existentes. Os efeitos podem ocorrer em nível local, regional e global. Esses efeitos podem se manifestar na saúde, no bem-estar da população, na fauna e na flora, sobre os materiais, sobre as propriedades da atmosfera (efeito estufa, chuva ácida), etc.

Material particulado – Partículas sólidas ou líquidas emitidas por fontes de poluição do ar ou mesmo as formadas na atmosfera, como as partículas de sulfato. Quando dispersas no ar, formam os chamados aerossóis.



Paulo Fridman/Pulsar Imagens

Figura 5.31 A indústria petroquímica é responsável pela produção de derivados do petróleo. Polo industrial em Camaçari (BA), 2015.

Trabalho em equipe

Façam uma pesquisa, sob orientação do professor, e apresentem um painel com os seguintes poluentes atmosféricos: monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2) e dióxido de nitrogênio (NO_2). Solicitem a participação do professor de Química. Não deixem de destacar os problemas causados por esses poluentes na saúde das pessoas e dos animais em geral.

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

Qualidade do ar

Cada poluente medido recebe um índice e, por meio do resultado obtido, o ar recebe uma qualificação. A tabela a seguir apresenta a classificação dos seguintes poluentes: partículas inaláveis (MP_{10}), Ozônio (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO_2) e dióxido de enxofre (SO_2). Os dados são disponibilizados em micrograma por metro cúbico e em parte por milhão.

Padrões de qualidade de ar

Qualidade	Índice	MP_{10} ($\mu g/m^3$) 24 h	O_3 ($\mu g/m^3$) 8 h	CO (ppm) 8 h	NO_2 ($\mu g/m^3$) 1 h	SO_2 ($\mu g/m^3$) 24 h
boa	0-40	0-50	0-100	0-9	0-200	0-20
moderada	41-80	>50-100	>100-130	>9-11	>200-240	>20-40
ruim	81-120	>100-150	>130-160	>11-13	>240-320	>40-365
muito ruim	121-200	>150-250	>160-200	>13-15	>320-1130	>365-800
péssima	> 200	> 250	> 200	> 15	>1130	> 800

Fonte: Cetesb. Disponível em: <ar.cetesb.sp.gov.br/padrões-de-qualidade-do-ar>. Acesso em: 7 jan. 2016.

Para a simplicidade na divulgação da análise, se utiliza o pior caso. A qualificação do ar está associada aos efeitos sobre a saúde, independentemente do poluente em estudo, conforme a tabela a seguir.

Qualidade do ar e seus efeitos na saúde

Qualidade	Índice	Significado
boa	0-40	Praticamente não há riscos à saúde.
regular	51-80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
inadequada	81-120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem manifestar problemas mais sérios de saúde.
má	121-200	Toda a população pode apresentar agravamento de sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda ter falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
péssima	> 200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de morte prematura em grupos de pessoas mais sensíveis.

Fonte: Cetesb. Disponível em: <ar.cetesb.sp.gov.br/padrões-de-qualidade-do-ar>. Acesso em: 7 jan. 2016.

Cada poluente apresenta diferentes efeitos **sobre a saúde** da população para faixas de concentração distintas, identificados por estudos epidemiológicos desenvolvidos dentro e fora do país. Tais efeitos sobre a saúde requerem **medidas de prevenção** a serem adotadas pela população afetada.

Inversão térmica

Nos primeiros 10 km da atmosfera, normalmente, o ar vai se resfriando à medida que nos distanciamos da superfície da Terra. Assim, o ar mais próximo à superfície, que é mais quente – portanto, mais leve –, pode elevar-se, favorecendo a dispersão dos poluentes emitidos pelas fontes.

A **inversão térmica** é uma condição meteorológica que ocorre quando uma camada de ar quente se sobrepõe a uma camada de ar frio, impedindo o movimento ascendente do ar, uma vez que o ar abaixo dessa camada fica mais frio – portanto, mais pesado –, fazendo com que os poluentes se mantenham próximos da superfície (figura 5.32).



Mauricio Simonetti/Pulsar Imagens

Figura 5.32 A camada cinza que vemos na foto é produto da inversão térmica, que impede que os poluentes se dispersem. São Paulo (SP), 2015.

Tal fenômeno meteorológico ocorre durante todo o ano, sendo mais comum no inverno, principalmente no período noturno. Em um ambiente com um grande número de indústrias e de circulação de veículos, como o das cidades, a inversão térmica pode levar a altas concentrações de poluentes, podendo ocasionar problemas de saúde.

Chuva ácida

Mesmo antes da Revolução Industrial, havia dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, mas não nas concentrações atuais. Esse gás, em contato com a água, pode acarretar uma reação na qual é produzido um ácido fraco:

$$CO_2\,(g) + 2\,H_2O\,(\ell) \rightarrow 2\,H_2CO_3\,(aq)$$

Por isso a chuva que conhecemos é levemente ácida. No entanto, tanto o SO_2 quanto os óxidos nitrosos podem produzir ácidos muito mais fortes, como o nítrico e o sulfúrico, em uma sequência de reações. Esse é outro efeito poluente desses gases que resulta na chamada **chuva ácida**, uma chuva muito mais ácida que a normal.

Os efeitos desse tipo de chuva vão desde a contaminação do solo, danos aos seres vivos em geral, até a corrosão erosiva de monumentos e fachadas de edifícios (figura 5.33).



Alexandre Tokitaka/Pulsar Imagens

Figura 5.33 Estátua localizada em uma cidade com grande incidência de chuva ácida.

Poluição das águas e dos solos

Nas regiões agrícolas, o solo pode ser contaminado pelo acúmulo de materiais tóxicos, provenientes dos fertilizantes químicos e dos agrotóxicos, e pelos resíduos das áreas industriais transportados pelas chuvas ácidas. Esses resíduos, carregados pelas enxurradas, vão poluir os rios e os lagos, chegando a atingir o subsolo e os lençóis de água subterrâneos por meio da infiltração.

Os agrotóxicos são produtos químicos empregados no combate a certos microrganismos, insetos e fungos, principalmente na agricultura. São pesticidas, inseticidas, fungicidas e herbicidas que, aplicados sobre as plantas, geralmente em doses excessivas, podem contaminar os alimentos com substâncias nocivas à saúde. Apesar de eliminarem algumas pragas, geralmente estimulam a resistência e o surgimento de outras, e sua utilização nas lavouras usualmente requer a aplicação contínua de cada vez mais agrotóxicos. Com as chuvas, as substâncias tóxicas são carregadas para os córregos, rios e lagos, contaminando as águas, envenenando os peixes e prejudicando todo o ecossistema aquático.

O lançamento de esgotos domésticos e industriais sem tratamento é uma das principais causas da poluição de lagos, canais, rios e mares. Substâncias espumantes não biodegradáveis, excesso de dejetos orgânicos em suspensão (responsáveis pela proliferação de microrganismos patogênicos) e de resíduos industriais contendo metais pesados, que se acumulam nos organismos vivos (como mercúrio, chumbo e cádmio), provocam a degradação da qualidade das águas ao redor das grandes cidades e dos centros industriais.

O lixo é outro grande problema. Muitas pessoas jogam diretamente o lixo em córregos que alimentariam mananciais de abastecimento para água potável (**figura 5.34**).

Atualmente, é cada vez maior na sociedade a consciência de que papel, vidro, metais e plásticos podem e devem ser reciclados. O lixo orgânico pode ser usado em biodigestores.

Juca Varella/Folhapress

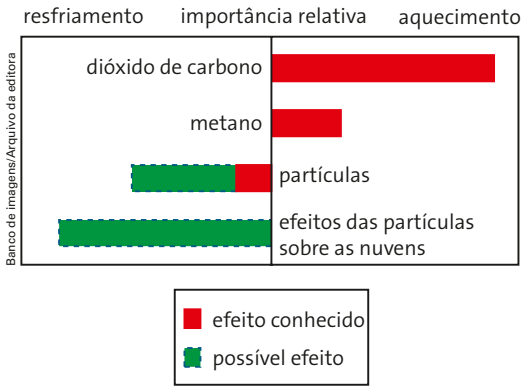


Figura 5.34 Lixo acumulado no rio Pinheiros, em São Paulo (SP), 2014. O que se pode pescar nele?

Exercícios

11. (Pisa-Inep)

A queima de carvão, óleo e gás natural, assim como o desflorestamento e várias atividades agrícolas e industriais estão alterando a composição da atmosfera e contribuindo para a mudança climática. Estas atividades humanas têm levado a um aumento na concentração de partículas e gases na atmosfera (efeito estufa). A importância relativa dos principais fatores que contribuem para a mudança de temperatura é mostrada na figura a seguir. O aumento nas concentrações de dióxido de carbono e metano tem um efeito aquecedor. Um aumento nas concentrações de partículas tem um efeito resfriador que age de duas maneiras, chamados no esquema de "partículas" e "efeito das partículas sobre as nuvens".



Banco de imagens/Arquivo da editora

Importância relativa dos principais fatores responsáveis pela mudança de temperatura na atmosfera.

As barras estendendo-se para a direita da linha central indicam um efeito de aquecimento. As da esquerda da linha central indicam um efeito de resfriamento. O efeito relativo das "partículas" e "efeito das partículas nas nuvens" são um tanto incertos: em cada caso o efeito está em algum lugar no intervalo mostrado pela última barra.

Use a informação da figura apresentada no texto para desenvolver um argumento a favor da redução de dióxido de carbono emitido quando das atividades humanas mencionadas. O aumento de CO_2 contribui para o aquecimento global.

Ainda sobre o texto acima, responda às questões 12 a 14.

12. Quais são os principais poluentes decorrentes da queima dos hidrocarbonetos? CO, CO_2, óxidos nitrosos e sulfurosos e material particulado (fuligem de carbono).

13. Que fatores contribuem para a combustão incompleta dos hidrocarbonetos? O que pode ser feito para diminuir esse mau aproveitamento do combustível?

Misturas com mais O_2 e combustões mais lentas.

14. Por que nos grandes centros urbanos o fenômeno da inversão térmica reduz significativamente o índice da qualidade do ar?

Por dificultar a dispersão dos poluentes.

15. (Pisa-Inep)

Abaixo, temos uma foto das estátuas chamadas cariátides, que foram construídas na Acrópole, em Atenas, há mais de 2 500 anos. As estátuas são feitas de mármore, um tipo de rocha composta de carbonato de cálcio.



Alvis Upitis/Alamy/Other Images

Em 1980, as estátuas originais foram transferidas para dentro do museu da Acrópole e substituídas por réplicas. As estátuas originais estavam sendo corroídas pela chuva ácida.

A chuva normal é ligeiramente ácida, porque contém dissolvido um pouco de dióxido de carbono do ar. A chuva ácida é muito mais ácida do que a chuva normal, porque absorve gases como óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio. De onde provêm esses óxidos de enxofre e de nitrogênio encontrados no ar?

Queima de combustíveis fósseis e gases vulcânicos.

Ainda sobre o texto anterior, responda à questão 16.

16. É possível simular o efeito da chuva ácida no mármore colocando-se lascas de mármore no vinagre durante uma noite. O vinagre e a chuva ácida têm quase o mesmo nível de acidez. Quando uma lasca de mármore é colocada no vinagre, formam-se bolhas de gás. Pode-se determinar a massa da lasca de mármore seca, antes e depois da experiência. Uma lasca de mármore tem uma massa de 2 g antes de ficar imersa no vinagre durante uma noite. No dia seguinte, a lasca é retirada e seca. Qual seria a massa da lasca de mármore após a secagem?

X a) Menos de 2 gramas.
b) Exatamente 2 gramas.
c) Entre 2 e 2,4 gramas.
d) Mais de 2,4 gramas.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

8 Biocombustíveis e usina nuclear

Seria possível captar o CO_2 do ar, emitido pela queima de um combustível, e transformá-lo novamente em combustível utilizando somente energia solar?

A resposta é sim. As plantas, no processo conhecido como fotossíntese, "alimentam-se" do CO_2 atmosférico e, sob a ação energética da radiação solar, produzem glicose.

Com esse processo, três grandes fatores positivos acontecem simultaneamente. A fotossíntese reduz gases estufa, vapor de água e dióxido de carbono, ao mesmo tempo que aumenta a oferta de O_2. É quase como uma reação de combustão acontecendo ao contrário.

Depois disso, a glicose passa por um processo de fermentação e esse fermentado é destilado para finalmente obter-se o biocombustível.

Os biocombustíveis são fontes de energia renováveis que têm aumentado a produtividade das usinas de *biodiesel* e etanol a cada ano, mas que também, como todos os combustíveis de combustão, libera CO_2 na atmosfera. Além disso, o rendimento dos motores a álcool é ligeiramente superior ao dos motores a gasolina, pois podem trabalhar com taxas de compressão maiores.

Marcos Amend/Pulsar Imagens



Figura 5.35 O uso de combustíveis alternativos, como o etanol, fez com que crescesse a cultura da cana-de-açúcar. Canavial em Ibaté (SP), 2015.

Uma desvantagem dessa forma de energia apontada por alguns críticos é que as áreas cultivadas de cana-de-açúcar (**figura 5.35**) vêm ocupando terrenos em que antes eram cultivados produtos alimentícios, o que pode encarecer o preço dos alimentos. Essa é uma verdade parcial. Só seria verdade mesmo se toda região cultivável do planeta já estivesse plenamente aproveitada. A cana-de-açúcar tem características próprias que lhe permitem crescer em terras onde outras culturas não vingariam, muitas vezes, pela alta insolação e qualidade do solo, o mesmo acontecendo com muitos vegetais usados na produção do *biodiesel*, como a soja, o girassol, o amendoim, o algodão, a canola (colza), o babaçu, o dendê, o pinhão manso, a mamona (**figura 5.36**), o nabo forrageiro, entre outros, e também gordura animal.

Embora seja um processo muito mais elaborado do que fazer um simples buraco no chão e esperar o jorro do petróleo, os custos de produção dos biocombustíveis estão cada vez mais competitivos em relação aos combustíveis fósseis e podem se tornar a alternativa para o futuro.

Mario Friedlander/Pulsar Imagens



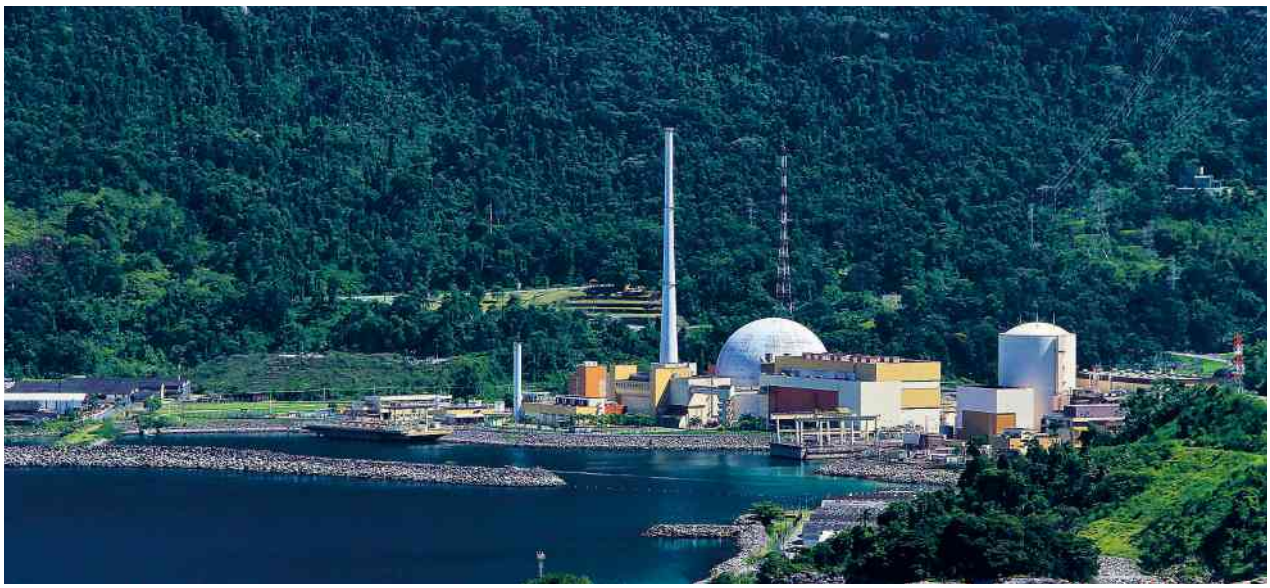
Figura 5.36 Para a produção do *biodiesel*, pode-se utilizar a mamona (*Ricinus communis L.*).

Usina nuclear

Atualmente, todas as centrais nucleares de produção de energia elétrica no mundo utilizam a **fissão nuclear**. O processo de fissão nuclear do urânio enriquecido libera calor, mas não produz CO_2, CO ou, ainda, fuligem de carbono, nem óxidos nitrosos.

Fissão nuclear – Reação em que um núcleo se fragmenta liberando grande quantidade de energia.

Comparadas às toneladas desses poluentes que as usinas termoelétricas lançam na atmosfera, as usinas nucleares são extremamente limpas. O fato de terem de usar as águas de um lago, rio ou baía para refrigeração (figura 5.37) não pode ser apontado como desvantagem, pois as termelétricas também utilizam refrigeração, mas contribuem para o efeito estufa.



Jose Roberto Couto/Tyba

Figura 5.37 Na imagem, é possível ver a água usada para a refrigeração das usinas nucleares Angra 1 e Angra 2 – Centro Nuclear Almirante Álvaro Alberto. Angra dos Reis (RJ), 2012.

Um dos graves problemas das usinas nucleares são os chamados **rejeitos radioativos** (figura 5.38) que são formados nas reações de fissão. O plutônio é um deles: pode ser usado como combustível nuclear em outro tipo de usina, que também deixará rejeitos radioativos, que poderão ainda ser usados em outras usinas, em um esquema de máximo aproveitamento em cadeia, como fazem diferentes tipos de reatores na França.



Luciana Whitaker/Pulsar Imagens

Figura 5.38 Um problema a ser resolvido no processo de fissão nuclear é o rejeito nuclear, que é formado por resíduos com elementos radioativos.

Radioativo – Um elemento radioativo irradia ondas eletromagnéticas ou partículas que provêm da desintegração espontânea do núcleo atômico.

O plutônio pode ser utilizado também para produção de armas nucleares, e essa é a maior preocupação dos órgãos internacionais de paz em relação a programas nucleares de alguns países. De certa forma, o plutônio é o lixo mais caro do mundo, dada a quantidade de energia que cada quilograma desse elemento pode liberar.

Contudo, o lixo nuclear não é só constituído de plutônio. Todo material do vaso de contenção da reação em cadeia (tubulações primárias, barras de controle) tornam-se, com o decorrer do uso, **radioativos** também. E assim ficarão por centenas de anos. Onde colocar esses dejetos quando a usina for desativada ou reformada?

Por enquanto, uma das alternativas tem sido colocá-los em áreas bastante desertas, em poços profundos e acondicionados em recipientes com espessas paredes de chumbo.

Um acidente em usina nuclear de fissão pode espalhar poluentes radioativos por centenas de quilômetros, como aconteceu em Chernobyl, na Ucrânia, em 1986. Apesar de hoje em dia esse risco ser muito baixo, considerando a rigorosa supervisão dos órgãos de controle e o aumento das medidas de prevenção, a Itália desativou todas as suas usinas nucleares e o Parlamento Alemão deliberou que todas as centrais nucleares daquele país sejam desativadas até 2021.

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercícios

17. Um motorista alega que prefere usar carro a álcool porque ele não emite CO_2. É correta essa afirmação? Justifique. Não. A combustão gera o CO_2, embora ele seja reabsorvido no crescimento da cana.

18. (Enem) Um problema ainda não resolvido da geração nuclear de eletricidade é a destinação dos rejeitos radiativos, o chamado "lixo atômico". Os rejeitos mais ativos ficam por um período em piscinas de aço inoxidável nas próprias usinas antes de ser, como os demais rejeitos, acondicionados em tambores que são dispostos em áreas cercadas ou encerrados em depósitos subterrâneos secos, como antigas minas de sal. A complexidade do problema do lixo atômico, comparativamente a outros lixos com substâncias tóxicas, se deve ao fato de:

X a) emitir radiações nocivas, por milhares de anos, em um processo que não tem como ser interrompido artificialmente.
b) acumular-se em quantidades bem maiores do que o lixo industrial convencional, faltando assim locais para reunir tanto material.
c) ser constituído de materiais orgânicos que podem contaminar muitas espécies vivas, incluindo os próprios seres humanos.
d) exalar continuamente gases venenosos, que tornariam o ar irrespirável por milhares de anos.
e) emitir radiações e gases que podem destruir a camada de ozônio e agravar o efeito estufa.

19. (Enem) O debate em torno do uso da energia nuclear para produção de eletricidade permanece atual. Em um encontro internacional para a discussão desse tema, foram colocados os seguintes argumentos:

I. Uma grande vantagem das usinas nucleares é o fato de não contribuírem para o aumento do efeito estufa, uma vez que o urânio, utilizado como "combustível", não é queimado, mas sofre fissão.

II. Ainda que sejam raros os acidentes com usinas nucleares, seus efeitos podem ser tão graves que essa alternativa de geração de eletricidade não nos permite ficar tranquilos.

A respeito desses argumentos, pode-se afirmar que:

a) o primeiro é válido e o segundo não é, já que nunca ocorreram acidentes com usinas nucleares.
b) o segundo é válido e o primeiro não é, pois de fato há queima de combustível na geração nuclear de eletricidade.
c) o segundo é válido e o primeiro é irrelevante, pois nenhuma forma de gerar eletricidade produz gases do efeito estufa.
X d) ambos são válidos para se compararem vantagens e riscos na opção por essa forma de geração de energia.
e) ambos são irrelevantes, pois a opção pela energia nuclear está se tornando uma necessidade inquestionável.

O mundo sustentável

A consciência de que são necessárias medidas de controle e mudanças de hábitos de consumo para garantir um planeta habitável, limpo e com boa qualidade de vida para todos é hoje praticamente universal.

Por exemplo, todos os automóveis fabricados hoje saem de fábrica com um dispositivo chamado catalisador, que reduz significativamente a emissão de poluentes.

Representantes de várias nações do mundo negociaram em 1997, na cidade de Kyoto, no Japão, um acordo internacional no qual se comprometem a controlar as emissões de poluentes, cumprindo um calendário de redução.

O Protocolo de Kyoto propõe aos países signatários algumas ações básicas, como:

- reformar os setores de energia e transportes;
- promover o uso de fontes energéticas renováveis;
- limitar as emissões de metano no processamento de resíduos;
- proteger florestas e outros absorvedores de carbono.

Esse protocolo revela uma esperança e um compromisso mundial para a construção de um mundo sustentável.

Nem todos os países do mundo assinaram o protocolo. Os Estados Unidos, por exemplo, assinaram, mas não ratificaram.

Um dos entraves para modificação e redução dos hábitos de consumo é o impacto econômico. Menos consumo, menos produção, mais desemprego. O sistema econômico terá que se irmanar à causa ambiental, abrindo oportunidades de trabalho em outras áreas, como educação, esportes, turismo e lazer.

> O jornalismo ambiental quebra o dogma da imparcialidade, tão propalada e discutida nos cursos de comunicação, ao tomar partido em favor da sustentabilidade, do uso racional dos recursos naturais, do equilíbrio que deve reger as relações do homem com a natureza, do transporte coletivo, da energia limpa, dos três Rs do lixo (reduzir, reutilizar e reciclar) e de tudo aquilo que remeta à ideia de um novo modelo de civilização que não seja predatório e suicida, em que o lucro de poucos ainda ameaça a qualidade de vida de muitos e os interesses dos consumidores se sobrepõem aos interesses dos cidadãos. Quando essas ideias justificarem atitudes que se multipliquem pelo mundo inspirando a construção de uma nova civilização, um novo paradigma, talvez não exista mais a necessidade de existirem ambientalistas, assim como os abolicionistas deixaram de existir com o fim da escravidão.
>
> TRIGUEIRO, André. *Mundo sustentável*. São Paulo: Globo, 2005.
> Disponível em: <www.mundosustentavel.com.br/>. Acesso em: out. 2015.

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercício

20. A preocupação com a reciclagem de produtos não é simplesmente pela escassez de matéria-prima. É também com as grandes quantidades de energia que são utilizadas na obtenção delas e de poluentes decorrentes de alguns processos industriais de refino. O alumínio, por exemplo, para ser obtido, demanda grande consumo de energia elétrica, que poderia ser mais bem aproveitada em outros setores. Pesquise e aponte pelo menos três materiais que podem ser reciclados.

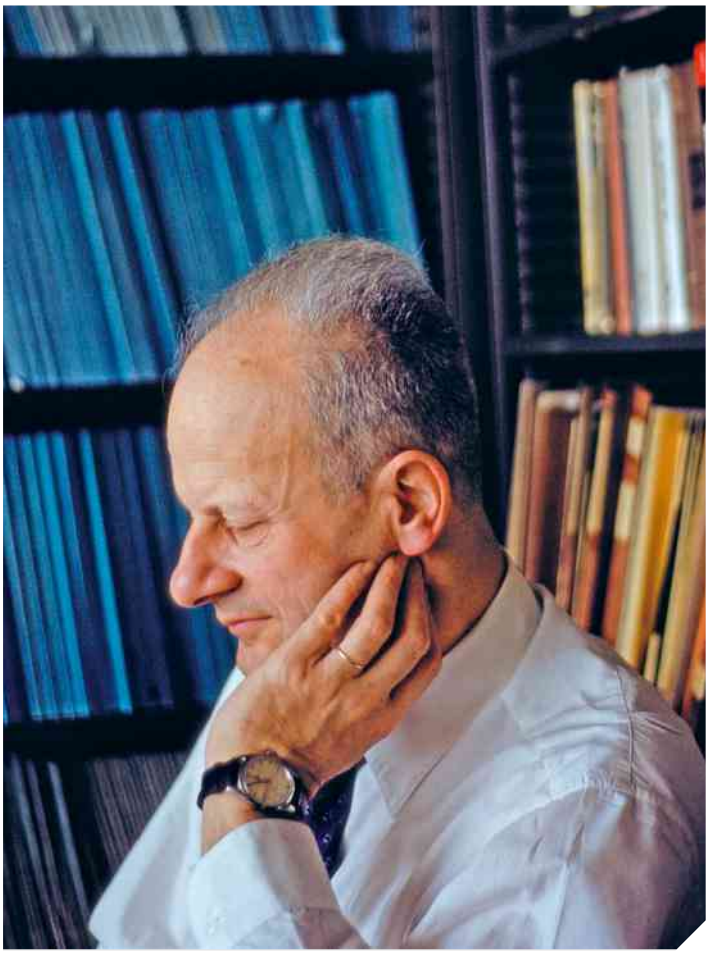
Reciclagem do papel, que reduz a quantidade de árvores derrubadas para sua produção. Reciclagem de alumínio, vidros e baterias. Aproveitamento do lixo orgânico na produção de gás.

Em construção

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

Hans Bethe



Marvin Koner/Corbis/Latinstock

Fotografia de Hans Bethe (1906-2005).

Hans Bethe nasceu em Estrasburgo, na época território alemão, mas hoje pertencente à França. Seu pai era médico; e sua mãe, filha de um professor da Faculdade de Medicina local.

Bethe foi o primeiro a equacionar a energia liberada nas reações de fusão do hidrogênio que ocorrem no Sol, desvendando o mistério da origem da energia do Astro Rei em 1938, trabalho que lhe deu o Prêmio Nobel 29 anos depois. Seu trabalho teórico estava muito além das possibilidades experimentais da época para a verificação dos resultados.

Seu entusiasmo com a matemática já se manifestava desde os 4 anos, quando, segundo relato dos pais, já extraía a raiz quadrada de vários números. Aos 14 anos, com acesso à biblioteca da universidade, aprendeu por conta própria Cálculo Integral e Diferencial. Depois de completar o Ensino Médio, ingressou na Universidade de Frankfurt para estudar Física Teórica. Terminada a graduação, começou a estudar sob a orientação do então lendário físico Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) e, em 1928, completou seu doutorado com distinção, com uma tese sobre difração de elétrons em cristais, trabalho que seria aprofundado por George. P. Thomson (1892-1975) para mostrar o comportamento ondulatório dos elétrons. Após estudos em Cambridge e Roma, onde estudou com Enrico Fermi (1901-1954), retornou à Alemanha para a Universidade de Tübingen, como professor.

Com a ascensão do nazismo em 1933, Hans perdeu seu posto na universidade em razão da origem judia de sua mãe. Convidado a integrar o corpo docente da Universidade de Cornell, no estado de Nova York, Estados Unidos, lá permaneceu até o fim de sua vida acadêmica.

Em 1938, Hans apresentou seu trabalho sobre a energia das estrelas em uma conferência de Washington, mas a coroação veio mesmo com a publicação de seu artigo sobre como as estrelas brilham na *Physical Review*. Mesmo após os 90 anos, Hans Bethe permaneceu ativo até o fim de seus dias, dedicando-se a publicações em periódicos de Física, palestras e orientações de estudantes.

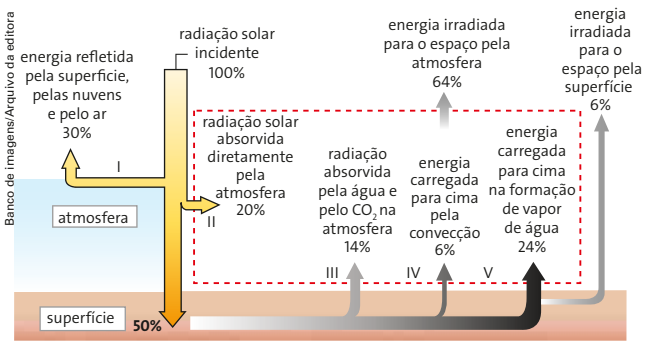
UNIVERSIDADE de St. Andrews. *Hans Albrecht Bethe's Biography*. Disponível em: <www-history.mcs.st- and.ac.uk/Biographies/Bethe.html>. Acesso em: out. 2015. Texto traduzido.

- Faça uma pesquisa sobre o processo de fusão de hidrogênio que ocorre no Sol.

Retomando

Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resolução dos exercícios deste capítulo.

21. (Enem) O diagrama abaixo representa, de forma esquemática e simplificada, a distribuição da energia proveniente do Sol sobre a atmosfera e a superfície terrestre. Na área delimitada pela linha tracejada, são destacados alguns processos envolvidos no fluxo de energia na atmosfera.

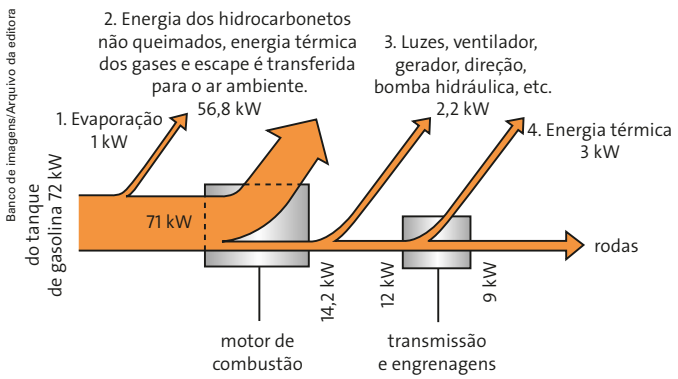


Fonte: SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. *Princípios de Física*. São Paulo: Pioneira Thomsom, v. 2, fig. 18.12 (com adaptações).

A chuva é o fenômeno natural responsável pela manutenção dos níveis adequados de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas. Esse fenômeno, assim como todo o ciclo hidrológico, depende muito da energia solar. Dos processos numerados no diagrama, aquele que se relaciona mais diretamente com o nível dos reservatórios de usinas hidrelétricas é o de número:

a) I. b) II. c) III. d) IV. X e) V.

22. (Enem) O esquema abaixo mostra, em termos de potência (energia/tempo), aproximadamente, o fluxo de energia, a partir de uma certa quantidade de combustível vinda do tanque de gasolina, em um carro viajando com velocidade constante.



O esquema mostra que, na queima da gasolina, no motor de combustão, uma parte considerável de sua energia é dissipada. Essa perda é da ordem de:

X a) 80%. b) 70%. c) 50%. d) 30%. e) 20%.

23. (Enem) Em usinas hidrelétricas, a queda-d'água move turbinas que acionam geradores. Em usinas eólicas, os geradores são acionados por hélices movidas pelo vento. Na conversão direta solar-elétrica são células fotovoltaicas que produzem tensão elétrica. Além de todos produzirem eletricidade, esses processos têm em comum o fato de:

X a) não provocarem impacto ambiental.
b) independerem de condições climáticas.
c) a energia gerada poder ser armazenada.
d) utilizarem fontes renováveis.
e) dependerem das reservas de combustíveis fósseis.

UNIDADE 3

Ondulatória

CAPÍTULO 6

Ondas mecânicas

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

Kelly Cestari/World Surf League/Getty Images



O brasileiro Gabriel Medina surfando em campeonato na Polinésia Francesa, em 2015.

Os sons nos permitem a comunicação; as nossas orelhas captam ondas sonoras das mais diversas fontes; os nossos olhos são sensibilizados por ondas luminosas que nos proporcionam uma visão em cores; o rádio, a televisão, a internet e o telefone nos colocam em sintonia com todos os pontos do planeta; tudo isso graças à energia transportada pelas ondas.
O que dizer do prazer de um surfista ao pegar uma onda?

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Movimentos oscilatórios

Observe as figuras 6.1, 6.2 e 6.3.



Kts Design/Shutterstock/Glow Images

Figura 6.1 Beija-flor planando no ar.



Luciana Whitaker/Pulsar Imagens

Figura 6.2 Criança em um balanço.



Seleznev Valery/Shutterstock/Glow Images

Figura 6.3 Pêndulo de relógio de parede.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

O que essas três fotos apresentam em comum? Em todas elas, ocorre um **movimento oscilatório**, ou seja, algo oscila para cima e para baixo, para a frente e para trás, ou, ainda, para a direita e para a esquerda.

Na natureza, encontramos uma infinidade de movimentos oscilatórios. A nossa audição, a nossa visão, e também a nossa fala, são frutos de fenômenos oscilatórios. Uma oscilação pode ser constituída por um único pulso, como no caso da ola, na qual as pessoas se levantam com os braços erguidos e se sentam em seguida, fazendo um movimento em conjunto que evolui como as ondas do mar. A revista *Nature* (set. 2002) registrou um estudo dos pesquisadores húngaros Illés Farkas e Tamás Vicsek sobre a ola (figura 6.4).



Delfim Martins/Pulsar Imagens

Figura 6.4 A velocidade dessas ondas é de aproximadamente 43 km/h, varrendo cerca de 20 assentos por segundo, normalmente no sentido horário em relação ao estádio. Brasília (DF), 2013.

Mas as pessoas podem efetuar o movimento de levantar e sentar repetidas vezes. Nesse caso, a oscilação será constituída de vários pulsos. É o que ocorre, por exemplo, com as asas do beija-flor (figura 6.1), a criança no balanço (figura 6.2) e o pêndulo do relógio (figura 6.3).

De modo geral, as oscilações são caracterizadas pelo movimento de vaivém de um ponto em relação a uma posição de equilíbrio. Na Física, dois exemplos merecem destaque: o movimento oscilatório de um corpo suspenso por um fio, conhecido como **pêndulo simples**, e as oscilações de um corpo preso a uma mola, conhecido como **sistema massa-mola**.

Pêndulo simples

Um pêndulo simples é um dispositivo constituído por um corpo preso à extremidade de um fio fixado verticalmente e que oscila em torno de uma posição de equilíbrio, como o pêndulo do relógio mostrado na **figura 6.3**.

O movimento do pêndulo simples é causado pela força gravitacional, conhecida como força peso do corpo suspenso pelo fio. Uma vez deslocado de sua posição de equilíbrio (ponto *O* na **figura 6.5**) e solto, o corpo oscila, transformando energia potencial gravitacional em cinética, e vice-versa. Na ausência de atrito, o sistema pendular é conservativo, ou seja, as oscilações duram para sempre.

Com as leis de Newton é possível mostrar que o **período** do pêndulo – tempo para uma oscilação completa (ida e volta) – não depende da massa oscilante e nem da extensão do arco descrito pelo pêndulo, desde que o arco não seja muito grande (com um ângulo máximo de 30°).

O período está relacionado diretamente ao comprimento do fio que mantém o corpo suspenso. Quanto maior o comprimento do fio, maior o período de oscilação. Outro fator que influi no período do pêndulo é o local em que o corpo é colocado para oscilar. Isso se traduz em uma dependência entre o período e a aceleração da gravidade no local do experimento. Quanto maior a aceleração da gravidade, menor o período do pêndulo.

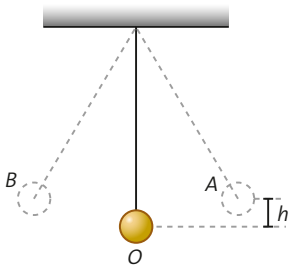
As observações de Galileu motivaram estudos que permitiram estabelecer a dependência do período *T* com o comprimento do fio ℓ e com a aceleração da gravidade no local *g* do experimento, expressa pela relação:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

Nessa expressão, *T* (período do pêndulo) é dado em segundos (s) se ℓ (comprimento do fio) for medido em metros (m) e *g* (aceleração da gravidade) em m/s².

Veja respostas no Manual do Professor.

Para refletir
Qual o ponto da trajetória do pêndulo em que a energia potencial gravitacional é máxima? E em qual ponto a energia cinética é máxima?



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.5 O ponto *O* representa a posição de equilíbrio e os pontos *A* e *B* são os extremos da oscilação.

Física tem História

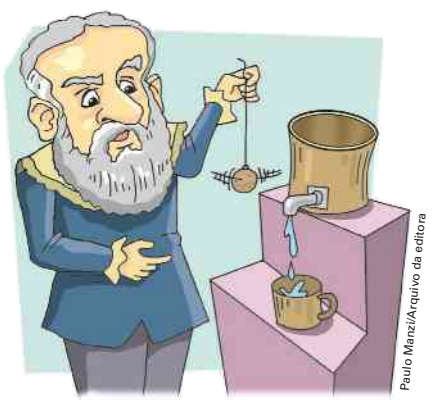
Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

Galileu e o pêndulo

Há uma versão histórica segundo a qual Galileu Galilei (1564-1642), como fervoroso católico, assistia à missa todos os domingos na catedral de Pisa, na Itália.

Em uma das vezes, em razão de uma corrente de ar, Galileu observou um candelabro que oscilava levemente. Ele constatou que, embora as oscilações do candelabro fossem cada vez menores, o tempo de cada oscilação era praticamente o mesmo.

Galileu teria usado as batidas do coração como medida de tempo. Posteriormente, ele realizou experimentos com pêndulos constituídos por uma esfera e um barbante, utilizando um relógio de água, e descobriu que o tempo para uma oscilação completa é sempre o mesmo, independentemente da massa da esfera e da amplitude de oscilação, desde que o comprimento do barbante, mesmo em pêndulos diferentes, seja sempre o mesmo.


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Representação artística de um experimento realizado por Galileu.

Física explica

Veja comentários e resposta desta seção no Manual do Professor.

O pêndulo de Foucault

[...] Em 19 de fevereiro de 1600, a Inquisição trouxe o monge e professor italiano Giordano Bruno (1548-1600) acorrentado ao Campo dei Fiori, no centro de Roma, amarrou-o a uma estaca de ferro e queimou-o vivo. Um dos crimes de Bruno foi acreditar que a Terra girava. Um terço de século mais tarde, Galileu foi processado, em Roma, pela mesma Inquisição. Ameaçado de tortura, humilhado, forçado a se ajoelhar ante seus acusadores, o grande cientista que descobrira as luas de Júpiter, observara os anéis de Saturno e explicara muita coisa sobre o mundo físico, foi obrigado a abjurar sua crença de que a Terra girava.

[...] Na madrugada de 6 de janeiro de 1851, em Paris, Léon Foucault, então com 32 anos, resolveu o mais persistente problema científico de todos os tempos, que já havia preocupado Nicolau Copérnico (1473-1543), Johannes Kepler (1571-1630), Galileu Galilei e Isaac Newton (1643-1727) nos séculos XVI a XVIII.

[...] Ele havia preparado o experimento cuidadosamente. Lidou com arames, alicates, dispositivos de medição e pesos. Enfim, prendeu uma extremidade de um fio de aço de dois metros de comprimento no teto do porão de sua casa, de uma maneira que permitisse a sua livre oscilação sem torque resultante. Na outra extremidade do fio, prendeu um peso de cinco quilogramas feito de latão. Foucault havia, assim, criado um pêndulo de oscilação livre, suspenso do teto.

[...] Cuidadosamente, pôs o pêndulo em movimento e aguardou. O peso moveu-se lentamente diante de seus olhos e Foucault acompanhou atentamente cada oscilação. Finalmente, ele viu o que queria. Detectou a ligeira mudança, mas claramente perceptível, do plano de oscilação do pêndulo. Esse plano havia se afastado da posição inicial, como se uma mão mágica estivesse intervindo e, lenta, mas firmemente, afastando-o de Foucault. Este sabia que acabara de observar o impossível.

[...] Léon Foucault acabara de ver a Terra girar.

ACZEL, Amir. *O pêndulo*: Léon Foucault e o triunfo da ciência. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003. p. 1-4.



Cristina Arias/Cover/Getty Images

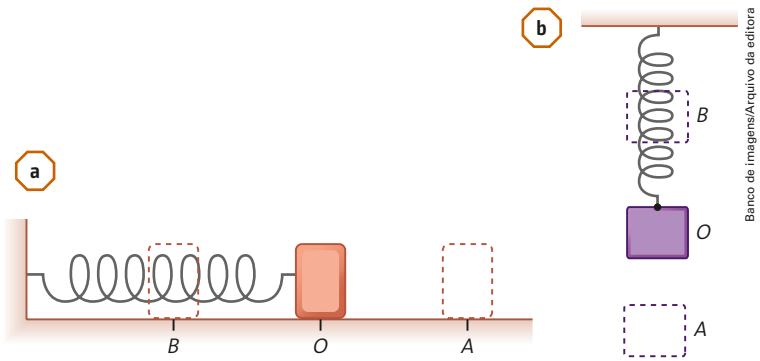
Pêndulo de Foucault. Museu de Artes e Ciências de Valência, Espanha, 2013.

- Qual observação feita por Foucault comprovou o movimento de rotação da Terra?

Sistema massa-mola

Vejamos agora o outro dispositivo que utilizaremos para ilustrar as oscilações e que também pode ser usado como marcador de tempo. Um corpo que oscila preso à extremidade de uma mola, fixada em um suporte, constitui um sistema massa-mola. A figura seguinte ilustra um sistema massa-mola oscilando horizontalmente (figura 6.6.a) e outro oscilando verticalmente (figura 6.6.b).

Como no pêndulo, nessas oscilações mecânicas do sistema massa-mola, ocorre continuamente a transformação de energia cinética em energia potencial, e vice-versa. Na oscilação horizontal, mostrada na figura 6.6.a, as transformações de energia ocorrem entre a energia cinética e a potencial elástica, enquanto na figura 6.6.b, que mostra o sistema oscilando verticalmente, as energias envolvidas são a cinética, a potencial gravitacional e a potencial elástica.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.6 O bloco de massa *m* oscila horizontalmente no sistema (**a**) e verticalmente no sistema (**b**) entre os pontos *A* e *B*, sendo o ponto *O* a posição de equilíbrio.

Para qualquer uma das oscilações, horizontal ou vertical, verifica-se que, por meio de experimentos ou com base em considerações teóricas, o período do sistema massa-mola é dado por:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Nessa expressão, T é o período do sistema em segundos; m é a massa do corpo oscilante em quilogramas e k é a constante elástica da mola em newton por metro (N/m). Devemos observar que o período do sistema massa-mola não depende da aceleração da gravidade, mesmo que a oscilação ocorra na vertical ou num plano inclinado.

Na época das Grandes Navegações, um dos grandes problemas era a determinação da longitude. Para isso, havia a necessidade de um relógio preciso. Assim, os relógios construídos com base nas leis do pêndulo simples mostraram-se deficientes, pois as sacudidas da embarcação eram equivalentes a variações do campo gravitacional, que influíam decisivamente no período do pêndulo, ocasionando a imprecisão do relógio. Era difícil orientar-se nos mares, e até mesmo demarcar territórios.

A solução veio com os relógios náuticos, a balancim (**figura 6.7**), baseados no sistema massa-mola, cujo período não depende da aceleração da gravidade. Foram os precursores dos primeiros relógios de pulso, que, por sua vez, evoluíram para os atuais relógios de cristal de quartzo. Em 1969, quando o astronauta norte-americano Neil Armstrong pousou na Lua, levava consigo um relógio com um sistema massa-mola, que manteve sua precisão no estado de imponderabilidade e na baixa gravidade da Lua.



Barry Winiker/Getty Images

Figura 6.7 Como no sistema massa-mola a aceleração da gravidade não influencia no período, a aplicação desse tipo de sistema em relógios nos transportes sujeitos a balanços substitui os de pêndulo.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

1. Um pêndulo simples de comprimento ℓ e massa pendular m oscila com período T. Tanto o comprimento ℓ como a massa m podem ser variados. O que acontece com o período de oscilação do pêndulo se:

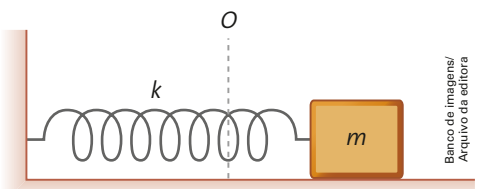
a) diminuirmos o comprimento ℓ? Diminuirá.

b) aumentarmos a massa m do pêndulo? Não se alterará.

c) levarmos o pêndulo para um local onde a aceleração da gravidade seja maior? Diminuirá.

2. Uma pessoa que morava em uma cidade com temperatura média da ordem de 10 °C mudou-se para outra cidade com temperatura média de 30 °C. Ela observou que um relógio de pêndulo que sempre funcionou corretamente passou a atrasar. Levando-se em conta a dilatação térmica dos materiais, como você explica tal fato?
Aumento no comprimento do pêndulo pela dilatação térmica.

3. A figura ilustra (sem escala e em cores fantasia) uma mola de constante elástica 100 N/m em cuja extremidade foi preso um corpo de 4 kg. O sistema é posto para oscilar. Despreze o atrito entre o corpo e a superfície horizontal e considere $\pi = 3$.



Banco de imagens/Arquivo da editora

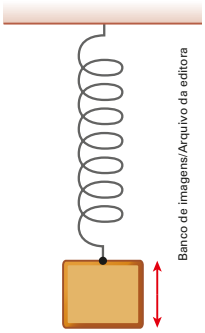
Com base nessas informações e nos seus conhecimentos sobre o sistema massa-mola, indique certo ou errado em cada afirmativa seguinte.

I. O período de uma oscilação é 1,2 s. Certo.

II. Se esse sistema for posto para oscilar na vertical, o período será maior que 1,2 s. Errado.

III. Se o sistema for levado para a Lua e posto para oscilar, o período será menor que 1,2 s. Errado.

4. Um método para se medir a massa de um corpo sem utilizar uma balança consiste em pendurá-lo em uma mola de constante elástica conhecida e colocar o sistema para oscilar na vertical, conforme mostra a figura (sem escala e em cores fantasia).



Banco de imagens/Arquivo da editora

Um estudante que realizava esse processo mediu o intervalo de tempo para que o corpo efetuasse dez oscilações completas e obteve 62,8 s. Considere $\pi = 3{,}14$ e $k = 2{,}0$ N/m.

a) Qual é o valor da massa do corpo que o estudante pôs para oscilar? $m = 2{,}0$ kg

b) Se a amplitude da oscilação no final do experimento era um pouco menor que a do início, o resultado obtido pelo estudante é ou não é confiável? Sim.

5. Em uma situação hipotética, um astronauta na Lua pôs para oscilar um pêndulo simples e registrou um período de 2,45 s. Se na Terra o mesmo pêndulo possui período de 1,00 s, o que podemos concluir sobre a aceleração da gravidade da Lua quando comparada com a da Terra? É menor do que a da Terra.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Representação (sem escala e em cores fantasia) de um astronauta segurando um pêndulo na Lua.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

2 Propagação ondulatória

Ao cair na superfície de um lago, uma pedra desloca certo volume de água, tanto lateral como verticalmente. Quando a pedra desce, a porção de água que se projeta acima do nível normal chega à posição de equilíbrio, mas passa daí por inércia, deslocando lateral e verticalmente uma nova porção de água ao seu redor. Assim, a oscilação propaga-se pela superfície do lago (**figura 6.8**).

Nos meios elásticos, a porção vibrante faz suas vizinhanças vibrarem também, dando origem às ondas.



Derek Croucher/Alamy/Other Images

Figura 6.8 Oscilações propagando-se na superfície da água.

As ondas transportam energia sem transportar matéria

Para ilustrar essa propriedade fundamental das propagações ondulatórias, vejamos dois exemplos. O primeiro diz respeito às olas que as pessoas fazem nos estádios; a perturbação (onda) se propaga pela multidão sem transporte de matéria, pois nenhuma pessoa muda de lugar. No segundo exemplo, suponha que você deixe cair, em intervalos regulares, pedras sobre a superfície de um lago em repouso. As ondas produzidas pelas quedas das pedras se propagam radialmente em circunferências sobre a superfície da água, a partir do ponto de impacto delas com a água. Uma pequena folha de árvore sobre a água oscilará para cima e para baixo em virtude da passagem das ondas, mas não se deslocará da sua posição original (**figura 6.9**).



Matthew Mawson/Millennium Images/Latinstock

Figura 6.9 Na passagem da onda, a folha oscila verticalmente sem se deslocar horizontalmente.

As propagações ondulatórias podem ser classificadas em transversais e longitudinais. Dizemos que uma propagação ondulatória é **transversal** quando a direção das vibrações é perpendicular à de propagação da onda (figura 6.10).

Enquanto pontos no meio da corda se movimentam verticalmente para cima e para baixo em torno de uma posição de equilíbrio, a onda se propaga horizontalmente.

As ondas produzidas nas cordas de instrumentos musicais (como em um violão), e na superfície de líquidos (como em uma piscina) e as ondas luminosas são exemplos de ondas transversais.

Dizemos que uma propagação ondulatória é **longitudinal** quando a direção da vibração é a mesma daquela em que se propaga a onda. Como demonstração, podemos utilizar uma mola, conforme mostra a figura 6.11.

As ondas longitudinais mais conhecidas são as ondas sonoras.

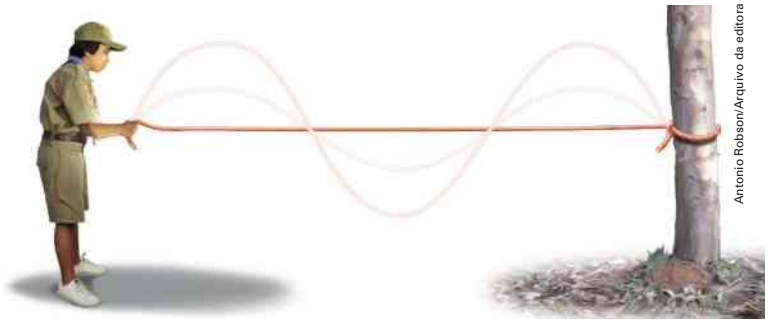
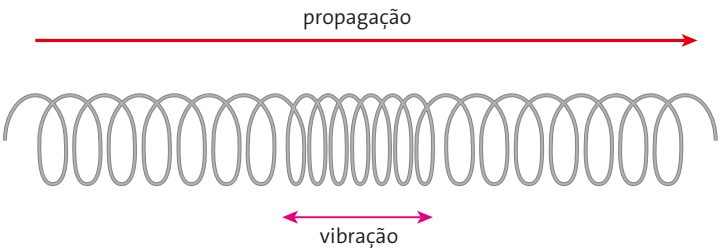

Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.10 Quando fixamos uma das extremidades de uma corda e balançamos a outra para cima e para baixo, geramos propagações do tipo transversal. Representação sem escala e em cores fantasia.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.11 Propagação longitudinal: os pontos do meio (mola) se movimentam horizontalmente para frente e para trás, na mesma direção da propagação da onda. Representação sem escala e em cores fantasia.

Ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas

Determinadas ondas necessitam, obrigatoriamente, de um meio material para a sua propagação: são as **ondas mecânicas**. Em uma propagação mecânica ocorre transporte de vibrações mecânicas, ou seja, as partículas materiais vibram. É o caso das ondas em cordas (figura 6.12), em molas, na superfície e no interior de líquidos, dos sólidos (terremotos) e dos gases (som se propagando no ar). As ondas mecânicas não se propagam no vácuo.

Por outro lado, existem propagações que ocorrem tanto nos meios materiais como no vácuo. São as **ondas eletromagnéticas**, como as ondas de rádio (figura 6.13), os raios infravermelhos, a luz visível, os raios X, entre outras.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.


Maertelc/Shutterstock/Glow Images

Figura 6.12 Ondas mecânicas propagam-se nas cordas de um violão.


Rubens Chaves/Pulsar Imagens

Figura 6.13 A antena capta ondas de rádio vindas dos mais diferentes pontos do Universo. Antenas de comunicação no monte Bom Jesus, Caruaru (PE), 2015.

Características de uma onda

A figura 6.14 mostra uma sequência de pulsos iguais produzida por uma pessoa em uma corda. Nessas condições, a onda é denominada **periódica**, pois se repete de forma idêntica em intervalos de tempo iguais e sucessivos.

Dos variados tipos de ondas, as periódicas apresentam especial interesse, tanto pela facilidade para a descrição, quanto pelas aplicações práticas. Vamos analisar algumas características delas, tais como a velocidade de propagação, a frequência e o período dos pulsos, a distância entre dois pulsos consecutivos e o máximo afastamento vertical dos pontos da corda em relação à posição de equilíbrio. Para isso, observe a figura 6.15.

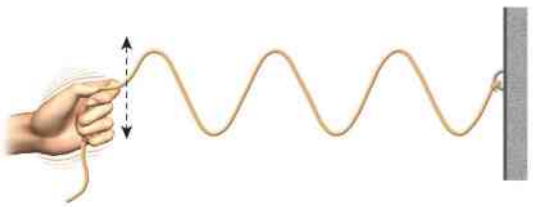


Figura 6.14 Movendo-se a extremidade da corda para cima e para baixo, provoca-se uma onda periódica.

As imagens desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

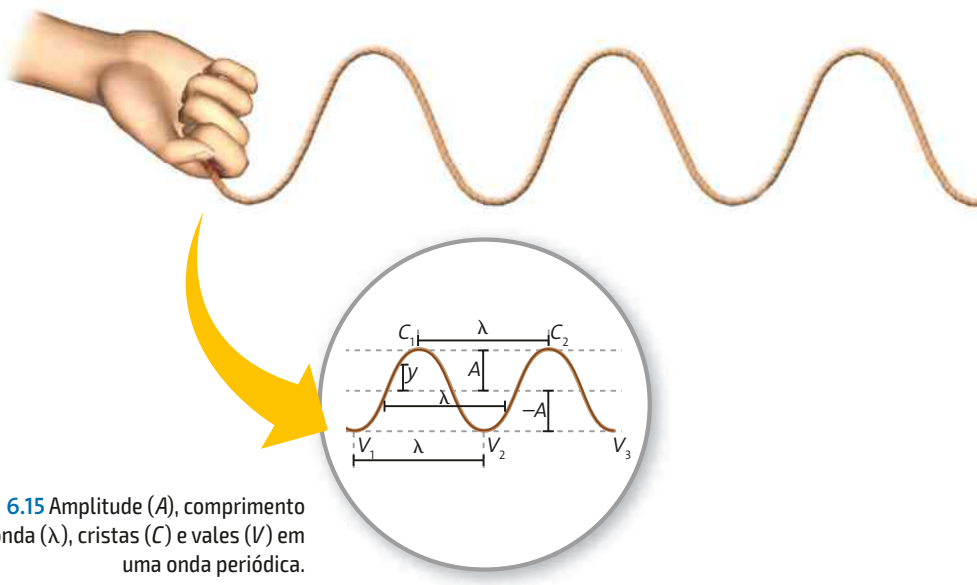


Figura 6.15 Amplitude (*A*), comprimento de onda (λ), cristas (*C*) e vales (*V*) em uma onda periódica.

Na figura, destacamos:

- **Elongação** (*y*) – é o valor algébrico da ordenada de um ponto oscilante da onda.
- **Amplitude** (*A*) – é o maior valor da elongação (máximo afastamento vertical em relação à posição de equilíbrio). A amplitude está relacionada à energia transportada pela onda. Quanto maior a amplitude, maior a energia transportada. O ponto mais alto recebe o nome de **crista** (*C*) e o ponto mais baixo recebe o nome de **vale** (*V*).
- **Frequência** (*f*) – número de oscilações completas executadas por qualquer ponto da corda, por unidade de tempo. **A frequência da onda é dada pela frequência da fonte**. Por exemplo, a frequência de uma onda gerada pela mão de uma pessoa em uma corda é dada pela frequência de oscilação da mão dessa pessoa. Quanto mais rápido a pessoa movimentar para cima e para baixo a extremidade livre da corda, maior a frequência da fonte e, consequentemente, a da onda. A unidade da frequência no Sistema Internacional de Medidas (SI) é o hertz (Hz).

- **Período** (T) – é o intervalo de tempo de uma oscilação completa de qualquer ponto na onda. O período é inversamente proporcional à frequência: quanto maior a frequência, menor o período. Do mesmo modo que a frequência, podemos dizer que **o período da onda é sempre igual ao da fonte que a origina**.
- **Comprimento de onda** (λ) – é a distância percorrida pela onda durante uma oscilação completa, ou seja, durante um intervalo de tempo igual ao período T da onda.
- **Velocidade de propagação da onda** (v) – a velocidade depende das características físicas do meio e expressa a rapidez com que a onda se propaga nesse meio.

Equação fundamental da ondulatória

Em um determinado meio, a velocidade de propagação v da onda é constante e pode ser relacionada às demais grandezas características (comprimento de onda, frequência e período).

Lembrando que a velocidade é dada pela razão entre o deslocamento ΔS e o intervalo de tempo Δt, verificamos que, se considerarmos o deslocamento igual ao comprimento de onda ($\Delta S = \lambda$) e o intervalo de tempo igual ao período T da onda ($\Delta t = T$), podemos escrever:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$$

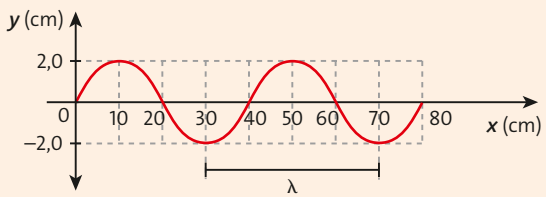
Como o período T é inversamente proporcional à frequência f $\left(T = \frac{1}{f}\right)$, podemos escrever a expressão acima da seguinte maneira:

$$v = \lambda \cdot f$$

Essa equação é conhecida como **equação fundamental da ondulatória**. Ela nos permite concluir que, para um determinado meio, como a velocidade de propagação v da onda é constante, o comprimento de onda λ e a frequência f são inversamente proporcionais. Assim, se dobrarmos a frequência da fonte, dobramos a frequência f da onda e, consequentemente, o comprimento de onda λ será reduzido à metade.

Exercício resolvido

1. Uma onda em uma corda oscila com frequência de 50 Hz. O gráfico seguinte mostra a corda em certo instante.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Nessas condições, determine:
a) a amplitude de oscilação;
b) o comprimento de onda;
c) a velocidade de propagação;
d) o período de oscilação da onda.

Resolução:

De acordo com o gráfico dado:
a) A amplitude de oscilação da onda é $A = 2$ cm (informação do gráfico).
b) Medindo-se a distância na horizontal (eixo x) entre dois vales consecutivos, obtemos o comprimento de onda: $\lambda = 40$ cm.
c) Usando a equação fundamental da ondulatória, obtemos a velocidade de propagação da onda:
$v = \lambda \cdot f \Rightarrow v = 40 \cdot 50 \Rightarrow v = 2\,000$ cm/s $= 20$ m/s
d) O período de oscilação da onda é dado por:
$T = \frac{1}{f} \Rightarrow T = \frac{1}{50} \Rightarrow T = 0{,}02$ s

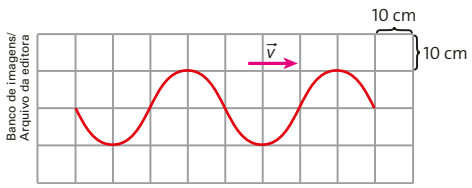
Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

6. Uma criança brinca com uma varinha batendo na água de um lago em intervalos regulares e produzindo ondas. Suponha que, em cada batida, uma única onda seja produzida. Se a criança diminuir o intervalo de tempo entre as batidas da varinha na água, as ondas produzidas passarão a ter:

a) maior velocidade, mas mesma frequência;
b) menor frequência, mas mesma velocidade;
c) maior frequência, mas velocidade menor;
X d) menor comprimento de onda, mas mesma velocidade.

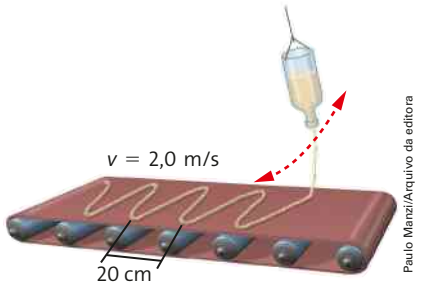
7. Um aluno produziu em uma corda uma onda periódica, conforme mostra a figura.



Sabendo-se que o período de oscilação da onda é 0,5 s, determine:

a) a amplitude e o comprimento de onda; $A = 10$ cm e $\lambda = 40$ cm.
b) a frequência e a velocidade de propagação da onda. $f = 2{,}0$ Hz e $v = 0{,}80$ m/s.

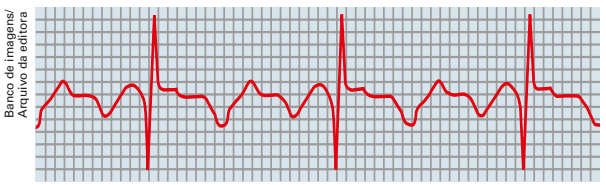
8. Em uma feira de Ciências, um aluno apresentou um dispositivo para ilustrar a propagação ondulatória. O dispositivo consiste em um recipiente cheio de areia, pendurado na extremidade de um fio. À medida que o recipiente oscila verticalmente, a areia escoa-se lentamente sobre uma esteira que se move na horizontal à velocidade de 2 m/s, conforme mostra a figura a seguir (sem escala e em cores fantasia).



De acordo com as informações dadas no texto e na figura, determine:

a) as frequências de oscilação da onda e do funil; a) $f = 10$ Hz
b) o período de oscilação do funil. $T = 0{,}1$ s

9. O eletrocardiograma é um exame muito utilizado pelos médicos cardiologistas para analisar o funcionamento do coração. Uma caneta registra a atividade elétrica do coração movimentando-se transversalmente a uma fita de papel milimetrado, que se desloca com velocidade constante de 25 mm/s. A figura mostra parte da fita de um eletrocardiograma.



$f = 75$ bpm

Sabendo-se que, no papel milimetrado, a distância entre duas linhas paralelas, tanto na vertical como na horizontal, é de 1,0 mm, determine a frequência cardíaca dessa pessoa, em batimentos por minuto.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

3 Reflexão, refração e difração de ondas

Acrônimo – Palavra formada pela inicial ou por mais de uma letra de cada um dos segmentos sucessivos de uma locução, ou pela maioria dessas partes.

A maioria dos navios e submarinos é equipada com o sonar, acrônimo de *sound navigation ranging*, que significa 'determinação de distância para navegação pelo som'.

O sonar é um aparelho que emite ondas sonoras, com frequências de 20 000 Hz a 100 000 Hz. A onda emitida pelo sonar, ao ser **refletida** por objetos submersos, permite aos navios e submarinos desviar de obstáculos e localizar navios afundados, submarinos, cardumes de peixes, ou qualquer outro objeto de interesse.

A técnica utilizada pelo sonar baseia-se em um fenômeno físico que ocorre com as ondas em geral, a **reflexão**. A seguir, veremos o que ocorre com uma onda quando ela sofre reflexão e quais são as leis que regem esse fenômeno.

A figura 6.16 mostra frentes de onda que ocorrem quando uma onda se propaga em um meio qualquer. Essas frentes correspondem a uma linha, ou a uma superfície, formada por pontos da onda que apresentam o mesmo sentido de movimento (concordância de fase).

Suponha que uma onda, propagando-se num dado meio (meio 1), atinge um obstáculo (meio 2) e sofre reflexão. Na figura 6.17, temos uma representação esquemática desse fenômeno.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.16 Representação (sem escala e em cores fantasia) de uma onda por meio de frentes de onda. A distância entre duas frentes de onda consecutivas é igual ao comprimento de onda λ.

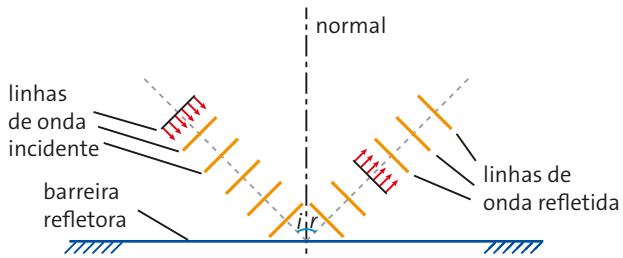


Figura 6.17 Uma onda, representada pelas frentes de onda, incide sobre uma superfície de separação (barreira refletora) entre dois meios e sofre reflexão. Tanto os raios incidentes como os refletidos estão no mesmo meio.

Observe que, ao ser refletida, a onda retorna ao meio de origem. Como a velocidade é característica do meio de propagação, a onda refletida tem a mesma velocidade da onda incidente, pois ambas se propagam no mesmo meio. A frequência, por ser uma característica da fonte, permanece inalterada com a reflexão e, em decorrência, o comprimento de onda também permanece inalterado.

Observa-se na reflexão de ondas que:

> A medida do ângulo de incidência (i) é igual à medida do ângulo de reflexão (r): $i = r$.

Nas figuras seguintes, temos as representações esquemáticas da reflexão de ondas circulares em superfícies refletoras plana (figura 6.18) e circular (figura 6.19).

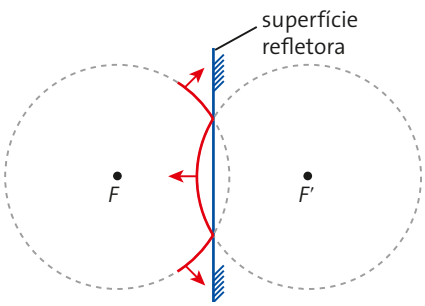
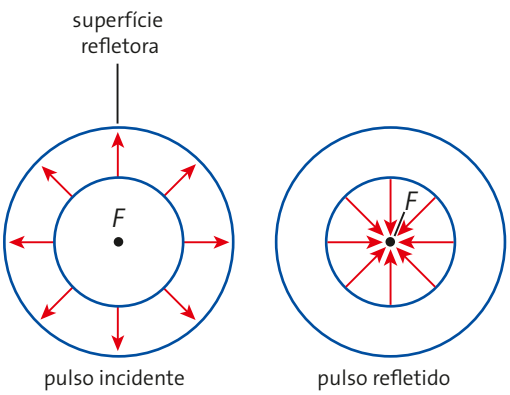


Figura 6.18 Reflexão de uma onda circular em uma superfície plana. O ponto F', simétrico a F em relação à superfície de separação, é a fonte virtual de emissão das ondas refletidas.



Ilustrações técnicas: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.19 Reflexão de ondas circulares em uma superfície refletora também circular. Os raios refletidos constituem um pincel convergente para o centro F, onde se encontra a fonte.

Refração

Uma onda sofre refração quando transpõe a fronteira de separação entre dois meios de propagação, passando a se propagar no outro meio e, por esse motivo, com outra velocidade.

A **figura 6.20** ilustra frentes de onda passando do meio 1 para o meio 2 e sofrendo refração.

O que caracteriza a refração é uma alteração na velocidade de propagação e, dependendo do ângulo de incidência (*i*), pode ocorrer ou não mudança na direção de propagação. A frequência, por ser uma característica da fonte, não se altera na refração, mas o comprimento de onda sim.

A equação que descreve a refração de ondas é dada por:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Nessa expressão, *i* é o ângulo de incidência no meio 1; *r* é o ângulo de refração no meio 2; v_1 é a velocidade de propagação da onda no meio 1; v_2 é a velocidade de propagação da onda no meio 2; λ_1 é o comprimento de onda da onda no meio 1 e λ_2 é o comprimento de onda da onda no meio 2.

A utilização do sonar pelos navios pode apresentar algumas dificuldades em razão da refração do som sob a água. Em virtude da mudança da temperatura da água com a profundidade, a velocidade das ondas sonoras varia, o que pode acarretar problemas na localização de objetos submersos, uma vez que há a formação de "pontos cegos" na água. Alguns submarinos, para não serem descobertos, utilizam esses pontos para se esconder.

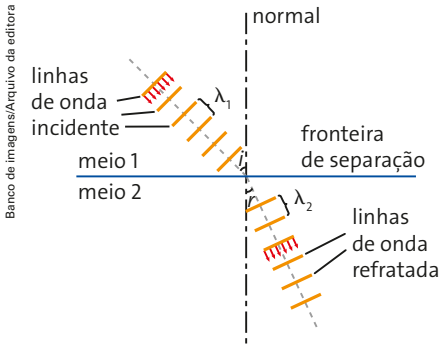
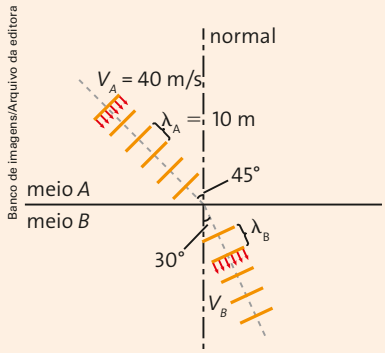


Figura 6.20 Refração de uma onda ao mudar de meio de propagação.

Exercício resolvido

2. As linhas mostradas na figura seguinte representam a refração de uma onda periódica. São representados os ângulos de incidência (45°) e de refração (30°). Sabe-se que, no meio *A*, a velocidade das ondas é de 40 m/s e o comprimento de onda é de 10 m. Nessas condições, determine:



a) a frequência da onda nos meios *A* e *B*;

b) a velocidade e o comprimento de onda no meio *B*.
Considere: sen 45° = 0,70 e sen 30° = 0,50.

Resolução:

a) No meio *A*, temos: $v_A = 40$ m/s e $\lambda_A = 10$ m. Inserindo esses valores na equação fundamental da ondulatória, obtemos a frequência da onda nesse meio:

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow 40 = 10 \cdot f_A \Rightarrow f_A = 4{,}0$ Hz

Como na refração não há mudança na frequência, tanto no meio *A* quanto no *B* as frequências são iguais e valem 4,0 Hz.

b) A velocidade da onda no meio *B* é obtida da expressão:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_A}{v_B}$$

Sendo sen i = sen 45° = 0,70; sen r = sen 30° = = 0,50 e v_A = 40m/s, obtemos:

$$\frac{0{,}70}{0{,}50} = \frac{40}{v_B} \Rightarrow v_B = \frac{40 \cdot 0{,}50}{0{,}70} \Rightarrow v_B = 28 \text{ m/s}$$

E o comprimento de onda no meio *B* é dado por:

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow 28 = \lambda_B \cdot 4{,}0 \Rightarrow \lambda_B = 7{,}0$ m

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

Ondas do mar

É um fenômeno interessante as ondas do mar chegarem sempre paralelas à costa. A explicação para esse fato se encontra nas propriedades da refração.

Para pequenas profundidades (até 10 m), a velocidade das ondas na superfície dos líquidos pode ser calculada por $v = \sqrt{gh}$, em que g é a aceleração da gravidade local e h é a profundidade. As ondas do mar próximas à praia satisfazem essa condição.

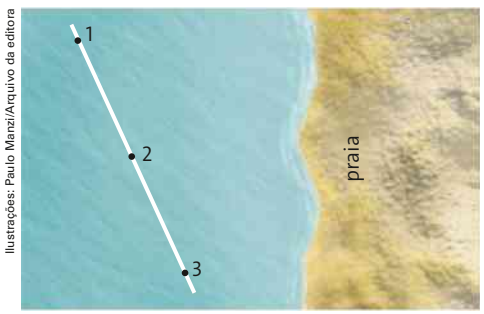
A figura a seguir ilustra uma onda incidente inicialmente inclinada em relação ao litoral. À medida que a onda se aproxima da praia, ela é continuamente refratada, visto que a profundidade varia ponto a ponto. As velocidades dos pontos da frente da onda obedecem à relação $v_1 > v_2 > v_3$.



Ismar Ingber/Pulsar Imagens

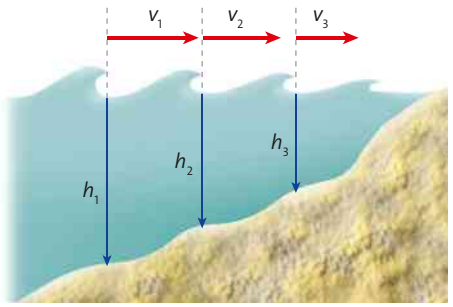
Praia da Barra da Tijuca, Rio de Janeiro (RJ), 2013.

Desse modo, a frente de onda vai tendendo, cada vez mais, a direcionar-se paralelamente à praia, em razão das sucessivas refrações.



Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Três pontos de uma mesma frente de onda situados em profundidades diferentes.



Projeções das velocidades no plano da imagem.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Algumas ondas que se formam nos oceanos podem ser extremamente devastadoras ao atingir a costa, principalmente aquelas causadas por abalos sísmicos, atividades vulcânicas ou pela queda de meteoritos. Essas ondas são conhecidas como *tsunamis*.

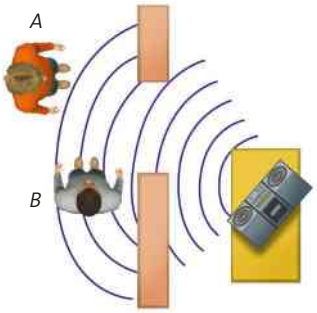
Em alto-mar, normalmente essas ondas não representam perigo, pois a grande quantidade de energia que transportam se distribui em um longo comprimento de onda, com amplitudes pequenas se comparadas com os comprimentos de onda e com altíssimas velocidades. No entanto, ao chegar à costa, com a redução na profundidade do oceano, a velocidade da onda diminui. Como a energia transportada é praticamente conservada, a amplitude da onda aumenta, e as consequências são devastadoras.

- Quais providências devem ser tomadas para que vidas sejam poupadas na passagem de um *tsunami*?



Kimimasa Mayama/Bloomberg/Getty Images

Fotografia do estrago do *tsunami* em Kesennuma, Miyagi, Japão, 28 de abril de 2011.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 6.21 Por que a pessoa *B* ouve o som do rádio, mas não o vê?

Difração

Observando a **figura 6.21**, constatamos que a pessoa *A* vê e ouve o som do rádio colocado do outro lado do muro. Mas a pessoa *B*, da posição em que se encontra, somente ouve o som do rádio, mas não consegue vê-lo. Se o som e a luz se propagam no ar e em ondas, por que isso acontece? Em outras palavras, por que o som consegue chegar até a pessoa *B*, mas a luz não?

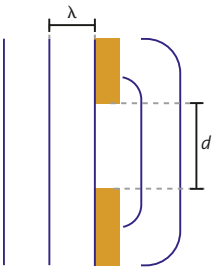
Esse fato pode ser explicado por um fenômeno que ocorre com as ondas, denominado **difração**. A difração ocorre quando uma onda encontra uma fenda ou um obstáculo. As ondas conseguem contornar obstáculos e fendas; assim, chegam a regiões que não seriam atingidas se elas apresentassem apenas propagação retilínea.

A difração ocorre tanto com as ondas mecânicas como com as eletromagnéticas, mas as condições para que ela ocorra dependem da relação entre o comprimento de onda e o tamanho da abertura ou do obstáculo. Quanto menor for o comprimento de onda (λ), em relação ao tamanho da fenda ou obstáculo (*d*) atingido, menor será a capacidade de contorná-lo, conforme se observa nas **figuras 6.22** e **6.23**.

As imagens desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Com base nesses dados, podemos voltar à **figura 6.21**. No caso das ondas sonoras emitidas pelo rádio, o comprimento de onda (da ordem de metros) normalmente é maior do que o tamanho das fendas ou obstáculos (portas, janelas, etc.). Nesse caso, o efeito da difração é facilmente observável.

Por outro lado, como o comprimento de onda da luz visível (da ordem de décimos de milésimos de milímetros) é muito pequeno quando comparado às dimensões das fendas ou obstáculos, o fenômeno da difração com a luz é muito difícil de ser observado. Em virtude disso, a pessoa *B* ouve o som, pois a difração do som é bem acentuada e ele consegue contornar o obstáculo, mas não consegue vê-lo porque a luz praticamente não sofre difração.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.22 Energia mais distribuída (*d* é da ordem de grandeza de λ).

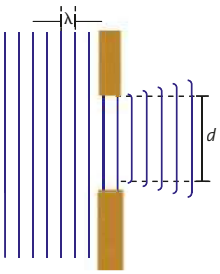
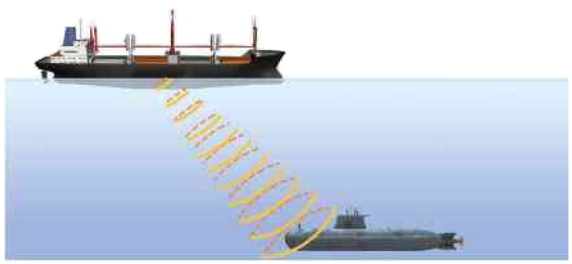


Figura 6.23 Energia mais concentrada ($d > \lambda$).

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

10. Um sistema de sonar, localizado em um navio, emite ondas sonoras na água. A onda emitida, com frequência de 260 Hz, após reflexão em um objeto submerso retorna ao detector em 0,2 s.


Paulo Manzi/Arquivo da editora

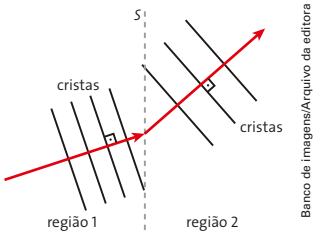
Representação do sistema de sonar.

Sabendo-se que a velocidade da onda sonora na água é de 1480 m/s, determine:

a) a profundidade a que se encontra o objeto submerso; $h = 148$ m

b) o comprimento de onda da onda sonora emitida. $\lambda = 5{,}7$ m

11. A figura seguinte representa frentes de onda planas propagando-se na água de uma piscina que possui uma região mais funda que a outra.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Determine:

a) em qual região a velocidade da onda é maior; a) Região 2.

b) a relação entre as frequências nos dois meios. A frequência é a mesma.

12. Quando estamos na cozinha de uma casa é frequente ouvirmos o som da televisão ligada na sala ao lado, mas não conseguirmos ver a imagem. Como você explica esse fato? Difração.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

4 Interferência de ondas

Suponha que uma pessoa tenha montado ao ar livre um sistema constituído por dois alto-falantes que emitem sons idênticos e de frequência constante (figura 6.24).

Se você caminhar pela região em frente aos alto-falantes, vai perceber que em determinados pontos a intensidade do som que chega até você é maior do que em outros pontos. Além disso, existem determinados pontos nos quais você praticamente não ouve o som dos alto-falantes. Dentro de uma sala, esse efeito praticamente não é percebido em razão das múltiplas reflexões que as ondas sonoras sofrem nas paredes, no piso e no teto da sala.

Para explicar esse fenômeno, devemos entender como as ondas se superpõem e como são produzidas as chamadas **interferências construtiva** e **destrutiva**.



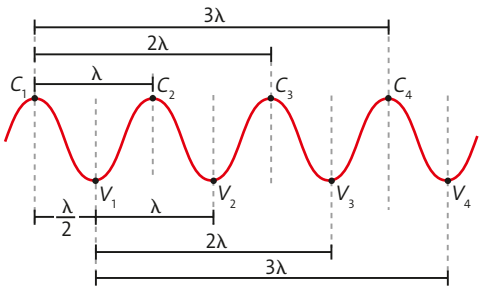
Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 6.24 Os dois alto-falantes emitem simultaneamente ondas idênticas e com a mesma frequência constante. Representação sem escala e em cores fantasia.

Como o fenômeno da interferência acontece tanto para as ondas longitudinais, entre as quais as ondas sonoras estão incluídas, como para as ondas transversais, usaremos estas últimas para a explicação, porque são mais fáceis de serem visualizadas.

Na figura 6.25 temos a representação de um registro "instantâneo" de uma onda senoidal.

Observe que os pontos C_1, C_2, C_3 e C_4 (cristas da onda) estão separados por uma distância igual ao comprimento de onda λ. Esses pontos estão na mesma fase. O mesmo podemos dizer dos pontos V_1, V_2, V_3 e V_4 (vales da onda): eles estão em concordância de fase entre si.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.25 Representação de uma onda senoidal.

De modo geral, dizemos que dois pontos estão em **concordância de fase** quando vibram sempre no mesmo sentido. A distância entre pontos em concordância de fase é:

$$d = n \cdot \lambda,$$

em que n é um número natural (0, 1, 2, 3, ...).

Por outro lado, os pontos C_1 e V_1 estão em oposição de fase. Eles vibram sempre em sentidos contrários. A distância entre esses dois pontos é $\frac{\lambda}{2}$. O mesmo podemos dizer dos pontos C_2 e V_2, C_3 e V_3 e C_4 e V_4.

De modo geral, dois pontos estão em **oposição de fase** quando a distância entre eles é:

$$d = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda,$$

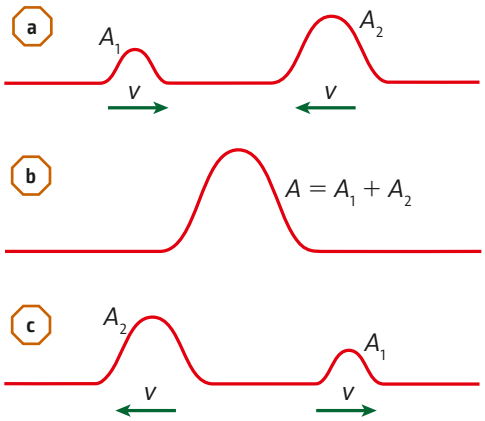
em que n é um número natural (0, 1, 2, 3,...).

Vejamos, agora, como acontece a superposição de ondas. Vamos considerar inicialmente dois pulsos propagando-se em uma corda, em sentidos opostos, conforme mostra a figura 6.26.

As perturbações se propagam de modo independente; em outras palavras: **um pulso não interfere na propagação do outro**. Quando os pulsos se encontram, o que ocorre é uma **superposição**. Na realidade, uma onda não interfere na outra; elas apenas se superpõem. O termo "interferência" permanece apenas por motivos históricos, sendo consagrado pelo uso.


Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.26 Representação esquemática de dois pulsos propagando-se em uma corda.



Ilustrações técnicas: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.27 Representação de uma interferência construtiva entre dois pulsos.

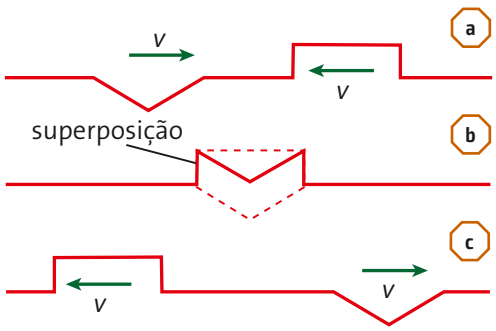


Figura 6.28 Representação de uma interferência destrutiva entre dois pulsos.

As imagens desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Na figura 6.27 temos as ilustrações dos pulsos: **a**, antes; **b**, durante; e **c**, após a superposição.

Observe que, na superposição dos pulsos, obtém-se um pulso com uma amplitude igual à soma das amplitudes dos pulsos individuais: $A = A_1 + A_2$. Como os dois pulsos estão em **concordância de fase**, trata-se de uma superposição construtiva, ou seja, de uma **interferência construtiva**.

E se os pulsos estivessem em oposição de fase? Nesse caso, teríamos uma superposição destrutiva, ou seja, uma **interferência destrutiva**, conforme mostra a figura 6.28.

Na superposição destrutiva, obtém-se um pulso com uma amplitude igual à diferença entre as amplitudes dos pulsos individuais: $A = A_1 - A_2$. No caso particular em que $A_1 = A_2$, a amplitude resultante é nula: $A = 0$.

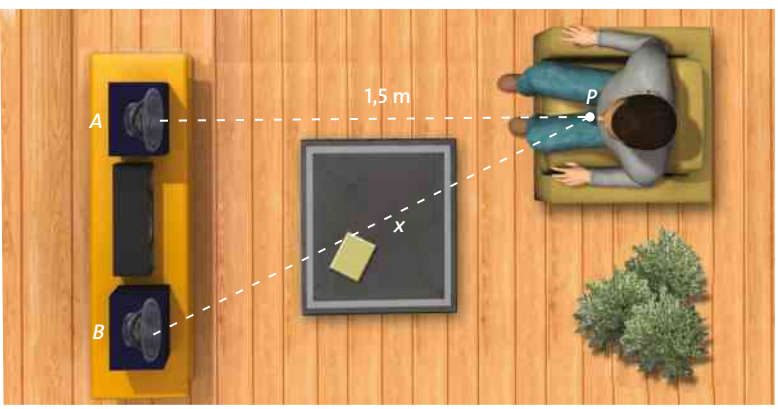
Voltemos ao caso dos alto-falantes do início deste tópico. Vamos supor que uma pessoa se encontra no ponto *P*, distante 1,5 m do alto-falante *A*, conforme mostra a figura 6.29.

Para que nesse ponto a intensidade resultante do som seja máxima, devemos ter uma interferência construtiva das duas ondas emitidas pelos alto-falantes *A* e *B*. Em outras palavras, as ondas emitidas pelos dois alto-falantes devem atingir o ponto *P* em concordância de fase. Isso só acontece se a diferença *d* de percurso das ondas ($\overline{BP} - \overline{AP}$) for um múltiplo inteiro do comprimento de onda, ou seja:

$$d = \overline{BP} - \overline{AP} = n \cdot \lambda$$

E, para que a intensidade resultante do som seja mínima no ponto *P*, deve ocorrer uma interferência destrutiva. Nesse caso, as ondas emitidas pelos dois alto-falantes devem atingir o ponto *P* em oposição de fase. Para que isso aconteça, a diferença *d* de percurso das ondas ($\overline{BP} - \overline{AP}$) deve ser dada pela relação:

$$d = \overline{BP} - \overline{AP} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 6.29 Uma pessoa encontra-se no ponto *P* em frente aos alto-falantes.

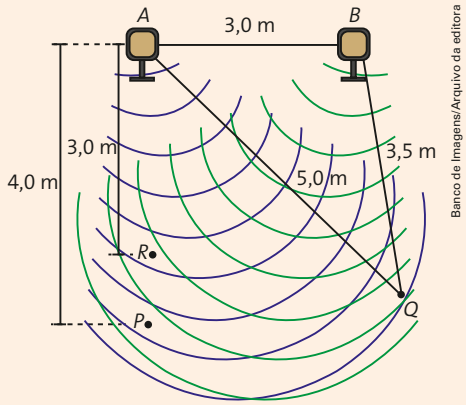
Existe, ainda, a possibilidade de as ondas atingirem o ponto *P* com uma diferença de fase tal que a amplitude resultante não seja máxima, nem mínima, mas, sim, um valor intermediário entre esses dois extremos. Nesse caso, temos uma **interferência parcial.**

Em resumo, podemos dizer que se $\frac{d}{\lambda}$ for:

- 1; 2; 3; 4;... a interferência é construtiva;
- 0,5; 1,5; 2,5; 3,5;... a interferência é destrutiva;
- qualquer valor diferente dos citados acima, a interferência é parcial.

Exercício resolvido

3. Duas fontes, *A* e *B*, separadas por 3,0 m, emitem, continuamente e em fase, ondas com comprimentos de onda iguais a 1,0 m. Um detector de som pode ser colocado nos pontos *P*, *Q* ou *R*, conforme mostra a figura seguinte (sem escala e em cores fantasia).



Banco de imagens/Arquivo da editora

Determine o tipo de interferência que ocorre nas diferentes posições em que o detector pode ser colocado.

Resolução:

Como o ponto *P* encontra-se a 4,0 m da fonte *A* e a distância entre as fontes é 3,0 m, ele encontra-se a uma distância da fonte *B* dada por:

$(d_{BP})^2 = (d_{AP})^2 + (d_{AB})^2$

$(d_{BP})^2 = (4,0)^2 + (3,0)^2 \Rightarrow d_{BP} = 5,0 \text{ m}$

Assim, a diferença de percurso das ondas emitidas pelas fontes *A* e *B* que atingem o ponto *P* é dada por:

$d = \overline{BP} - \overline{AP} \Rightarrow d = 5,0 - 4,0 \Rightarrow d = 1,0 \text{ m}$

Sendo o comprimento de onda igual a 1,0 m, temos: $\frac{d}{\lambda} = 1$. Isso significa que no **ponto *P*** ocorre uma **interferência construtiva**.

Vejamos agora o tipo de interferência no ponto *Q*. Esse ponto encontra-se a 5,0 m da fonte *A* e 3,5 m da fonte *B*. Nesse caso, a diferença de percurso das ondas é dada por:

$d = \overline{AQ} - \overline{BQ} \Rightarrow d = 5,0 - 3,5 \Rightarrow d = 1,5 \text{ m}$

Neste caso, temos: $\frac{d}{\lambda} = 1,5$. Portanto, temos no **ponto *Q*** uma **interferência destrutiva**.

Finalmente, vejamos o ponto *R*. A distância do ponto *R* à fonte *A* é de 3,0 m e a distância à fonte *B* é dada por:

$(d_{BR})^2 = (d_{AR})^2 + (d_{AB})^2$

$(d_{BR})^2 = (3,0)^2 + (3,0)^2 \Rightarrow d_{BR} = 4,2 \text{ m}$

Então, a diferença de percurso das ondas é:

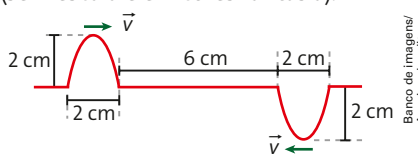
$d = \overline{BR} - \overline{AR} \Rightarrow d = 4,2 - 3,0 \Rightarrow d = 1,2 \text{ m}$

Portanto: $\frac{d}{\lambda} = 1,2$. Como esse valor está compreendido entre 1 e 1,5, temos, no **ponto *R***, uma **interferência parcial.**

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercícios

13. Dois pulsos de onda propagam-se em um meio com a mesma velocidade. Em um determinado instante, os pulsos encontram-se conforme mostra a figura seguinte (sem escala e em cores fantasia).



Banco de imagens/ Arquivo da editora

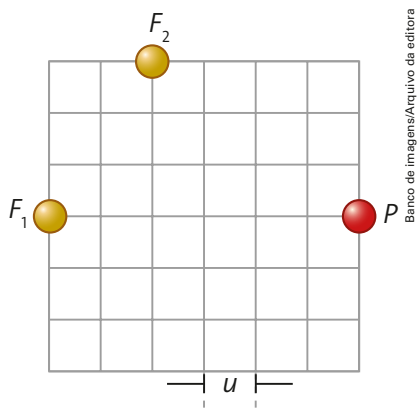
Considerando os dados da figura e que a velocidade dos pulsos é igual a 2,0 cm/s, analise as afirmativas seguintes, colocando certo ou errado.

I. Quando os pulsos se encontraram, houve uma interferência construtiva. Errado.

II. Decorridos 2,0 s do instante mostrado na figura, haverá uma superposição dos pulsos e a interferência será destrutiva. Certo.

III. 8,0 s após o instante mostrado na figura, os pulsos apresentarão velocidades de 2,0 cm/s e inversão de fase. Errado.

14. Duas fontes, F_1 e F_2, posicionadas conforme mostra a figura, emitem sons idênticos de comprimentos de onda iguais a 2,0 m.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Se o reticulado mostrado na figura possui unidade de comprimento $u = 6,0$ m, que tipo de interferência ocorrerá no ponto *P*? Construtiva.

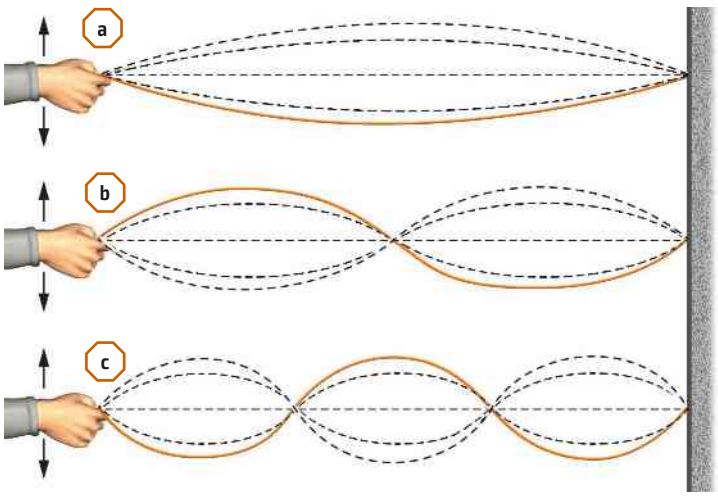
Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

5 Ondas estacionárias

Onda estacionária é um tipo especial de superposição (interferência) de ondas fundamental no estudo de notas musicais em instrumentos de corda e de sopro.

Um modo prático de se visualizar uma onda estacionária é por meio de uma corda esticada, presa a uma parede. Se a extremidade livre da corda for continuamente balançada para cima e para baixo por uma pessoa, ondas se propagam na corda, atingem a parede, sofrem reflexão, retornam e se superpõem (interferem) às ondas que estão, inicialmente, propagando-se rumo à parede, denominadas ondas incidentes. Se a pessoa conseguir manter oscilações sempre com a mesma amplitude e frequência, a interferência das ondas incidentes nas ondas refletidas assume as formas mostradas na **figura 6.30**.

Observe que, dependendo da frequência com que a extremidade da corda é balançada, podemos obter uma das três ondas estacionárias mostradas na **figura 6.30**, ou, ainda, uma outra com um maior número de nós (ou nodos) e antinós (ou ventres).



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 6.30 Representação esquemática de ondas estacionárias em uma corda.

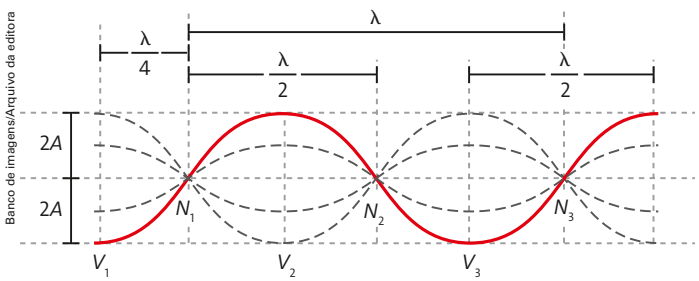
Quanto maior a frequência com que oscilamos a extremidade livre da corda, menor o comprimento de onda da onda estacionária obtida, pois a velocidade da onda é constante, desde que não se altere a tensão na corda. Um comprimento de onda menor implica um número maior de nós e ventres.

Se a corda possui um comprimento ℓ, então, no caso da **figura 6.30.a**, temos uma onda estacionária com comprimento de onda igual ao dobro do comprimento da corda, ou seja, $\lambda = 2\ell$. Para a **figura 6.30.b**, o comprimento de onda é igual ao comprimento da corda: $\lambda = \ell$ e, no caso da **figura 6.30.c**, temos $\lambda = \frac{2}{3}\ell$.

Os pontos denominados **nós**, ou **nodos**, são aqueles nos quais as ondas estão em oposição de fase; nesse caso, a interferência é destrutiva. Se as ondas têm rigorosamente a mesma frequência, permanecerão sempre em oposição de fase nos nós, nos quais a interferência será sempre destrutiva.

Os pontos denominados **ventres** são aqueles nos quais as ondas estão, e estarão sempre, em concordância de fase. Nesse caso, a interferência é construtiva e esses pontos vibram com uma amplitude igual à soma das amplitudes das duas ondas constituintes.

A distância d entre dois nós ou dois ventres consecutivos é igual à metade do comprimento de onda λ, ou seja: $d = \frac{\lambda}{2}$. A distância entre um nó e um ventre consecutivo é igual a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, conforme mostra a **figura 6.31**.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.31 Representação de nós e ventres em uma onda estacionária.

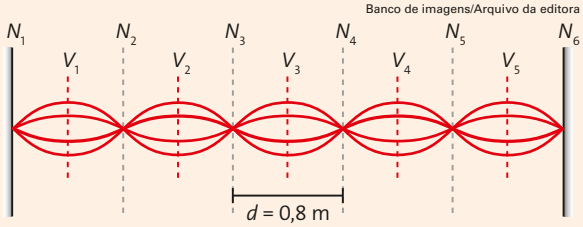
Exercício resolvido

4. Na figura abaixo, uma corda está em vibração estacionária com frequência de 100 Hz. Determine:

a) o comprimento de onda da onda estacionária e a velocidade de propagação das ondas na corda;

b) o comprimento ℓ da corda.

Banco de imagens/Arquivo da editora



Resolução:

a) De acordo com a figura, a distância entre os nós consecutivos N_3 e N_4 é 0,8 m. Como essa distância é igual à metade do comprimento de onda, temos:

$$\frac{\lambda}{2} = 0{,}8 \Rightarrow \lambda = 1{,}6 \text{ m}$$

Sendo $v = \lambda \cdot f$ (equação fundamental da ondulatória), obtemos:

$v = 1{,}6 \cdot 100 \Rightarrow v = 160$ m/s

b) O comprimento ℓ da corda corresponde à distância entre os nós N_1 e N_6 (primeiro e último nó) e, de acordo com a figura, essa distância é igual a 5 vezes aquela entre os nós N_3 e N_4. Como a distância entre os nós N_3 e N_4 é 0,8 m, obtemos:

$\ell = 5 \cdot 0{,}8 \Rightarrow \ell = 4{,}0$ m

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

15. Indique a afirmativa que caracteriza uma onda estacionária.

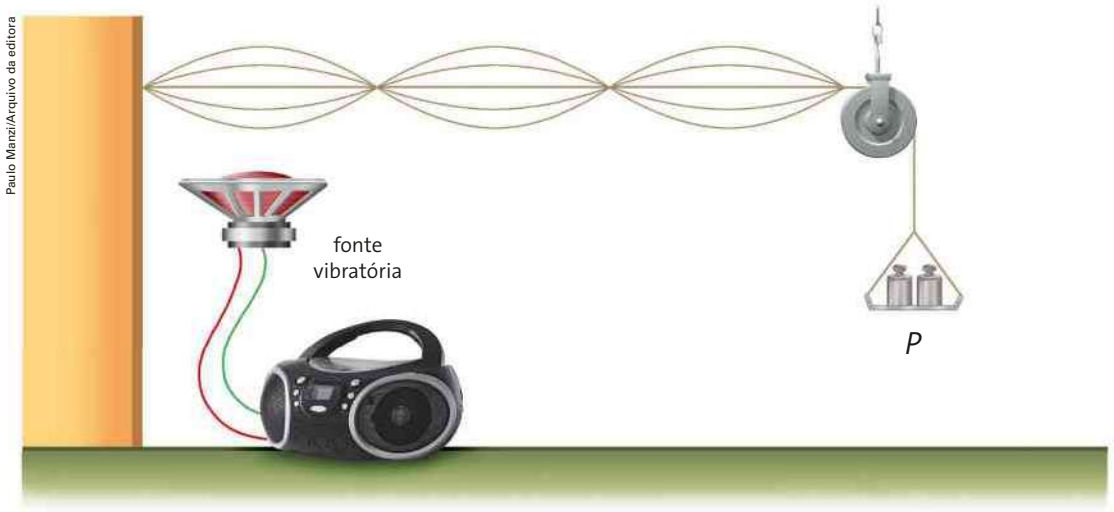
I. A velocidade de propagação da onda é nula em todos os pontos.

II. Os pontos que apresentam amplitude máxima estão separados entre si por distâncias vibratórias iguais a um comprimento de onda.

X III. Os pontos denominados nós, e que sejam consecutivos, estão separados entre si por uma distância igual a meio comprimento de onda.

16. Um professor, utilizando uma fonte vibratória, um fio de náilon e um peso *P*, monta um dispositivo e obtém uma configuração de ondas estacionárias conforme apresenta a figura seguinte (sem escala e em cores fantasia).

Paulo Manzi/Arquivo da editora



a) Sendo $d = 12$ cm a distância entre dois nós consecutivos, determine o comprimento de onda da onda no fio. $\lambda = 24$ cm

b) Se a frequência de vibração da fonte é 100 Hz, qual é a velocidade da onda no fio? $v = 24$ m/s

6 Ressonância

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

Diz o ditado popular: "água mole em pedra dura tanto bate até que fura". Esse ditado, que pode ser usado em diferentes situações, certamente está relacionado ao fato de as águas do mar conseguirem desgastar até as pedras mais duras em razão da transferência periódica de energia à matéria.

De modo geral, como as ondas transportam energia, podem afetar a matéria com a qual interagem. Existem, na prática, vários exemplos de interações de ondas com a matéria cujos resultados são desastrosos. É o caso de prédios durante terremotos e de taças de cristal que quebram quando submetidas a sons agudos emitidos normalmente por cantores de ópera. Mas existem também interações que não são indesejáveis. Algumas estão ligadas diretamente à qualidade de vida atual, como os fornos de micro-ondas, nos quais moléculas de água se aquecem ao receber continuamente energia das ondas. Também temos bons exemplos na Medicina, como a fragmentação de cálculos renais em virtude da interação com ondas de ultrassom (ondas sonoras com frequências maiores que as audíveis). Essa transferência de energia entre sistemas está ligada diretamente a um fenômeno físico denominado **ressonância**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.32 Em parques é comum um adulto empurrar uma criança no balanço.

Vejamos um exemplo cotidiano (figura 6.32). Se a pessoa quiser "balançar mais alto" a criança, ou seja, aumentar a amplitude do movimento do balanço, deve empurrá-lo continuamente, sempre que ele estiver na mesma posição do movimento, aplicando sempre a mesma força. Isso significa dizer que a frequência com que a pessoa transfere energia ao balanço deve ser igual à frequência do movimento de oscilação do balanço.

Na Física, dizemos que a fonte de energia (a pessoa) entrou em ressonância com o sistema oscilante (balanço). Assim, ao ocorrer a ressonância, há uma transferência contínua de energia da fonte para o sistema, cuja amplitude de vibração aumenta. Isso ocorre até o instante em que a energia dissipada por eventuais amortecimentos passa a equivaler à energia fornecida pela fonte. A partir desse instante, a amplitude se mantém.

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercícios

17. Com base na ressonância, explique:

a) o desabamento da ponte Tacoma Narrows, nos Estados Unidos, em 1940;

a) Os vórtices da turbulência do vento produziram vibrações ressonantes com as vibrações da ponte.

b) a sintonização das emissoras de FM num rádio de automóvel.

Ressonância do circuito de recepção.

18. Se você colocar água em uma garrafa, sem a encher totalmente e, em seguida, soprar através da extremidade aberta, você ouvirá o som produzido pelo seu sopro. Assinale a alternativa que explica corretamente esse fato.

X a) O som é produzido por ressonância. Ao soprar, você provoca a oscilação da coluna de ar acima da superfície da água.

b) O som é produzido por ressonância. Ao soprar, você provoca a oscilação da água colocada dentro da garrafa.

c) O som é produzido por difração. Ao soprar, o som contorna o obstáculo (boca da garrafa) e penetra na água, fazendo-a vibrar.

d) O som é produzido por refração. Ao penetrar na água dentro da garrafa, a velocidade do som aumenta e produz um som audível.

Em construção

Veja comentários e resposta da atividade desta seção no Manual do Professor.



Corbis/Latinstock

Retrato de Christiaan Huygens (1629-1695).

Christiaan Huygens

Christiaan Huygens, matemático, físico e astrônomo holandês, nasceu em uma família abastada e seus primeiros estudos foram feitos em casa com professores particulares. Posteriormente, estudou Direito na Universidade de Leyden, na Holanda.

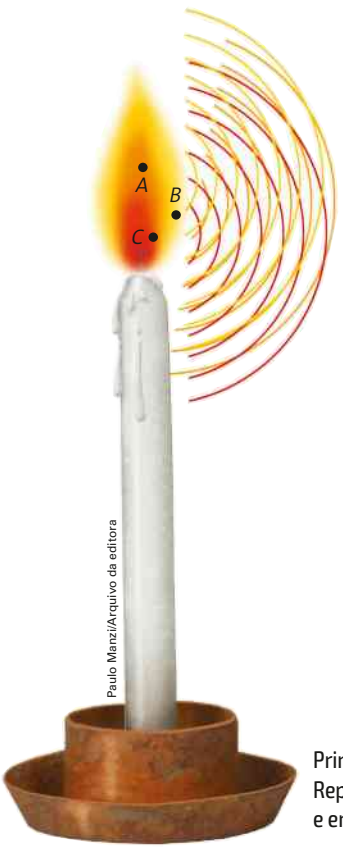
Contemporâneo do físico e matemático inglês Isaac Newton (1643-1727), do matemático alemão Gottfried W. Leibniz (1646-1716), do físico inglês Robert Hooke (1635-1703) e do filósofo e matemático francês René Descartes (1596-1650), de quem recebeu lições, Huygens, incentivado por seu pai, visitou os grandes centros de cultura da época e, em Paris, França, manteve contato com o matemático Pierre Fermat (1601-1665), com o filósofo e astrônomo Pierre Gassendi (1592-1655) e com o matemático e físico Blaise Pascal (1623-1662).

Sua contribuição para a Física e a Astronomia abrange desde a construção de telescópios, com os quais, em 1655, descobriu Titã (um dos satélites do planeta Saturno), passando pela Mecânica, com as colisões entre corpos e momentos de inércia, até a teoria ondulatória da luz.

Em 1690, com a publicação do seu livro *Tratado da luz*, Huygens inscreveu seu nome como um dos grandes cientistas ao formular aquele que passou a ser conhecido como "o princípio de Huygens", relativo à propagação ondulatória: cada ponto de uma frente de onda se comporta como uma nova fonte de ondas elementares e progressivas. A linha ou a superfície que tangencia todas as ondas elementares produzidas corresponde à frente de onda em um instante posterior. O princípio de Huygens foi fundamental na explicação dos fenômenos da reflexão e de refração da luz.

Huygens foi membro da Royal Society em Londres e também da Academie Royale des Sciences, sendo considerado um dos maiores físicos do século XVII. Por ocasião de sua morte, em 1695, a Sociedade Holandesa de Ciências publicou sua obra completa.

- Qual foi a importância do trabalho de Huygens para a Ondulatória?



Paulo Manzi/Arquivo da editora

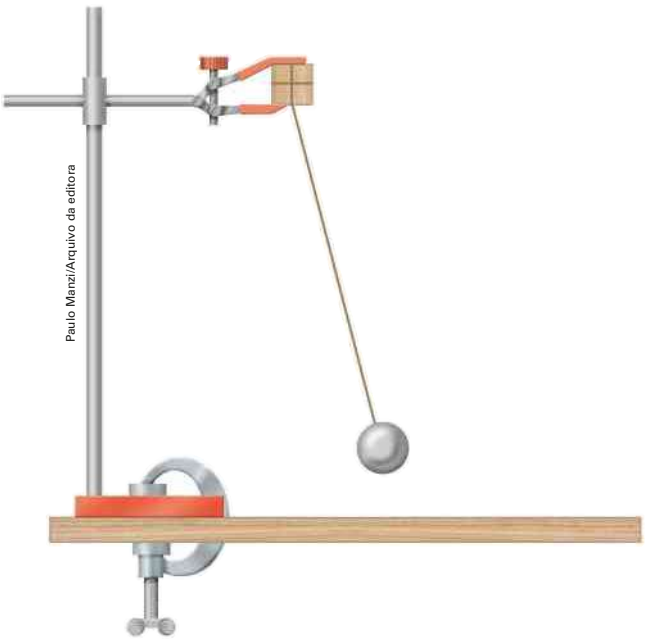
Princípio de Huygens aplicado. Representação sem escala e em cores fantasia.

Experimento

Veja comentários e respostas das atividades desta seção no Manual do Professor.

Pêndulo simples

Nesta atividade, vamos utilizar um pêndulo simples constituído por um fio (linha de pescar), de comprimento ℓ, e um corpo, de massa m, preso à extremidade desse fio, que será colocado para oscilar, conforme a figura.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Representação (sem escala e em cores fantasia) do experimento.

Como varia o período do pêndulo em função da amplitude do movimento do corpo oscilante?

Para responder a essa pergunta, você pode medir, com um cronômetro, o tempo de 10 oscilações completas do pêndulo, para três ou quatro valores diferentes de amplitude.

Como você pode verificar a dependência do período do pêndulo em função da massa do corpo oscilante?

Discuta com os colegas e realize as medidas necessárias para responder à questão. Sugerimos que você faça sempre a medida do intervalo de tempo de 10 oscilações.

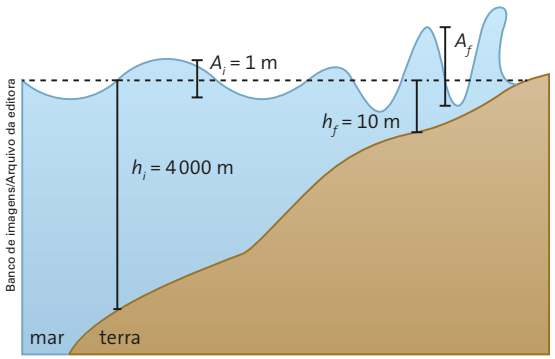
Finalmente, responda: como varia o período do pêndulo em relação ao comprimento do fio? Para isso, você pode efetuar quatro ou cinco medidas do período do pêndulo, sempre de 10 oscilações completas, variando o comprimento do fio.

1. Em todas as etapas da atividade, sugerimos medir o intervalo de tempo de 10 oscilações completas. Nessas condições, como você determina o período do pêndulo?
2. Qual é a vantagem de se efetuar a medida de 10 oscilações, e não a de uma única oscilação completa?
3. Como varia o período do pêndulo em função:
   a) da amplitude de oscilação?
   b) da massa pendular?
   c) do comprimento do fio?
4. Utilize um dos resultados obtidos para o período (T) do pêndulo e determine o valor da aceleração da gravidade no local da atividade. Compare seu valor obtido com $g = 9{,}8\ m/s^2$. Explique as diferenças, se houver.

Retomando

Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resolução dos exercícios deste capítulo.

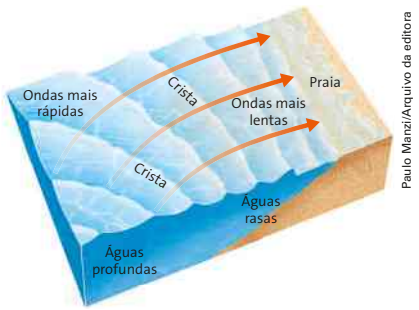
19. (UFBA) Em 11 de março de 2011, após um abalo de magnitude 8,9 na escala Richter, ondas com amplitudes gigantes foram geradas no Japão.
Tsunamis podem ser causados por deslocamento de uma falha no assoalho oceânico, por uma erupção vulcânica ou pela queda de um meteoro. O *tsunami*, em alto mar, tem amplitude pequena, mas, mesmo assim, transporta muita energia.
Sabe-se que a velocidade de propagação da onda, na superfície da água, é dada por $v = \sqrt{gh}$ em que g é o módulo da gravidade e h, a profundidade da onda, que o comprimento de onda diminui com a redução da profundidade e que a sua energia que se propaga na superfície da água é simplificadamente dada por $E = kvA^2$, em que k é uma constante, v é a velocidade de propagação da onda na superfície da água, e A é a amplitude da onda.



Da análise da figura e supondo que a onda se propaga sem nenhuma perda de energia, calcule:

- a velocidade da onda em $h_i = 4\,000{,}0$ m de profundidade e em $h_f = 10{,}0$ m de profundidade, onde o módulo da aceleração da gravidade é igual a 10 m/s²; $v = 10$ m/s
- a amplitude da onda, A_f, em 10,0 m de profundidade, sabendo que a amplitude da onda, A_i, em 4 000,0 m de profundidade é 1,0 m. $A_f = 4{,}5$ m

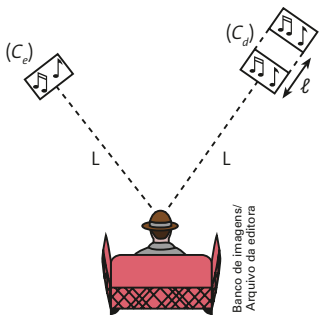
20. (Vunesp-SP) A figura representa ondas chegando a uma praia. Observa-se que, à medida que se aproximam da areia, as cristas vão mudando de direção, tendendo a ficar paralelas à orla. Isso ocorre devido ao fato de que a parte da onda que atinge a região mais rasa do mar tem sua velocidade de propagação diminuída, enquanto a parte que se propaga na região mais profunda permanece com a mesma velocidade até alcançar a região mais rasa, alinhando-se com a primeira parte.



O que foi descrito no texto e na figura caracteriza um fenômeno ondulatório chamado:

a) reflexão.
b) difração.
x c) refração.
d) interferência.
e) polarização.

21. (Fuvest-SP) O Sr. Rubinato, um músico aposentado, gosta de ouvir seus velhos discos sentado em uma poltrona. Está ouvindo um conhecido solo de violino quando sua esposa Matilde afasta a caixa acústica da direita (C_d) de uma distância ℓ, como visto na figura abaixo.



Em seguida, o Sr. Rubinato reclama: — *Não consigo mais ouvir o Lá do violino, que antes soava bastante forte!* Dentre as alternativas abaixo para a distância ℓ, a única compatível com a reclamação do Sr. Rubinato é:

x a) 38 cm.
b) 44 cm.
c) 60 cm.
d) 75 cm.
e) 150 cm.

Note e adote:

O mesmo sinal elétrico do amplificador é ligado aos dois alto-falantes, cujos cones se movimentam em fase.

A frequência da nota Lá é 440 Hz.
A velocidade do som no ar é 330 m/s.
A distância entre as orelhas do Sr. Rubinato deve ser ignorada.

CAPÍTULO 7

Acústica

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

Ale Silva/Futura Press



Orquestra Sinfônica Brasileira (OSB), no Theatro Municipal do Rio de Janeiro (RJ), 2013.

Uma orquestra sinfônica é composta, basicamente, de instrumentos de corda (violino, viola, violoncelo e harpa), de madeira (flauta, oboé, clarinete e fagote), de percussão (tímpano, triângulo, bumbo e prato), de teclas (piano e órgão), além dos metais (trompete, trombone e tuba).
Como conseguimos identificar cada um dos instrumentos musicais quando eles são tocados juntos?

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Sons, ultrassons e infrassons

Quando misturamos duas ondas luminosas puras, como a vermelha e a amarela, nossa visão não as percebe separadamente; o que vemos é uma onda na cor alaranjada.

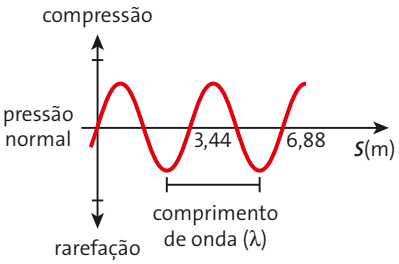
E o que dizer de nossa audição? A orelha humana possui uma sensibilidade que, além de nos permitir captar sons de baixa intensidade, possibilita que identifiquemos vários sons diferentes, mesmo que os recebamos simultaneamente. Por exemplo, em uma apresentação de uma orquestra, nossas orelhas captam vários sons presentes no ambiente, desde os instrumentos de cordas e de sopro até os de percussão. Para conseguir identificar todos os instrumentos, a orelha deve estar bem treinada, como a de um maestro.

Se pensarmos na Pré-História, podemos imaginar o homem primitivo (nosso ancestral) usando seus agudos sentidos até o limite, principalmente o olfato e a audição, numa noite escura, tateando entre as folhagens, à caça de um animal qualquer. Provavelmente, um dos fatores que contribuíram para a sobrevivência da espécie humana foi a capacidade auditiva.

Mas como conseguimos ouvir os sons? Para responder a essa questão, precisamos estabelecer que o termo **som** se refere às ondas mecânicas longitudinais que se propagam no ar e em outros meios, e que sensibilizam nossa audição.

Quando uma pessoa fala, como sua professora (**figura 7.2**), ela coloca as pregas vocais em vibração, o que produz no ar regiões de alta pressão (compressões) e de baixa pressão (rarefações), como no gráfico da **figura 7.1**.

Pressão de uma onda sonora em função da distância



Banco de imagens/Arquivo da editora

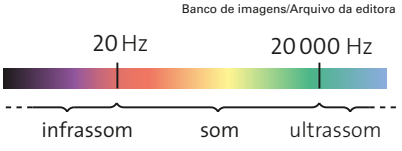
Figura 7.1



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.2 O som produzido pelas pregas vocais de uma pessoa propaga-se como uma onda longitudinal, provocando compressões e rarefações (regiões de alta e de baixa pressão) no ar.

Essas alternâncias propagam-se como uma onda sonora e, eventualmente, podem atingir as orelhas de uma pessoa. A sensibilidade da orelha humana varia de pessoa para pessoa e, na mesma pessoa, varia com a idade. Os parâmetros médios adotados são 20 Hz como frequência mínima audível e 20 000 Hz como frequência máxima audível. Abaixo de 20 Hz, as vibrações são denominadas infrassom e, acima de 20 000 Hz, ultrassom (**figura 7.3**).



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.3 Sons entre 20 Hz e 20 000 Hz são audíveis para seres humanos.

Osni de Oliveira/ Arquivo da editora

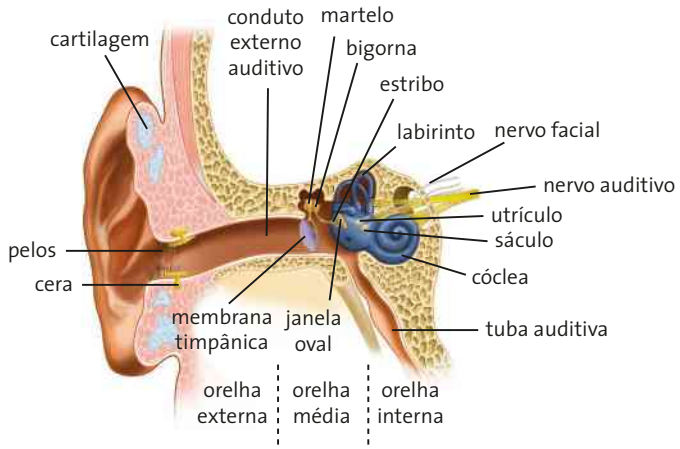


Figura 7.4 Representação (sem escala e em cores fantasia) da anatomia da orelha humana.

Fonte: University Physics 12th ed. Young & Freedman. Pearson/Addison Wesley, Nova York, 2009. p. 530.

Na **figura 7.4** temos a ilustração da anatomia da orelha humana.

O pavilhão auditivo (orelha) e o canal auditivo constituem a orelha externa; a membrana timpânica e os ossículos (martelo, bigorna e estribo), que são os menores ossos do corpo humano, formam a orelha média; e a cóclea e os canais semicirculares formam a orelha interna.

Quando um som audível atinge a orelha, ele penetra pelo canal auditivo e produz vibrações na membrana timpânica. Esta, por sua vez, provoca oscilações nos ossículos e, por meio do estribo, essas oscilações atingem a orelha interna. Na cóclea, as oscilações são transformadas em impulsos elétricos que são conduzidos ao cérebro. No cérebro, cada impulso é codificado, e o som é identificado.

Por ser uma onda mecânica, a velocidade de propagação do som normalmente é maior nos sólidos que nos líquidos, e maior nos líquidos que nos gases. Nos gases, a velocidade do som não depende da pressão, praticamente não depende da frequência e do comprimento de onda, porém depende da temperatura. Já no vácuo, não há propagação do som, uma vez que se trata de onda mecânica.

A **tabela 7.1** apresenta alguns exemplos de velocidades do som em diferentes meios.

Tabela 7.1 Velocidade do som em diferentes meios

Material	**Velocidade do som** (m/s)
Ar (a 20°C)	344
Hélio (a 20°C)	999
Hidrogênio (a 20°C)	1330
Água (a 20°C)	1482
Alumínio	6420
Ferro	1960
Aço	5941

Fonte: YOUNG & FREEDMAN. *University Physics*. 12th ed. (v. p. 162). Nova York: Pearson/Addison Wesley, 2009. p. 534.

A equação fundamental da ondulatória, que relaciona a velocidade de propagação, a frequência e o comprimento de onda, é válida para as ondas em geral e, portanto, também para as ondas sonoras:

$$v = \lambda \cdot f$$

De acordo com a equação fundamental, para um mesmo meio (mesma velocidade), sons de altas frequências (sons agudos) apresentam comprimentos de onda menores que os sons de baixas frequências (sons graves).

As ondas sonoras podem sofrer reflexão, refração, interferência, difração e ressonância. Elas somente não podem ser polarizadas, pois são ondas longitudinais e a polarização é um fenômeno que afeta exclusivamente as ondas transversais.

Assim como os seres humanos, muitos animais utilizam ondas sonoras para se comunicar. Os elefantes, por exemplo, utilizam em sua comunicação sons de frequências extremamente baixas, situadas entre 20 Hz e 40 Hz. Embora esses sons ainda estejam na faixa de sons audíveis para os seres humanos, eles podem ser classificados em **infrassons**. Para nós, a comunicação entre os elefantes está mais para uma vibração do que para um som propriamente dito.

Já os morcegos emitem ondas sonoras com frequências da ordem de 100 000 Hz, denominadas **ultrassons**. Após sofrer reflexão em um objeto, que pode ser um inseto em movimento, as ondas, ao serem captadas pelo morcego, possibilitam a localização exata desse objeto (**figura 7.5**). No caso de objetos em movimento, além da reflexão, temos o efeito Doppler, que será visto ainda neste capítulo.

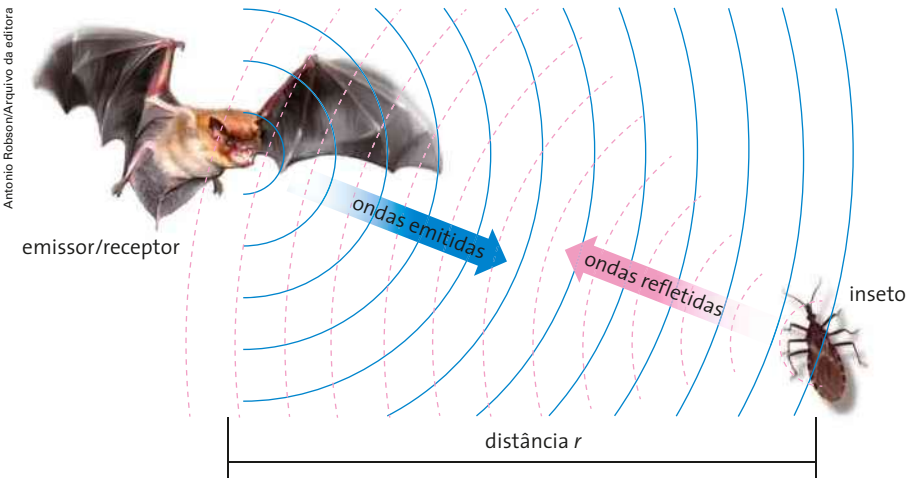


Figura 7.5 Quando um morcego localiza um inseto, dois fenômenos ondulatórios estão presentes: a reflexão e o efeito Doppler. Representação sem escala e em cores fantasia.

Os golfinhos também se valem da reflexão dos ultrassons para se orientar e localizar pequenos objetos dentro da água. Como na água a velocidade do som é da ordem de 1500 m/s, e os golfinhos emitem sons com frequências da ordem de 100 000 Hz, eles conseguem detectar objetos com 1,5 cm, valor que corresponde ao comprimento de onda do som emitido.

Um dos motivos para as ondas sonoras de alta frequência (ultrassons) serem usadas em diversos ramos de pesquisa e, principalmente, na Medicina, está relacionado ao fato de o ultrassom apresentar comprimento de onda pequeno, da ordem de milímetros. Desse modo, ele é refletido por objetos pequenos. Vejamos um exemplo numérico. Os aparelhos de ultrassom utilizados na Medicina emitem ondas com frequências ao redor de 5 MHz (5 000 000 Hz).

Considerando o corpo humano como um meio aquoso, pois 70% da constituição é água, a velocidade do ultrassom é de aproximadamente 1500 m/s e o comprimento de onda correspondente é da ordem de 0,3 mm. Isso significa que a resolução da imagem obtida é de 0,3 mm (décimos de milímetros), o que permite ao médico um diagnóstico mais preciso (**figura 7.6**).


Monkey Business Images/Shutterstock

Figura 7.6 Acompanhar o desenvolvimento e descobrir o sexo do bebê antes do nascimento são algumas das utilidades dos exames ultrassom. Com essa técnica, a Medicina ganhou um poderoso aliado em vários ramos, além da possibilidade de acompanhar uma gestação.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

1. Suponha que uma onda sonora, propagando-se no ar com velocidade de 330 m/s e com frequência de 1000 Hz, penetre na água. Com base na **tabela 7.1** e na equação fundamental da ondulatória, e lembrando que a frequência de uma onda é determinada pela fonte emissora, verifique se cada afirmativa seguinte é correta ou errada.

I. No ar, o comprimento de onda da onda sonora é de 33 cm. Correta.

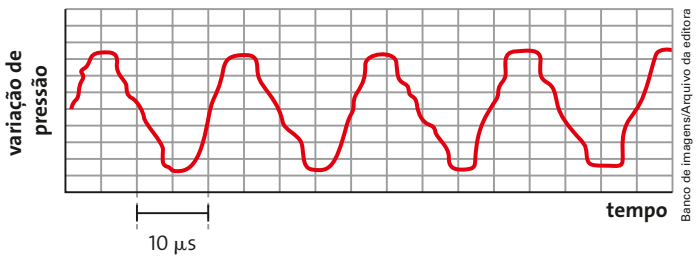
II. Na água, a frequência da onda sonora é de 1000 Hz. Correta.

III. Na água, a velocidade da onda sonora é superior a 330 m/s e o comprimento de onda é inferior a 33 cm. Errada.

IV. Na água, o comprimento de onda da onda é de 1,48 m. Correta.

2. Nos filmes de faroeste dos anos 1950 e 1960, era comum um índio verificar a aproximação de um trem (cavalo de ferro) colocando a orelha no trilho. Explique por que esse procedimento é mais eficaz do que ouvir a aproximação do trem pelo ar. O som chega antes e com mais intensidade.

3. (Fuvest-SP) O som de um apito é analisado com o uso de um medidor que, em sua tela, visualiza o padrão apresentado na figura abaixo. O gráfico representa a variação de pressão que a onda sonora exerce sobre o medidor, em função do tempo, em μs (1 μs = 10^{-6} s).



Banco de imagens/Arquivo da editora

Seres vivos	Intervalos de frequência
cachorro	15 Hz – 45 000 Hz
ser humano	20 Hz – 20 000 Hz
sapo	50 Hz – 10 000 Hz
gato	60 Hz – 65 000 Hz
morcego	1000 Hz – 120 000 Hz

Analisando a tabela de intervalos de frequências audíveis acima, por diferentes seres vivos, conclui-se que apito pode ser ouvido apenas por:

a) seres humanos e cachorros.

b) seres humanos e sapos.

c) sapos, gatos e morcegos.

X d) gatos e morcegos.

e) morcegos.

4. Na busca de alimentos, os morcegos emitem ultrassons cujos comprimentos de onda são aproximadamente iguais ao comprimento do inseto procurado. Se um morcego emite uma onda na frequência de 60 000 Hz, qual é o menor tamanho de inseto que ele consegue detectar?
Considere a velocidade do ultrassom no ar igual a 300 m/s. $c = 5$ mm

5. A seguir apresentamos um modo prático de você determinar a que distância, aproximadamente, se encontra uma tempestade. No instante em que você vê um relâmpago comece a contar pausadamente (1, 2, 3, 4...) e pare de contar no instante em que você ouvir o trovão correspondente. Cada número contado corresponde, aproximadamente, a 300 m. Assim, se você contar até 3, a tempestade está a 900 m de você; se contar até 5, ela está a 1500 m (1,5 km), e assim sucessivamente.
Considerando que a velocidade da luz no ar é de 300 000 km por segundo e a do som, 300 m por segundo, explique por que o método acima pode ser considerado válido. O tempo de propagação da luz é desprezível e a distância está relacionada com a velocidade do som no ar.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

2 Reverberação e eco

Todas as nossas sensações correspondem a uma combinação entre os órgãos sensitivos e a nossa mente. Elas não são instantâneas; começam, duram um pequeno intervalo de tempo e acabam. Um exemplo é a dor de uma alfinetada: retirado o alfinete (estímulo), ela ainda continua por certo tempo.

A compreensão dessa característica é o ponto básico para entendermos os fenômenos denominados **reverberação** e **eco**. O intervalo de tempo que dura o som é chamado de **remanescência**. Vamos admitir que, recebida uma vibração auditiva, por mais curta que seja, para o ser humano percebê-la ela deve perdurar um décimo de segundo.

Suponhamos que uma pessoa receba dois sons emitidos de uma mesma fonte. O primeiro vem diretamente da fonte, enquanto o segundo é refletido numa barreira qualquer.

Se a pessoa receber o segundo som, idêntico ao primeiro, mas menos intenso, antes que termine o tempo de remanescência do anterior, haverá uma superposição de ambas as sensações (gráfico da figura 7.7), resultando numa sensação única, mais intensa e prolongada, chamada **reverberação do som**.

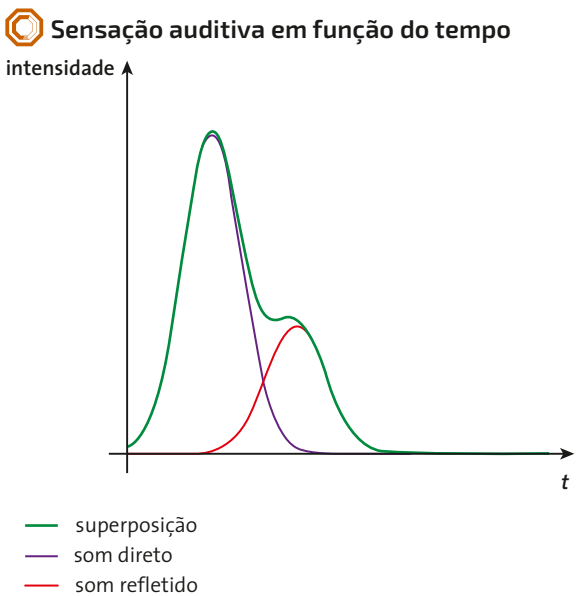


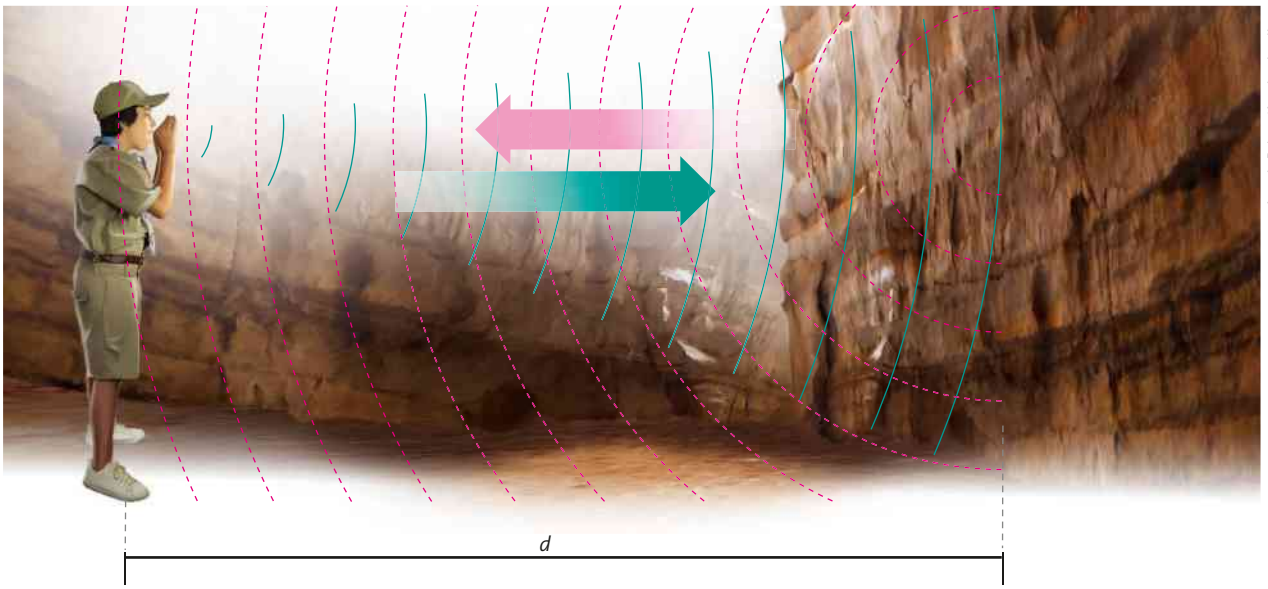
Figura 7.7 Na região do gráfico em que há superposição das ondas ocorre a reverberação.

É o tempo de remanescência que nos dá a ideia das dimensões do ambiente em que um som se propaga. Quando conversamos em campo aberto, não há reforço para o som direto, o que faz nossa voz parecer mais fraca e os sons, mais curtos.

O tempo de reverberação poderá ser prolongado se tivermos vários sons refletidos. Duas superfícies frontais lisas e rígidas favorecem a ocorrência desse fenômeno.

Se o som refletido chegar ao receptor com um atraso maior do que o tempo de remanescência, temos o fenômeno denominado **eco**.

Analisemos o caso de uma pessoa que esteja de frente para uma barreira (figura 7.8).



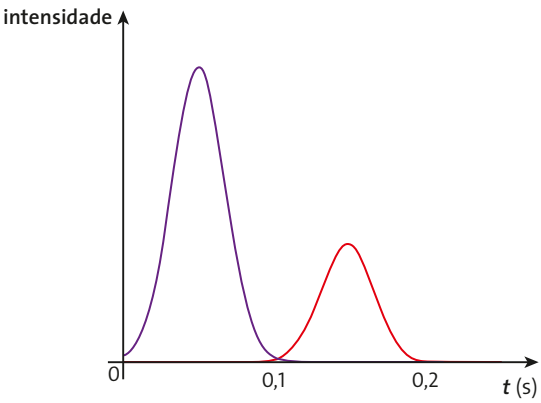
Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.8 O som emitido pela pessoa sofre reflexão e retorna a ela. Representação sem escala e em cores fantasia.

Ela pode ouvir o som de sua própria voz de dois modos: diretamente ou refletido na barreira. O som direto chega imediatamente, enquanto o refletido deve percorrer a distância d até chegar à barreira e a mesma distância d para retornar à pessoa. O som refletido chega até a pessoa num intervalo de tempo dado por:

$$\Delta t = \frac{2d}{v_{som}}$$

Sensação auditiva em função do tempo – eco



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.9 Na região indicada em vermelho no gráfico ocorre o eco.

Se esse intervalo de tempo for maior que 0,1 s, que é o tempo de remanescência (figura 7.9), a pessoa ouve o eco da sua própria voz.

Considerando a velocidade do som no ar, que é de 340 m/s, a distância mínima que uma pessoa deve estar de uma barreira para que ouça o eco de sua voz é:

$$\Delta t = \frac{2d}{v_{som}} \Rightarrow 0{,}1 = \frac{2d}{340} \Rightarrow d = 17 \text{ m}$$

Portanto, a distância mínima para que uma pessoa ouça o eco de sua própria voz é de 17 m.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

6. A velocidade do som na água é de cerca de 1 400 m/s. Um mergulhador golpeia um sino, debaixo da água, em frente a uma caverna, e ouve o eco do som produzido 0,1 s depois. Qual é a profundidade mínima da caverna? $h = 70$ m

7. Uma pessoa *A* golpeia uma barra de ferro com uma marreta, em ritmo uniforme, a cada 1 s. Uma outra pessoa *B* ao longe, de posse de um binóculo, vê as marretadas e ouve o som das batidas simultaneamente. Considere que a velocidade do som no ar no local do evento é de 340 m/s. Nessas condições, responda:

a) O som que a pessoa *B* ouve corresponde exatamente à martelada que ela vê pelo binóculo? Não.

b) Qual é a distância mínima entre as duas pessoas? $d = 340$ m

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

3 Intensidade, altura e timbre

Intensidade

"Abaixe esse som! Não sei como você consegue ouvir música nessa altura!"

Certamente, você já ouviu ou já disse essas frases. Elas nos remetem a uma característica do som denominada **intensidade**: as ondas sonoras podem ser mais intensas, o que caracteriza um **som forte**, ou menos intensas, caracterizando um **som fraco**.

A **intensidade *I*** mede a energia contida na onda. Ela é definida como a energia transportada pela onda por unidade de tempo e de área. Em outras palavras: a intensidade de uma onda é a potência por unidade de área. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a intensidade é dada em watt por metro quadrado (W/m^2).

A intensidade está diretamente relacionada à amplitude da onda. Para uma dada frequência, quanto maior a amplitude (a diferença de pressão entre as regiões de compressão e rarefação), maior a intensidade da onda.

Normalmente, as ondas sonoras propagam-se em todas as direções a partir da fonte de som.

Nesses casos, a intensidade da onda é inversamente proporcional ao quadrado da distância à fonte. Isso significa dizer que, se a 1 m da fonte a intensidade do som é I, a 2 m ela será $\frac{1}{4}\ I$, ou seja, dobrando-se a distância, a intensidade do som reduz-se a $\frac{1}{4}$ do valor original. Esse fato é conhecido como **lei do inverso do quadrado da distância**.

Se o som for forçado a se propagar em uma única direção, a lei do inverso do quadrado da distância não se verificará, pois a intensidade do som não diminuirá de modo acentuado. Para verificar esse fato, experimente chamar alguém que esteja distante colocando as mãos ao lado da boca, como mostra a figura 7.10. Você observará que sua voz será ouvida mais longe.



Diego Cervo/Shutterstock/Glow Images

Figura 7.10 Ao colocar a mão ao lado da boca, a pessoa conduz o som em uma única direção.

A orelha humana pode detectar sons com uma intensidade que varia, aproximadamente, de 10^{-12} W/m^2 a 1 W/m^2. Isso quer dizer que, entre a intensidade mínima (10^{-12} W/m^2) e a intensidade máxima (1 W/m^2), temos um intervalo de 10^{12} W/m^2, isto é, o valor máximo é 1 000 000 000 000 (um trilhão) de vezes o valor mínimo.

Em virtude do tamanho desse intervalo, para expressar a intensidade de um som utiliza-se uma grandeza mais apropriada, denominada **nível de intensidade ou nível sonoro** (β), em **decibel** (dB), definida pela expressão:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

Nessa expressão, I é a intensidade do som e I_0, o valor de referência ($I_0 = 10^{-12}$ W/m^2), denominado limiar da audição por ser o som mais fraco que se consegue ouvir.

A unidade decibel é uma homenagem ao cientista escocês Alexander Graham Bell (1847-1922).

Observe que, se a intensidade de um som é $I = I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 (limiar da audição), o nível sonoro β é igual a 0 dB. Se a intensidade I do som for 1 000 vezes a intensidade I_0, o nível sonoro será igual a 30 dB. A intensidade máxima para as pessoas, denominada **limiar da dor**, corresponde a um nível sonoro igual a 120 dB.

A tabela 7.2 apresenta as intensidades e os níveis sonoros de alguns eventos comuns. Sons acima de 90 dB podem causar surdez parcial e acima de 160 dB podem causar surdez total.

Tabela 7.2 Intensidade e nível sonoro de alguns sons comuns

Evento	Intensidade (W/m^2)	Nível sonoro (dB)
Limiar da audição humana	10^{-12}	0
Pessoas sussurrando	10^{-9}	30
Pessoas conversando normalmente	10^{-6}	60
Rua movimentada	10^{-5}	70
Liquidificador em funcionamento	10^{-3}	90
Show de *rock*	10^{-1}	110
Limiar da dor	1	120
Decolagem de avião a jato	10^{3}	150

Fonte: YOUNG & FREEDMAN. *University Physics*. 12th ed. Nova York: Pearson/Addison Wesley, 2009. p. 540.

Os níveis sonoros necessários para se ouvir variam de pessoa para pessoa; para uma mesma pessoa, variam com a frequência do som. De modo geral, a dependência entre a intensidade sonora (ou o nível sonoro) e a frequência do som pode ser representada pelo gráfico mostrado na figura 7.11.

Relação entre o nível sonoro e a frequência do som

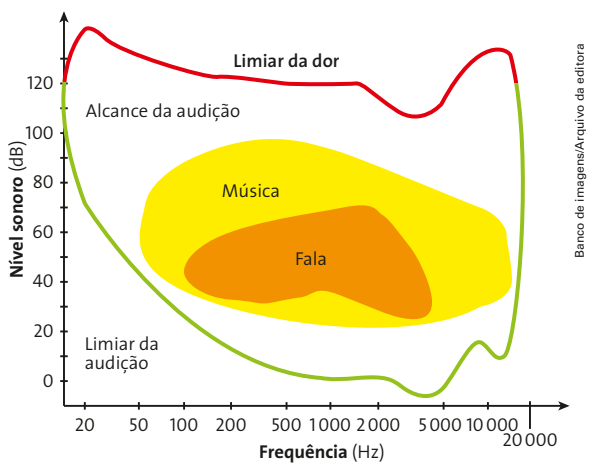


Figura 7.11 Níveis de pressão sonora para os alcances de audição, da música e da fala, de acordo com a frequência.

Fonte: Raichel, Daniel R. *The Science and applications of acoustics*. 2. ed. Nova York: Springer, 2006.

Observe no gráfico que a linha superior (vermelha) indica o limiar da dor e a linha inferior (verde), o limiar da audição. O limiar da audição apresenta grande dependência da frequência, e o valor de 0 dB está limitado a uma faixa de, aproximadamente, 2 000 Hz a 5 000 Hz. Os seres humanos são mais sensíveis às ondas sonoras com frequências da ordem de 3 500 Hz. Por outro lado, o limiar da dor apresenta pequena variação com a frequência, assumindo o valor de 120 dB, praticamente desde 40 Hz até 10 000 Hz.

Exercício resolvido

1. Com base na **figura 7.11**, responda às seguintes questões:

a) No limiar da audição, qual é o valor do nível sonoro (nível de intensidade) para um som com frequência de 100 Hz? E para um som com frequência de 10 000 Hz?

b) Para qual valor de frequência o limiar da dor apresenta o menor nível sonoro?

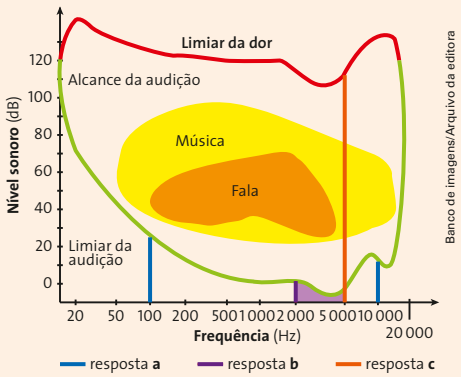
c) Suponha que uma escola utilize um serviço de alto-falantes nos intervalos das aulas. Se um professor for dar um aviso pelo alto-falante, que faixa de frequência ele deverá usar para que seja ouvido pela maior parte das pessoas?

Resolução:

a) No gráfico, observamos que, no limiar da audição, para uma frequência de 100 Hz, o nível sonoro é aproximadamente 25 dB. E, para uma frequência de 10 000 Hz, o nível sonoro é aproximadamente 18 dB. No gráfico ao lado destacamos esses dois pontos.

b) Em relação ao limiar da dor (linha vermelha), observamos no gráfico ao lado que o nível sonoro varia pouco com a frequência; no entanto, o menor nível sonoro, que é da ordem de 112 dB, ocorre para uma frequência de aproximadamente 4 000 Hz.

c) O professor deverá usar uma faixa de frequência para a qual a sensibilidade da audição humana seja maior, isto é, que corresponda aos menores valores dos níveis sonoros no limiar da audição. Analisando o gráfico da página anterior, observamos que isso ocorre para frequências entre 2 000 Hz e 5 000 Hz, conforme mostra o gráfico a seguir.



Veja resposta desta questão no Manual do Professor.

Altura

Outra grandeza física fundamental para a caracterização de um som é a **altura**. A altura de um som não está relacionada a ele ser alto ou baixo, mas, sim, ao fato de ela nos permitir diferenciar um som grave de um agudo. Sons **graves** são sons de **baixa frequência** e sons **agudos**, de **alta frequência**. Normalmente, a voz de um homem é classificada como um som grave e a voz da mulher, como um som agudo.

Em condições normais, em determinado meio, a velocidade de propagação de um som é a mesma, independentemente da frequência. Lembrando que a velocidade é igual ao produto da frequência pelo comprimento de onda, temos que os sons graves (**figura 7.12.a**) possuem comprimentos de onda maiores do que os agudos (**figura 7.12.b**).

Para refletir

Você concorda com as frases de abertura deste tópico: "Abaixe esse som! Não sei como você consegue ouvir música nessa altura!"? Explique.

Timbre

Uma terceira grandeza utilizada para caracterizar um som é o **timbre**, que nos permite distinguir entre sons de mesma frequência (altura) e de mesma intensidade, emitidos por fontes diferentes. Por exemplo, percebemos se uma mesma nota musical é produzida por um piano ou por um violino (**figura 7.13**) porque eles têm timbres diferentes, produzindo sensações diferentes em nosso sistema auditivo.

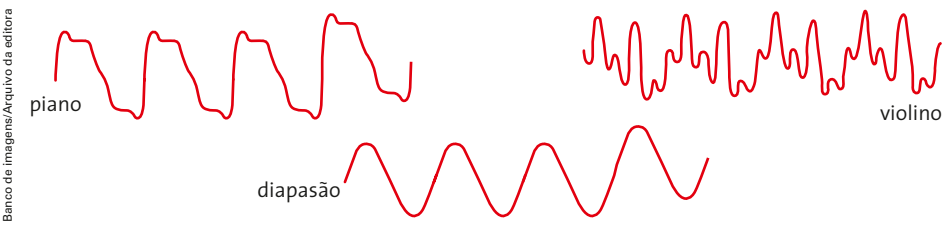


Figura 7.13 Representação das diferentes formas das ondas da mesma nota musical (lá fundamental – 440 Hz) tocada em um violino, ao piano e no diapasão.

Fonte: OKUNO, Emiko et al. *Física para ciências biológicas e biociências*. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982. p. 228.





Figura 7.12 Paulo Szot (**a**) e Carmen Monarcha (**b**), ambos cantores líricos brasileiros.

Observe o formato das ondas mostradas na **figura 7.13**. São ondas complexas. Isso acontece porque a maioria dos sons musicais não é constituída por único som, mas sim por uma superposição de vários sons com frequências diferentes. O som de frequência mais baixa é chamado de **fundamental**, e os demais, que possuem frequências múltiplas da fundamental, são chamados de **harmônicos** (**figura 7.14.a**). Assim, uma mesma nota musical pode resultar de uma composição do som fundamental com amplitudes relativas de harmônicos diferentes (**figura 7.14.b**), dependendo do instrumento que a emitiu. Isso dá à nota uma qualidade característica, ou seja, o seu timbre.

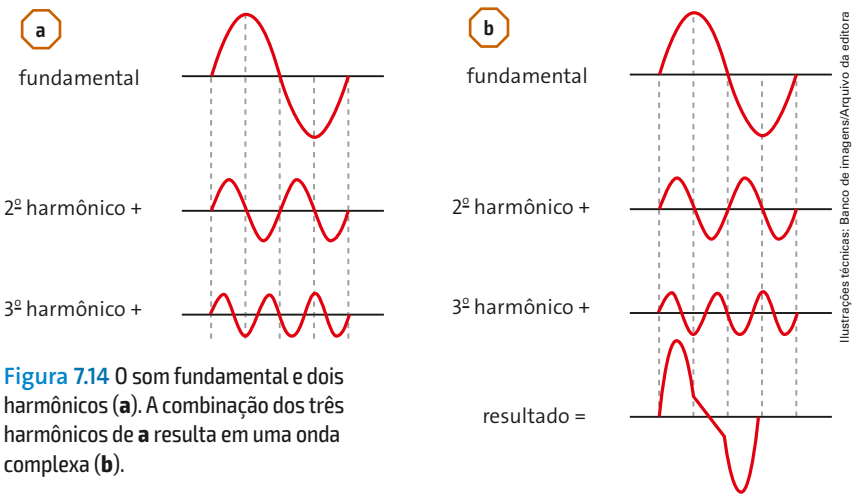


Figura 7.14 O som fundamental e dois harmônicos (**a**). A combinação dos três harmônicos de **a** resulta em uma onda complexa (**b**).

Trabalho em equipe

Sob a orientação do professor, reúna-se com sua equipe. Primeiro, peça a cada integrante do grupo que registre sua voz em um gravador. Em seguida, à medida que as gravações vão sendo executadas, vocês devem identificar de quem é cada voz. Normalmente, identificamos a voz das outras pessoas, mas estranhamos a nossa. Por que isso acontece? Converse com o professor a respeito.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

8. Utilizando a **tabela 7.2**, responda às questões a seguir.

a) Se a intensidade de uma onda sonora for multiplicada por 100, qual será o aumento no nível sonoro, em decibel? $\beta = 20$ dB

b) O nível sonoro de um liquidificador em funcionamento é o triplo daquele de uma pessoa sussurrando. Podemos dizer que a intensidade sonora também é o triplo? Justifique. Não, pois a escala não é linear.

9. Utilize o gráfico da **figura 7.11** para responder às questões a seguir.

a) Para qual valor de frequência o limiar da dor apresenta o maior nível sonoro? $f \simeq 1000$ Hz

b) Para ouvirmos um som de frequência 40 Hz, o nível sonoro deve ser maior ou menor que 40 dB? Maior.

c) Para uma pessoa ouvir um som de frequência próxima de 20 000 Hz, a intensidade deve estar próxima de 10^{-12} W/m^2 ou de 10^{0} W/m^2? $I = 10^{0}$ W/m^2

10. A intensidade dos terremotos também é medida em uma escala logarítmica, como as ondas sonoras. Assim, um terremoto de magnitude 4 é 10 vezes mais intenso do que um outro de magnitude 3 e 100 vezes mais intenso do que um de magnitude 2. Qual é a relação entre as intensidades de um terremoto de magnitude 6 e outro de magnitude 2?
10 000 vezes, ou seja, 10^4 vezes.

11. Qual é a grandeza física que usamos para diferenciar um som alto de um baixo? E um som forte de um fraco?
Altura; intensidade.

12. Em cada uma das afirmações seguintes, qual é a característica (intensidade, altura ou timbre) que diferencia cada um dos sons emitidos?

I. Dois instrumentos musicais diferentes emitem uma mesma nota musical. Timbre.

II. Dois instrumentos iguais emitem uma mesma nota musical, porém o volume de uma delas é maior do que o da outra. Intensidade.

III. Um mesmo instrumento musical emite duas notas musicais diferentes. Altura.

IV. A voz grave de um cantor possui frequência menor que a voz aguda de uma cantora. Altura.

V. Um violino e um piano emitem um som fundamental de mesma frequência e de mesma intensidade. Timbre.

13. Sabendo que o som do grito de uma criança é considerado forte e agudo, classifique os seguintes sons:

a) do escapamento de uma moto acelerada ao máximo; Forte e ruidoso grave.

b) das turbinas de um avião decolando; Forte e ruidoso agudo.

c) do ronco de uma pessoa dormindo; Fraco e grave.

d) das batidas de um martelo contra um pedaço de ferro. Forte e agudo.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

4 Cordas vibrantes

Nos instrumentos de corda (**figura 7.15**) – violão, violino, guitarra, piano, etc. – o som musical é produzido por cordas vibrantes.



Kwest/Shutterstock/Glow Images

Rprongjai/Shutterstock/Glow Images

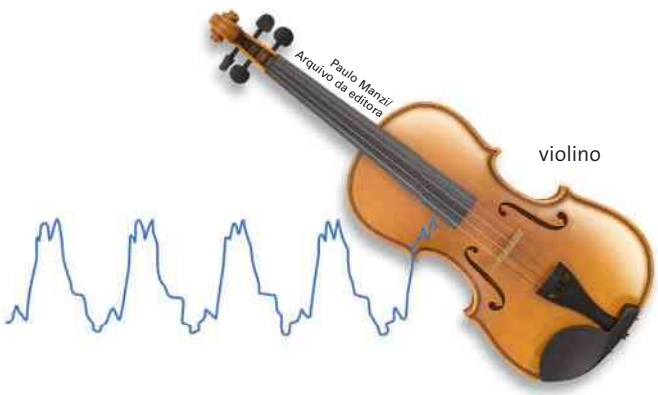
Dmitry Skutin/Shutterstock/Glow Images

Marius de Graf/Shutterstock/Glow Images

Figura 7.15 Alguns exemplos de instrumentos de corda: piano (**a**), violão (**b**), violino (**c**) e guitarra (**d**).

Tomemos como exemplo o violino. Quando um violinista faz uma corda vibrar, obtém-se uma onda estacionária complexa que é composta do som fundamental e de alguns de seus harmônicos (**figura 7.16**).

As imagens desta página não estão representadas em proporção.



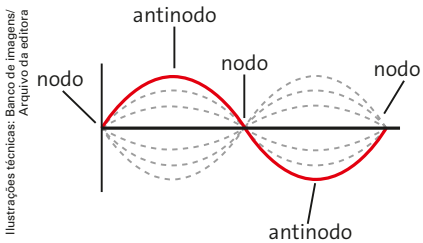
Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 7.16 Quando o violinista faz uma corda oscilar, com a frequência fundamental podem estar presentes várias frequências harmônicas superiores. Representação sem escala e em cores fantasia.

Essa vibração, amplificada pela caixa acústica do instrumento, gera ondas de pressão (compressão e rarefação) no ar, com a mesma frequência. Essas ondas atingem as nossas orelhas e provocam uma sensação auditiva correspondente ao som emitido pela corda. A presença dos harmônicos, com o fundamental, enriquece o som, tornando-o agradável às nossas orelhas.

De modo geral, uma corda vibrante é constituída por uma corda presa em ambas as extremidades e colocada para vibrar. A perturbação produzida num ponto qualquer entre os extremos da corda se propaga para as duas extremidades.

Nas extremidades, as perturbações são refletidas e voltam em sentidos contrários, sucessivamente. Forma-se, então, uma onda estacionária. Como as extremidades da corda são fixas, não vibram, constituindo os nós. Entre dois nós temos, pelo menos, um ventre, conforme mostra a figura 7.17.



Ilustrações técnicas: Banco de imagens/ Arquivo da editora

Figura 7.17 Quando uma corda vibra no estado fundamental, o comprimento de onda é o dobro do comprimento (L) da corda. O deslocamento vertical da corda (ventre) está exagerado, se comparado a uma corda de violão.

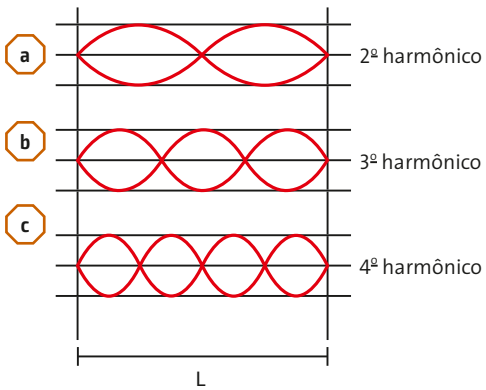


Figura 7.18 Modos de vibração de uma corda fixa nas extremidades: segundo (**a**), terceiro (**b**) e quarto harmônicos (**c**).

Esse é o modo mais simples de uma corda vibrar e corresponde à menor frequência de oscilação; ele é chamado de **modo fundamental** ou **primeiro harmônico**. Observe que, no modo fundamental, o comprimento de onda da onda é o dobro do comprimento da corda, ou seja, $\lambda_1 = 2 \cdot L$.

A corda também pode vibrar de outros modos. Por exemplo: entre os extremos, que sempre são nós, podemos ter mais um nó no meio da corda, ou seja, dois ventres; dois nós (três ventres); e assim por diante. Generalizando, uma corda pode vibrar com n ventres entre os dois extremos, conforme mostra a figura 7.18.

Quando a corda vibra com dois ventres entre os extremos, temos o **segundo harmônico** (figura 7.18.a); com três ventres, o **terceiro harmônico** (figura 7.18.b), e assim sucessivamente.

Uma vez que a velocidade de propagação da onda é a mesma para todos os modos de vibração, quanto maior o número de ventres entre os extremos, menor o comprimento de onda e maior a frequência.

As vibrações subsequentes à fundamental possuem frequências múltiplas do primeiro harmônico (fundamental) e são chamadas de **frequências harmônicas**. A que determina o som emitido (uma nota musical, por exemplo) é a frequência do modo fundamental.

Conhecendo-se o comprimento L da corda e a velocidade v de propagação da onda nessa corda, podemos determinar as frequências harmônicas por meio da expressão:

$$f = n \cdot \frac{v}{2L}$$

Nessa expressão n é um número inteiro que determina a ordem do harmônico: $n = 1; 2; 3; 4; ...$

Na **tabela 7.3** apresentamos as frequências harmônicas, as relações entre elas, a fundamental e o comprimento de onda para cada modo de vibração.

Tabela 7.3 Frequências harmônicas e comprimentos de onda numa corda

n	Harmônico	Frequência harmônica	Relação entre a frequência harmônica e a fundamental	Comprimento de onda de cada modo
1	primeiro (fundamental)	$f_1 = \frac{v}{2L}$	1	$\lambda_1 = 2L$
2	segundo	$f_2 = \frac{v}{L}$	$f_2 = 2f_1$	$\lambda_3 = L$
3	terceiro	$f_3 = \frac{3v}{2L}$	$f_3 = 3f_1$	$\lambda_4 = \frac{2L}{3}$
4	quarto	$f_4 = \frac{2v}{L}$	$f_4 = 4f_1$	$\lambda_5 = \frac{L}{2}$

Observe que, para uma corda de comprimento L, a frequência harmônica é diretamente proporcional à velocidade com que a onda se propaga transversalmente na corda. Como vimos, a velocidade de uma onda depende do meio no qual ela se propaga. No caso de ondas em cordas, duas grandezas físicas são fundamentais na determinação da velocidade de propagação da onda: a tensão (T) na corda e sua massa por unidade de comprimento, denominada **densidade linear** (μ).

Quanto maior a tensão na corda, maior a velocidade de propagação da onda. Por outro lado, para cordas de mesmo comprimento, quanto maior a massa (corda mais grossa), maior a sua densidade linear – a relação entre a massa e o comprimento da corda $\left(\mu = \frac{m}{L}\right)$ – e menor a velocidade de propagação da onda.

Pode-se demonstrar, com base no teorema do impulso, que a velocidade de propagação de uma onda transversal em uma corda é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Veja resposta desta questão no Manual do Professor.

Para refletir

Demonstre, utilizando o teorema do impulso, a relação: $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$

Vejamos como um músico utiliza todos esses conhecimentos para tocar uma melodia, superpondo o som fundamental com diferentes harmônicos.

No violão (**figura 7.19**), por exemplo, existem cordas de diferentes espessuras que podem ser submetidas a diferentes tensões (**figura 7.20**). Com as cordas mais grossas (maior densidade linear), conseguem-se sons mais graves, menor frequência; com as mais finas, conseguem-se sons mais agudos, maior frequência.



Rprongjai/Shutterstock/Glow Images

Figura 7.19 Estrutura de um violão.


Asaf Eliason/Shutterstock/Glow Images

Figura 7.20 Cada espessura recebe uma tensão específica.


Brian Weed/Shutterstock/Glow Images

Figura 7.21 Para afinar um violão, o músico gira as cravelhas, deixando as cordas mais ou menos tracionadas.


Silver John/Shutterstock/Glow Images

Figura 7.22 Os dedos posicionados sobre as cordas em diferentes posições no braço do instrumento regulam o comprimento da corda, fazendo com que a frequência do som obtido varie.

Com as roscas, denominadas cravelhas ou tarraxas, o músico faz o ajuste para cada corda (**figura 7.21**). Aumentando a tensão, os sons se tornam mais agudos (maior frequência); aliviando a tensão, eles se tornam mais graves (menor frequência).

Alguns instrumentos de corda, como o violão, dispõem de trastes, dispositivos que permitem alterar o comprimento da parte vibrante da corda. Com os dedos, o músico pressiona entre os trastes a corda que será colocada a vibrar, reduzindo seu comprimento (**figura 7.22**). Quanto menor o comprimento L da parte vibrante, maior a frequência do som obtido.

Também é necessário levar em conta o ponto onde o músico produz a oscilação na corda. No violão, por exemplo, o som obtido pela oscilação produzida próximo à boca da caixa do instrumento (**figura 7.23.a**) é diferente daquele obtido quando a oscilação é produzida em um ponto próximo do cavalete, extremidade fixa da corda (**figura 7.23.b**).

A forma como determinados músicos combinam todos esses fatores, o que exige uma técnica apurada, torna-os inconfundíveis.



Steven Chiang/Shutterstock/Glow Images



Jostein Hauge/Shutterstock/Glow Images

Figura 7.23 Corda oscilando próximo à boca da caixa do violão em **a** e próximo ao cavalete em **b**.

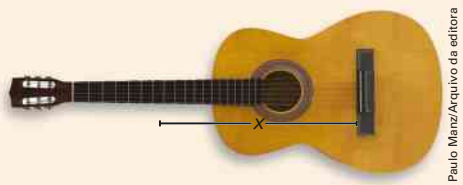
Exercício resolvido

2. A corda de um instrumento musical tem 60 cm de comprimento. Quando tocada, essa corda emite uma nota musical de frequência 440 Hz.

a) Quais as frequências do 2º e do 3º harmônicos para essa corda?

b) Em que ponto o músico deve colocar o dedo, ou seja, qual o valor da distância x, mostrada na figura abaixo, para produzir uma nota musical de 587 Hz?

c) É possível, sem trocar a corda e sem alterar a tensão, o músico conseguir uma nota musical de 392 Hz?



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Resolução:

a) Lembrando que a frequência da nota musical emitida corresponde sempre à do 1º harmônico (modo fundamental) e que os harmônicos possuem frequências múltiplas das do modo fundamental, as frequências do 2º e 3º harmônicos são:

$$f_2 = 2 \cdot f_1 \Rightarrow f_2 = 2 \cdot 440 \Rightarrow f_2 = 880 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 3 \cdot f_1 \Rightarrow f_3 = 3 \cdot 440 \Rightarrow f_3 = 1\,320 \text{ Hz}$$

b) Quando o músico diminui o comprimento da corda para um valor x, a velocidade da onda na corda não se altera, pois a densidade linear é a mesma e o músico não alterou a tensão nela. Com os dados da questão, a velocidade da onda na corda é dada por:

$$f_1 = \frac{v}{2L} \Rightarrow v = 2L \cdot f_1$$

Então, para uma frequência de 587 Hz, o comprimento x da parte vibrante da corda é obtido pela expressão:

$$f_x = \frac{v}{2x} \Rightarrow x = \frac{v}{f_x}$$

Substituindo a velocidade v pela expressão obtida acima, temos:

$$x = \frac{2L \cdot f_1}{2f_x} = \frac{L \cdot f_1}{f_x}$$

Substituindo pelos valores numéricos, obtemos:

$$x = 0{,}60 \cdot \frac{440}{587} \Rightarrow x = 0{,}45 \text{ m}$$

c) Se o músico não alterar a tensão na corda e também não a trocar, não será possível obter uma nota com frequência de 392 Hz, pois esse valor é inferior a 440 Hz, que corresponde ao 1º harmônico (frequência mais baixa possível).

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

14. Utilize a **figura 7.18** para responder a esta questão. Suponha que o comprimento L da corda seja 1 m. Nessas condições, qual é o comprimento de onda correspondente ao segundo, terceiro e quarto harmônicos mostrados na figura? $\lambda_2 = 1{,}0$ m; $\lambda_3 = 0{,}67$ m e $\lambda_4 = 0{,}5$ m.

15. Para afinar um piano, um técnico estica um dos fios de aço do instrumento com uma tensão de 800 N. O comprimento do fio de aço é 0,40 m e sua massa é igual a 3,2 g. Qual é a frequência de vibração do modo fundamental desse fio? $f = 395$ Hz.

16. Ao tocar seu violino, um músico pressiona suavemente o centro da corda para produzir uma nota musical cuja frequência é exatamente igual ao dobro daquela do modo fundamental. Explique como isso é possível.
Pressionando o centro da porção vibrante.

17. Em uma apresentação de *rock*, embora dois guitarristas tocassem a mesma música com guitarras iguais, notava-se claramente uma diferença entre suas melodias. Como você explica esse fato?
Timbres diferentes de acordo com os pontos que se tangem às cordas.

5 Tubos sonoros

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

Nos instrumentos de sopro, como o saxofone (**figura 7.24.a**), a flauta transversal (**figura 7.24.b**) e o trompete (**figura 7.24.c**), entre outros, o som é produzido pela vibração de uma coluna de ar. O músico, soprando em uma extremidade apropriada, provoca ondas estacionárias na coluna de ar dentro do instrumento. São os chamados **tubos sonoros**.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.



Figura 7.24 Saxofone (**a**), flauta transversal (**b**) e trompete (**c**).

O tubo sonoro pode apresentar as duas extremidades desobstruídas (abertas); nesse caso, recebe o nome de **tubo aberto**. Se apenas uma das extremidades for desobstruída, ele recebe o nome de **tubo fechado**.

A seguir, vemos dois tipos de flauta: um tubo sonoro aberto (**figura 7.25.a**) e um tubo sonoro fechado (**figura 7.25.b**).



Figura 7.25 Tubo sonoro aberto (**a**) e tubo sonoro fechado (**b**).

Como podemos observar na **figura 7.26**, as extremidades abertas dos tubos são locais onde a vibração é livre; correspondem, portanto, a ventres. Já as extremidades fechadas são locais onde não há vibração longitudinal; correspondem, portanto, a nós.

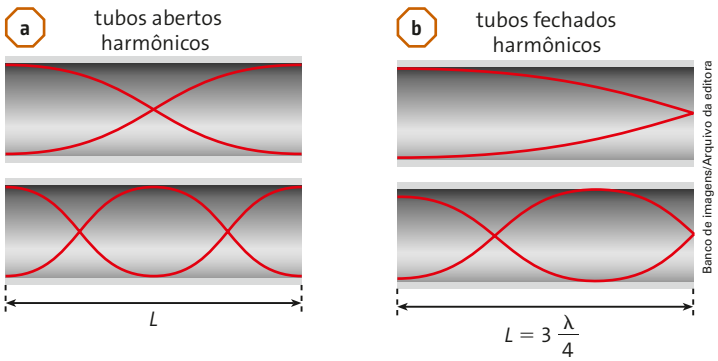


Figura 7.26 Esquema do primeiro (fundamental) e do segundo harmônicos em um tubo aberto (**a**) e do primeiro (fundamental) e do terceiro harmônicos em um tubo fechado (**b**).

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Para produzir os sons desejados nos instrumentos de sopro, os músicos dispõem de alguns recursos: por exemplo, mudar a posição dos dedos determinando o local em que o tubo ficará aberto, como na flauta e no clarinete (**figura 7.27.a**); ou variar o tamanho do tubo por meio de válvulas, como no pistão, ou por meio de uma vara deslizante, como no trombone (**figura 7.27.b**). Além de recursos como esses, que fazem parte do instrumento, cada músico desenvolve uma técnica própria, introduzindo acessórios, como a surdina, um lenço ou a própria mão, para abafar o som e criar novos timbres.



Figura 7.27 Clarinete (**a**) e trombone (**b**).

Em alguns instrumentos musicais, a coluna de ar é posta a vibrar não pelo sopro do músico, mas sim por foles ou ventoinhas, como é o caso do órgão (**figura 7.28**).

Vejamos, a seguir, como se relacionam as grandezas físicas frequência e comprimento de onda com o tamanho do tubo sonoro na formação do harmônico fundamental e dos harmônicos superiores.


Robert Harding World Imagery/Getty Images

Figura 7.28
No órgão, o ar é injetado nos tubos, que apresentam diferentes tamanhos, para produzir as notas musicais e os timbres desejados.

Tubo aberto

Na figura 7.29, podemos observar a representação esquemática de três harmônicos obtidos em um tubo sonoro aberto: o fundamental (primeiro harmônico); o segundo e o terceiro.

Na figura 7.29.a, temos o primeiro harmônico ou modo fundamental. Observe que, nesse caso, o comprimento de onda é o dobro do comprimento do tubo, ou seja, $\lambda_1 = 2L$. A frequência correspondente ao modo fundamental, que representa a frequência da onda emitida, é dada por: $f_1 = \frac{v}{2L}$.

Na figura 7.29.b, temos o segundo harmônico e, na figura 7.29.c, o terceiro harmônico. Observe as expressões para as frequências correspondentes a esses dois harmônicos. Elas são, respectivamente, o dobro e o triplo da frequência fundamental.

Generalizando, podemos afirmar que as frequências harmônicas para um tubo aberto podem ser obtidas com a mesma relação das cordas vibrantes, ou seja:

$$f = n \cdot \frac{v}{2L} \quad (n = 1; 2; 3; 4...)$$

Substituindo n por 1; 2; 3; 4, ... obtemos, respectivamente, a frequência fundamental e as frequências dos harmônicos superiores.

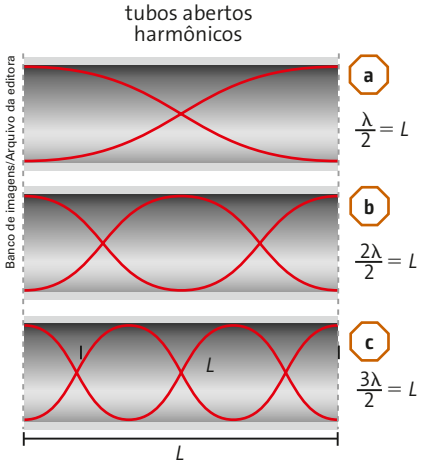


Figura 7.29 Representação esquemática do primeiro (fundamental) (**a**), do segundo (**b**) e do terceiro (**c**) harmônicos em um tubo aberto.

Tubo fechado

Na figura 7.30, ilustramos os vários modos de vibração de uma coluna de ar em um tubo sonoro fechado, de comprimento L.

Analisando a figura, observamos que, nos tubos fechados, só é possível obter os harmônicos ímpares. Compare com a figura referente ao tubo aberto, que apresenta todos os harmônicos: pares e ímpares.

Na figura 7.30.a, temos o primeiro harmônico (fundamental). O comprimento de onda do primeiro harmônico é quatro vezes o comprimento do tubo: $\lambda_1 = 4L$; e a frequência correspondente é dada por:

$$f_1 = \frac{v}{4L}$$

Na figura 7.30.b, temos o terceiro harmônico e, na figura 7.30.c, o quinto harmônico. Observe as expressões para as frequências correspondentes a esses dois harmônicos. Elas são, respectivamente, o triplo e o quíntuplo da frequência fundamental.

Generalizando, podemos afirmar que as frequências harmônicas para um tubo fechado podem ser obtidas por:

$$f = n \cdot \frac{v}{4L} \quad (n = 1, 3, 5, 7, ...)$$

Nessa expressão, n só pode assumir valores inteiros ímpares 1; 3; 5; 7, ... e os harmônicos possíveis são: primeiro (fundamental), terceiro, quinto, sétimo, e assim sucessivamente.

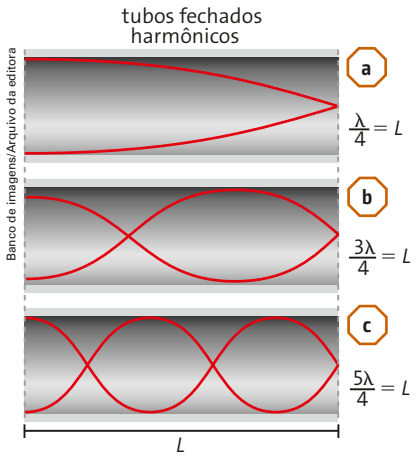


Figura 7.30 Representação esquemática do primeiro (fundamental) (**a**), do terceiro (**b**) e do quinto harmônicos (**c**) em um tubo fechado.

Na **tabela 7.4**, apresentamos a frequência harmônica, as relações entre elas e o comprimento de onda para cada modo de vibração nos tubos sonoros.

Tabela 7.4 Frequências harmônicas e comprimentos de onda nos tubos sonoros

Harmônico	Tubo aberto		Tubo fechado	
	Frequência harmônica	Comprimento de onda	Frequência harmônica	Comprimento de onda
primeiro (fundamental)	$f_1 = \frac{v}{2L}$	$\lambda_1 = 2L$	$f_1 = \frac{v}{4L}$	$\lambda_1 = 4L$
segundo	$f_2 = \frac{v}{L}$	$\lambda_3 = L$		
terceiro	$f_3 = \frac{3v}{2L}$	$\lambda_4 = \frac{2L}{3}$	$f_3 = \frac{3v}{4L}$	$\lambda_3 = \frac{4L}{3}$
quarto	$f_4 = \frac{2v}{L}$	$\lambda_5 = \frac{L}{2}$		
quinto	$f_5 = \frac{5v}{2L}$	$\lambda_5 = \frac{2L}{5}$	$f_5 = \frac{5v}{4L}$	$\lambda_5 = \frac{4L}{5}$

Exercício resolvido

3. Um árbitro de futebol, hábil no uso do seu apito, consegue obter diferentes frequências harmônicas ao apitar. A extremidade oposta à embocadura do apito é aberta, mas ele pode fechá-la com o dedo para obter uma configuração diferente. Assim, ele consegue os dois primeiros harmônicos, tanto com a extremidade aberta como com a fechada. Considere que a velocidade do som nas condições ambientes é de 340 m/s e o comprimento da porção vibrante da coluna de ar é de 10 cm.

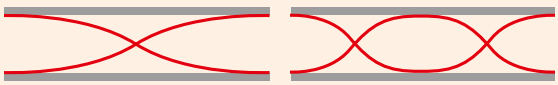


Moisés Gonçalves/Arquivo da editora

a) Represente, esquematicamente, os nós e os ventres referentes aos dois primeiros harmônicos que ocorrem quando o apito está com a extremidade aberta.
b) Determine o comprimento de onda e a frequência desses harmônicos.
c) Refaça o item **a** para o apito com a extremidade fechada.

Resolução:

a) As figuras seguintes representam, esquematicamente, o primeiro (fundamental) e o segundo harmônicos obtidos no apito com a extremidade aberta.



b) De acordo com as figuras do item **a**, temos que o comprimento de onda do primeiro harmônico é:

$$\lambda_1 = 2L \Rightarrow \lambda_1 = 2 \cdot 0{,}10 \Rightarrow \lambda_1 = 0{,}20 \text{ m}$$

E do segundo harmônico:

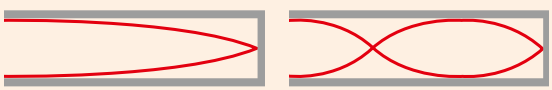
$$\lambda_2 = L \Rightarrow \lambda_2 = 0{,}10 \text{ m}$$

As frequências correspondentes valem:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} \Rightarrow f_1 = \frac{340}{0{,}20_1} \Rightarrow f_1 = 1700 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_1} \Rightarrow f_2 = \frac{340}{0{,}10_1} \Rightarrow f_2 = 3\,400 \text{ Hz}$$

c) Com a extremidade fechada, somente são obtidos os harmônicos ímpares. Assim, os dois primeiros harmônicos são o fundamental e o terceiro harmônico, como mostram as figuras a seguir.



Ilustrações técnicas: Banco de imagens/Arquivo de editora

Física explica

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

Um pouco de Física na música

Ao assoviar uma melodia, nossos lábios produzem sons que se sucedem em uma frase musical. Como nossa mente identifica uma melodia?

De modo geral, podemos dizer que cada som (nota musical) é comparado ao imediatamente anterior. O intervalo entre dois sons, atual e anterior, cujas frequências f sejam f_2 e f_1, respectivamente, é definido pela razão $i = \frac{f_2}{f_1}$.

Dessa forma, uma sequência de sons nas frequências 100 Hz, 140 Hz e 160 Hz, por exemplo, perfaz a mesma melodia que os sons nas frequências 200 Hz, 280 Hz e 320 Hz, se tocados na mesma ordem e com a mesma pulsação e ritmo.

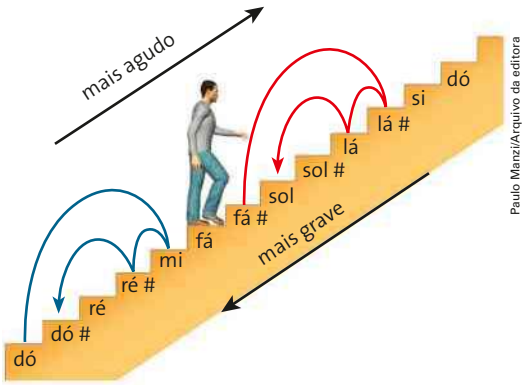
Observe que, como todas as frequências da primeira sequência foram multiplicadas por um mesmo fator, a razão entre as frequências na segunda sequência é a mesma que as correspondentes razões na primeira; ou seja, os sons guardam entre si os mesmos intervalos musicais.

Quando a razão entre as frequências é 2, ocorre um intervalo muito perceptível e consonante para a audição humana. Nesse intervalo, chamado de oitava, muitos intervalos menores podem ser inseridos. Mas como inseri-los?

A pergunta pode ser respondida de diferentes modos, o que nos leva a diferentes escalas musicais. Uma das respostas considera que os intervalos entre todas as inserções sejam iguais, perfazendo 12 inserções.

Cada intervalo é chamado semitom. Nessa escala, se multiplicarmos o intervalo por si mesmo 12 vezes, obteremos uma nova nota com o dobro da frequência da nota de partida, ou seja, $i^{12} = 2$. Portanto, o intervalo é $i = \sqrt[12]{2} = 1{,}0595$.

Com essa escala, independentemente da nota inicial, se prosseguirmos com determinada sequência de intervalos, vamos sempre obter a mesma melodia, mais aguda ou mais grave, dependendo da nota inicial.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Representação de dois pequenos trechos melodicamente iguais: o vermelho explora sons mais agudos do que o azul.

- Por que a sequência de sons nas frequências 100 Hz, 140 Hz e 160 Hz perfaz a mesma melodia que os sons nas frequências 200 Hz, 280 Hz e 320 Hz, se tocados na mesma ordem e com a mesma pulsação e ritmo?

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

18. Um tubo sonoro possui 1,20 m de comprimento. Se ondas sonoras estacionárias são produzidas nesse tubo, faça uma figura mostrando o terceiro harmônico e determine a posição dos nós do deslocamento, considerando que o tubo seja:

a) aberto; b) fechado.

Veja respostas no Manual do Professor.

19. Imagine que o canal auditivo, que é cheio de ar, seja um tubo sonoro com aproximadamente 2,4 cm de comprimento e possua uma extremidade aberta e a outra fechada pelo tímpano. Quando o ar é posto a vibrar, formam-se ondas estacionárias.
Considere a velocidade do som igual a 340 m/s. Determine a frequência fundamental e o comprimento de onda correspondente. Esse som é audível?

$f = 3\,542$ Hz; $\lambda = 9{,}6$ cm. É audível.

20. O trato vocal humano é um tubo com 17 cm de comprimento, aproximadamente. Ele se estende dos lábios às pregas vocais, no meio da garganta, e pode ser considerado um tubo sonoro fechado. Faça uma estimativa das três primeiras frequências das ondas estacionárias que se formam no tubo vocal. Considere que a velocidade do som seja de 340 m/s. $f_1 = 500$ Hz; $f_2 = 1\,500$ Hz e $f_3 = 2\,500$ Hz.

21. De acordo com a teoria, as frequências harmônicas obtidas nos instrumentos de sopro são diretamente proporcionais à velocidade do som no ar no interior do instrumento. Sabendo-se que a velocidade do som aumenta com a temperatura, explique por que os músicos tocam seus instrumentos também antes de iniciar uma apresentação. Para afinar os instrumentos.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

6 Efeito Doppler

Suponha que você esteja parado em uma praia observando as ondas do mar. Elas chegam até seus pés com uma frequência igual à da fonte que as origina. O que acontecerá se você correr ao encontro das ondas?

Nesse caso, um maior número de ondas por unidade de tempo atingirá seus pés. Isso significa que a frequência percebida por você é **maior** do que a das ondas. E se você correr no mesmo sentido das ondas?

Agora, você vai cruzar um número menor de ondas por unidade de tempo, ou seja, a frequência percebida será **menor** do que a das ondas.

Vejamos uma situação particularmente interessante: e se você corresse no mesmo sentido das ondas e com a mesma velocidade delas? Aqui, você estaria se movimentando sempre com a onda, por exemplo, na crista da onda (**figura 7.31**).



Fabio Motta/Agência Estado

Figura 7.31 Observamos esta situação quando um surfista desliza numa onda, na mesma direção e no mesmo sentido. Nesse caso, a frequência percebida pelo receptor é nula. Prainha, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro (RJ), 2013.



Ernesto Reghran/Pulsar Imagens

Figura 7.32 Quando a ambulância se aproxima, você ouve um som mais agudo e, quando ela se afasta, ouve um som mais grave.

Consideremos outro exemplo. Suponha que você está parado em uma calçada e uma ambulância, com a sirene ligada, aproxima-se, passa por você e se afasta (**figura 7.32**). Você vai observar que a frequência do som da sirene não é a mesma na aproximação e no afastamento.

Com base nesses dois exemplos, podemos concluir que existe uma mudança na percepção da frequência de uma onda quando existe um movimento relativo entre a fonte e o observador. Esse movimento relativo pode corresponder ao observador se movimentando em relação à fonte de ondas, que permanece parada; à fonte de ondas se movimentando em relação ao observador parado; ou, ainda, à fonte e ao observador se movimentando.

Em 1842, o físico austríaco Christian Johann Doppler (1803-1853) analisou as alterações na frequência decorrentes do movimento relativo entre a fonte de ondas e o observador, demonstrando o que passou a ser conhecido como **efeito Doppler**. Vejamos alguns exemplos.

Fonte de ondas em movimento e observador em repouso

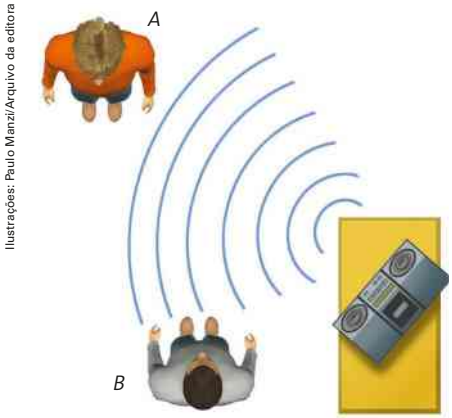
Na **figura 7.33**, temos uma ilustração de como as ondas sonoras emitidas por um aparelho de rádio, em repouso, atingem duas pessoas, *A* e *B*, também em repouso.

Nesse caso, as duas pessoas ouvem sons da mesma frequência que a emitida pela fonte (rádio). Vamos chamar essa frequência de *f*.

E se o aparelho de rádio estiver colocado em um caminhão que se movimenta conforme mostrado na **figura 7.34**: afastando-se da pessoa *A* e aproximando-se da pessoa *B*?

Nesse caso, as frequências f_A e f_B ouvidas pelas pessoas *A* e *B*, respectivamente, serão diferentes da frequência *f* da fonte.

Para estabelecer a relação entre as frequências f_A, f_B e *f*, são necessárias algumas considerações. Em primeiro lugar, sabemos que a velocidade de propagação das ondas emitidas pelo rádio é a mesma, quer ele esteja parado ou em movimento, ou seja, o movimento da fonte (rádio) não altera a velocidade de propagação das ondas. A velocidade de propagação das ondas depende somente do meio na qual elas se propagam.



Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 7.33 Situação em que a fonte (rádio) e os observadores estão em repouso.



Figura 7.34 Situação em que a fonte (caminhão) se movimenta e os observadores estão em repouso.

Em segundo lugar, comparando as **figuras 7.33** e **7.34**, notamos que:

- o comprimento de onda das ondas que atingem o observador *A* quando a fonte está em movimento é maior que aquele das ondas que atingem o mesmo observador quando a fonte está em repouso;
- o comprimento de onda das ondas que atingem o observador *B* quando a fonte está em movimento é menor que aquele das ondas que atingem o mesmo observador quando a fonte está em repouso.

As ilustrações desta página estão representadas sem escalas e em cores fantasia.

Por que isso acontece? O aparelho de rádio emite periodicamente ondas esféricas cujos centros se encontram exatamente no ponto em que ele estava quando as ondas foram emitidas. Quando o rádio está parado, esses centros são sempre os mesmos. Mas, com o rádio em movimento, cada onda emitida possui um centro diferente. Se a velocidade do caminhão for constante, os centros apresentam o padrão mostrado na **figura 7.34**. Para o observador *A*, as cristas de onda estão mais afastadas e, para o observador *B*, mais próximas. Com base nessas observações e lembrando que $v = \lambda \cdot f$, podemos concluir que:

- a frequência f_A das ondas que atingem o observador *A*, com a fonte em movimento e afastando-se dele, é menor que a frequência *f* se a fonte estiver parada ($f_A < f$). Para o observador *A*, o som se torna mais grave em razão do movimento de afastamento da fonte;
- a frequência f_B das ondas que atingem o observador *B*, com a fonte em movimento e aproximando-se dele, é maior que a frequência *f* se a fonte estiver parada ($f_B > f$). Para o observador *B*, o som se torna mais agudo em razão do movimento de aproximação da fonte.

Fonte de ondas em repouso e observador em movimento

Suponha que uma pessoa, dentro de um carro em movimento, aproxima-se e depois se afasta de uma fábrica que está com a sirene ligada (figura 7.35).

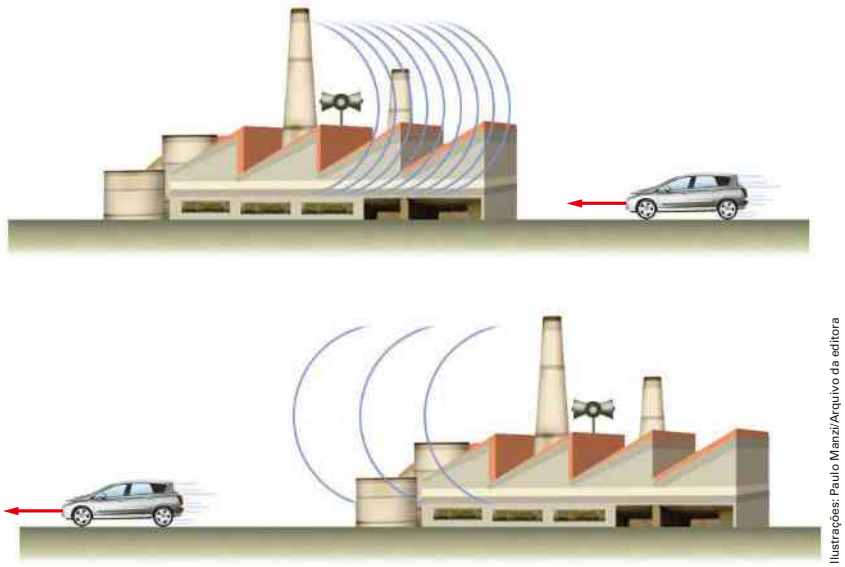


Figura 7.35 Situação em que a fonte está parada e o observador, em movimento. As ondas estão representadas conforme a percepção do observador.

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Quando um observador se aproxima de uma fonte em repouso, ele ouve um som com frequência maior do que a emitida por essa fonte, uma vez que recebe maior número de frentes de onda por unidade de tempo. O som ouvido pelo observador se torna mais agudo em razão de sua aproximação da fonte.

Já quando um observador se afasta de uma fonte em repouso, ele ouve um som com frequência menor do que a emitida por essa fonte, uma vez que recebe menor número de frentes de onda por unidade de tempo. O som ouvido pelo observador se torna mais grave em razão de seu afastamento da fonte.

As ilustrações desta página estão representadas sem escalas e em cores fantasia.

Fonte de ondas e observador em movimento

Quando tanto a fonte de onda como o observador estão em movimento, pode ser demonstrado que a frequência ouvida pelo observador (f') se relaciona com a frequência da fonte (f) de acordo com a expressão:

$$f' = f \cdot \left[\frac{v_{onda} \pm v_{obs.}}{v_{onda} \mp v_{fonte}} \right]$$

A utilização do sinal (+) ou (−) é feita tomando-se como referência a figura 7.36.

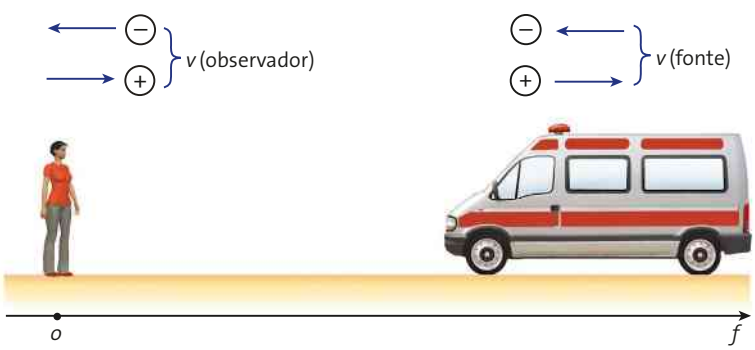


Figura 7.36 O sentido do movimento da fonte ou do observador é que determina o sinal a ser utilizado.

- No numerador da equação: se o observador se aproxima da fonte, usa-se o sinal (+). Se o observador se afasta da fonte, usa-se o sinal (−).
- No denominador da equação: se a fonte se aproxima do observador, usa-se o sinal (−). Se a fonte se afasta do observador, usa-se o sinal (+).

O efeito Doppler também é observado nas **ondas eletromagnéticas**, em particular na luz. Para esse caso continuam válidas as conclusões de que a frequência para o observador sofre um acréscimo quando o movimento relativo à fonte é de aproximação e um decréscimo quando é de afastamento. Os primeiros estudos sobre o efeito Doppler com a luz foram elaborados pelo físico francês Armand H. L. Fizeau (1819-1896).

Uma das aplicações do efeito Doppler com as ondas eletromagnéticas é nos radares que controlam eletronicamente a velocidade dos veículos, tanto nas vias públicas urbanas como nas estradas e rodovias (figura 7.37). Um veículo, ao se aproximar de um radar, reflete as ondas eletromagnéticas emitidas por ele. Por causa de seu movimento, a onda refletida pelo veículo e que atinge o radar apresenta uma frequência diferente da onda emitida originalmente. O aparelho de radar está calibrado para efetuar uma comparação entre as duas frequências e determinar a velocidade do veículo.



Alf Ribeiro/Pulsar Imagens

Figura 7.37 Os radares são instrumentos que utilizam o efeito Doppler para medir a velocidade dos automóveis. Radar fotográfico para fiscalização de velocidade. Cascavel (PR), 2015.

Exercício resolvido

4. Um caminhão do corpo de bombeiros possui uma sirene que emite um som com frequência de 600 Hz. A velocidade do caminhão é de 30 m/s e a do som no ar é de 330 m/s. Determine a frequência do som emitido pela sirene percebido por uma pessoa nas seguintes condições:

a) o caminhão se aproxima da pessoa e ela está parada;
b) a pessoa encontra-se num carro com velocidade de 20 m/s que vai ao encontro do caminhão.

Resolução:

A frequência percebida pela pessoa é dada por $f' = f \cdot \left[\frac{v_{onda} \pm v_{obs.}}{v_{onda} \mp v_{fonte}}\right]$.

a) $f' = 600 \cdot \left[\frac{330 - 0}{330 - 30}\right] = 600 \cdot \frac{330}{300} \Rightarrow f' = 660$ Hz

Como a frequência percebida pela pessoa (660 Hz) é maior do que a do som emitido pela sirene (600 Hz), ela ouve um som mais agudo que o da fonte.

b) $f' = 600 \cdot \left[\frac{330 + 20}{330 - 30}\right] = 600 \cdot \frac{350}{300} \Rightarrow f' = 700$ Hz

A frequência percebida pela pessoa é de 700 Hz. Também nesse caso a pessoa ouve um som mais agudo que o da fonte.

Física explica

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

A ultrassonografia e o efeito Doppler

Entre as muitas e importantes contribuições que a Física tem dado para a melhoria da qualidade de vida das pessoas, uma, em particular, vem assumindo um papel de destaque na Medicina: a **ultrassonografia**.

Trata-se de uma técnica na qual ondas sonoras são transmitidas para o corpo e refletidas pelos tecidos internos. As ondas refletidas são detectadas e visualizadas em uma tela. Assim, em tempo real, o médico pode ter um diagnóstico sobre determinado órgão interno de uma pessoa ou de um animal. Muito conhecido por suas aplicações no acompanhamento de gestantes, o ultrassom também é bastante usado como recurso terapêutico na fisioterapia e em exames diagnósticos na cardiologia.

A ultrassonografia é um método de diagnóstico por imagem muito versátil. Ela permite visualizações tridimensionais, em cores, e apresenta uma grande vantagem, principalmente em relação aos raios X, pois não utiliza radiação ionizante.

A ultrassonografia, associada ao efeito Doppler, permite checar o funcionamento de veias e artérias por meio de imagens e sons do fluxo sanguíneo. Estreitamentos e entupimentos de artérias, ou coágulos de sangue nas veias, alteram a velocidade do sangue. Assim, pelo efeito Doppler, é possível captar a frequência aparente da onda refletida pelo aparelho para medir as variações de velocidade da circulação de sangue num vaso sanguíneo, tornando visíveis possíveis pontos de estrangulamento para a avaliação do problema.



1exposure/Alamy/Other Images

Médica realiza ultrassom em gestante para acompanhar o desenvolvimento do bebê.

1. De acordo com o texto, qual é o fenômeno físico que ocorre com as ondas sonoras na ultrassonografia?
2. Por que na ultrassonografia de vasos sanguíneos é preciso utilizar o efeito Doppler?

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

22. Uma pessoa parada na calçada de uma avenida observa, inicialmente, a aproximação de uma ambulância com a sirene acionada e, depois, seu afastamento. Durante a aproximação, a pessoa percebe que a frequência do som ////////////////////// e, durante o afastamento, que a frequência //////////////////////.
As palavras que preenchem as lacunas são, respectivamente:
X a) aumenta; diminui.
b) diminui; aumenta.
c) aumenta; aumenta.
d) diminui; diminui.

23. Uma fonte sonora em repouso emite um som com frequência de 440 Hz. À medida que um observador em movimento se afasta da fonte, a frequência do som que ele ouve é maior ou menor que 440 Hz?
Menor.

24. Um automóvel com velocidade constante de 72 km/h (20 m/s) aproxima-se de um pedestre parado na calçada. Para chamar a atenção do pedestre, o motorista do carro aciona a buzina, que emite um som de frequência igual a 720 Hz. Sabendo-se que a velocidade do som no ar é de 340 m/s, determine a frequência do som que será ouvido pelo pedestre. $f = 765$ Hz.

Em construção

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

Pitágoras

Pitágoras, matemático, filósofo e astrônomo, era natural de Samos, ilha grega do mar Egeu, perto de Mileto (atual península de Anatólia, Turquia), e viveu no século VI a.C. Nasceu, provavelmente, no ano 570 a.C. e faleceu em 495 a.C.



Album/akg-images/Latinstock

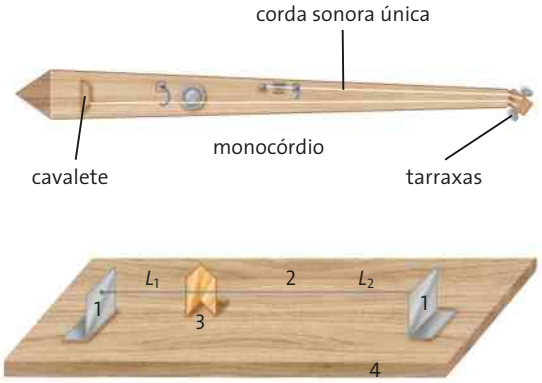
Retrato de Pitágoras (c. 570 a.C.-495 a.C.).

Certamente, a iniciação matemática e filosófica de Pitágoras foi feita com os filósofos jônicos Tales (640 a.C.-550 a.C.), Anaximandro (610 a.C.-547 a.C.) e Anaximenes (585 a.C.-525 a.C.), todos de Mileto, considerados os primeiros físicos gregos.

Pitágoras viajou pelo Egito e Babilônia, onde completou sua formação científica, incluindo Geometria, Aritmética e Astronomia, filosófica e religiosa. Com quase 40 anos de idade retornou a Samos, sua terra natal, para, em seguida, mudar-se para Crotona, na Magna Grécia (atualmente sul da Itália), onde fundou a escola pitagórica. Seus discípulos, conhecidos como "pitagóricos", recebiam formação baseada em quatro disciplinas: Geometria, Aritmética, Astronomia e Música. Na Idade Média, esse tipo de formação passou a ser conhecida como *quadrivium*.

Para os pitagóricos, o número era a base de todas as coisas. Eles procuravam número em tudo. Na Aritmética, com a descoberta dos números racionais; na Geometria, com o famoso teorema que apresenta a relação entre os quadrados sobre os lados do triângulo retângulo; ou, ainda, com a descoberta de pelo menos três poliedros regulares: o tetraedro, o cubo e o dodecaedro.

Entre as várias contribuições dos pitagóricos, vamos dar destaque especial à música. Consta que Pitágoras utilizou a música para testar suas teorias matemáticas. Por meio de um dispositivo denominado monocórdio, como o apresentado na figura ao lado, Pitágoras verificou a relação entre o som emitido e o comprimento da corda, estabelecendo a lei das cordas.



Paulo Manz/Arquivo da editora

1 – extremidades de fixação
2 – corda sonora
3 – dispositivo móvel
4 – base de apoio

Representação (sem escala e em cores fantasia) de um monocórdio.

Variando a posição do cavalete, Pitágoras tangia os dois lados da corda (L_1 e L_2) e verificava se os sons emitidos eram agradáveis ou não para uma determinada relação matemática entre os comprimentos. Com isso, ele concluiu que os sons harmoniosos eram obtidos quando a relação L_2/L_1 obedecia à proporção dos números inteiros e pequenos (lei dos pequenos números: 2 : 1; 3 : 2; 4 : 3; ...). Para ele, as relações numéricas da natureza podiam ser representadas por uma música, sua harmonia interior.

A concepção de Pitágoras relativa aos comprimentos L_2 e L_1 que produzem sons harmoniosos e a nomenclatura pela qual esses intervalos são conhecidos atualmente estão ilustrados na figura acima.

Segundo Roberto Ponczek, professor da Universidade Federal da Bahia, Pitágoras ficou tão entusiasmado com a lei dos pequenos números que chegou a acreditar que "todas as coisas do Universo eram números inteiros", associando, assim, o mesmo princípio aos planetas e estrelas: os períodos planetários deveriam guardar entre si uma relação de pequenos números inteiros, e o cosmo todo executaria, assim, uma fantástica música universal – a música das esferas.

Por motivos políticos e por rivalidade com outros grupos, os pitagóricos foram expulsos de Crotona e muitos deles se refugiaram em Atenas, Grécia. Consta que Pitágoras morreu de fome em um templo onde se refugiou.

Fonte de dados: SIMAAN, A.; FONTAINE J. *A imagem do mundo dos babilônios a Newton*. São Paulo: Companhia das Letras, 2003; ROCHA, J. F. (Org.) et al. *Origens e evolução das ideias da Física*. Salvador: EDUFBA, 2002.

- Consulte as fontes indicadas acima para conhecer mais sobre a vida e a obra de Pitágoras.

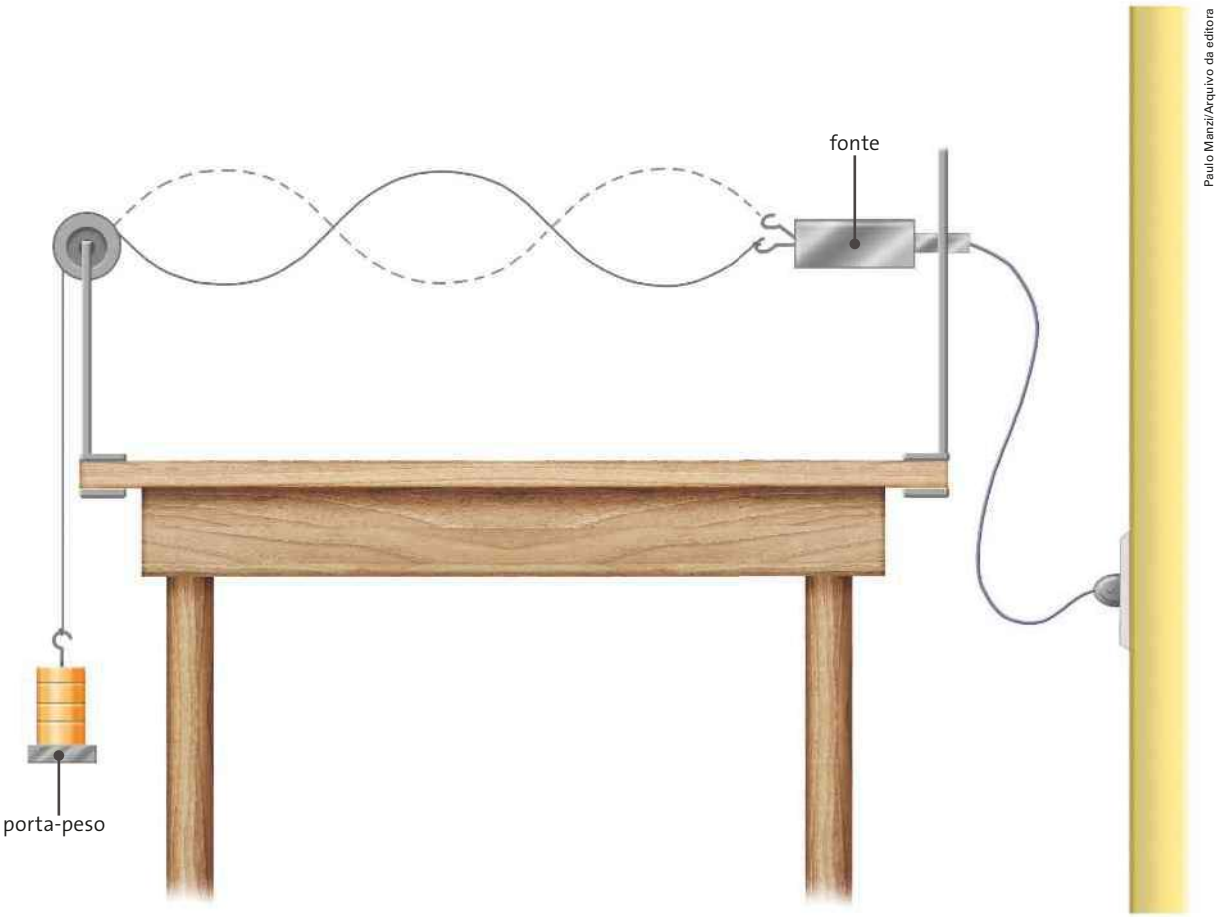
Experimento

Veja comentários e sugestões sobre este experimento e respostas das atividades no Manual do Professor.

Cordas vibrantes

Nesta atividade prática, você terá a oportunidade de realizar uma análise qualitativa das grandezas físicas envolvidas na vibração de uma corda fina presa nas duas extremidades.

Para isso, é necessário montar o dispositivo mostrado na figura.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Uma corda fina (linha de pesca), com um comprimento *L*, que é mantida fixa em todas as situações, é posta a vibrar por uma fonte. Uma das extremidades da corda é presa na fonte e a outra é presa em um porta-peso. Representação sem escala e em cores fantasia.

A atividade deve ser conduzida de tal forma que possibilite analisar os diferentes modos de vibração na corda (dois nós, três nós, etc.). Para essa análise, devem ser verificadas três variáveis: a frequência da fonte, a tensão na corda e a espessura da corda.

Com base em suas observações, responda:

1. O que acontece com o modo de vibração da corda à medida que alteramos somente a frequência da fonte?
2. Qual é a influência da tensão nos modos de vibração da corda?
3. Quando se troca a corda por uma mais fina (ou mais grossa), o número de nós obtidos aumenta ou diminui?
4. Durante os ensaios, a velocidade de propagação da onda na corda foi mantida constante ou variou?
5. Qual é a relação entre o comprimento de onda da onda na corda e o número de nós obtidos?

Retomando

Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resolução dos exercícios deste capítulo.

25. Analise as afirmações a seguir e julgue-as verdadeiras (V) ou falsas (F).

a) Som é uma onda mecânica longitudinal. V
b) Infrassom são ondas sonoras com frequência abaixo de 20 Hz. V
c) O comprimento de onda do ultrassom é menor do que o do infrassom. V
d) O som se propaga nos sólidos, líquidos e gases. V
e) O som agudo é de altura maior que a do som grave. V
f) O som grave é o de maior frequência. F
g) A maior intensidade sonora está associada à maior amplitude das ondas e menor intensidade, à menor amplitude. V
h) O timbre do som nos permite distinguir sons de mesma frequência e intensidade oriundos de diferentes fontes sonoras. V

26. (Uepa) Notas musicais, emitidas, por exemplo, por um violão, são compostas por vários sons de frequências diferentes. Cada um desses sons é um harmônico. Considere que ao dedilhar a corda de um violão de comprimento igual a 0,5 m e massa igual a 5 g, a tensão aplicada na corda seja de 4 N.

Com base nestas informações, é correto afirmar que a frequência do 4º harmônico emitido por esta corda, em Hz, é igual a:

a) 60
X b) 80
c) 100
d) 120
e) 140

27. (Enem) Ao ouvir uma flauta e um piano a mesma nota musical, consegue-se diferenciar esses instrumentos um do outro. Essa diferença se deve principalmente ao(à)

a) intensidade sonora do som emitido pelos diferentes instrumentos musicais.
b) potência sonora do som emitido pelos diferentes instrumentos musicais.
c) diferente velocidade de propagação do som emitido por cada instrumento musical.
X d) timbre do som, que faz com que os formatos das ondas de cada instrumento sejam diferentes.
e) altura do som, que possui diferentes frequências para diferentes instrumentos musicais.

28. (Enem) A ultrassonografia, também chamada de ecografia, é uma técnica de geração de imagens muito utilizada em Medicina. Ela se baseia na reflexão que ocorre quando um pulso de ultrassom, emitido pelo aparelho colocado em contato com a pele, atravessa a superfície que separa um órgão do outro, produzindo ecos que podem ser captados de volta pelo aparelho. Para a observação de detalhes no interior do corpo, os pulsos sonoros emitidos têm frequências altíssimas, de até 30 MHz, ou seja, 30 milhões de oscilações a cada segundo.

A determinação de distâncias entre órgãos do corpo humano feita com esse aparelho fundamenta-se em duas variáveis imprescindíveis:

a) a intensidade do som produzido pelo aparelho e a frequência desses sons.
b) a quantidade de luz usada para gerar as imagens no aparelho e a velocidade do som nos tecidos.
c) a quantidade de pulsos emitidos pelo aparelho a cada segundo e a frequência dos sons emitidos pelo aparelho.
X d) a velocidade do som no interior dos tecidos e o tempo entre os ecos produzidos pelas superfícies dos órgãos.
e) o tempo entre os ecos produzidos pelos órgãos e a quantidade de pulsos emitidos a cada segundo pelo aparelho.

29. (UFAM) Poucos sabem, mas Nathan Xavier de Albuquerque (1922-2013), que foi empresário e um dos empreendedores mais importantes que o estado do Amazonas já teve, é o inventor do motor rabeta, muito popular entre os ribeirinhos por ser bem mais barato que o motor de popa, consumir pouquíssimo combustível e poder ser usado em qualquer filete de água. Considere a seguinte situação: uma canoa, equipada com motor rabeta, se movimenta com a velocidade de 8 m/s em sentido contrário ao da propagação das ondas periódicas produzidas pelo vento nas águas de um lago. Se a velocidade de propagação das ondas é de 2 m/s, e a distância entre duas cristas sucessivas é de 10 m, podemos afirmar que o período de oscilação da canoa em movimento, devido à passagem das ondas, é de:

X a) 1 s
b) 2 s
c) 5 s
d) 8 s
e) 10 s

Ecolocalização

Ecolocalização é um modo de orientação próprio a certos animais, especialmente noturnos ou aquáticos, como morcegos e cetáceos, que lhes possibilita identificar a posição e a forma dos obstáculos por meio da emissão de sons de alta frequência produtores de ecos.

A seguir vamos analisar a ecolocalização em dois meios, no ar e na água, utilizando como exemplo os morcegos microquirópteros e os cetáceos com dentes (golfinhos e botos). Os morcegos microquirópteros e os golfinhos emitem frequências maiores do que 20 quilohertz (kHz). Essas frequências estão na faixa do ultrassom.

No ar

Como os morcegos são animais com hábitos noturnos, necessitam de alguma percepção do espaço além da visual. Eles produzem uma corrente de ultrassom na laringe, que é ampliada, emitindo os sons pela boca ou pelo nariz. No nariz há dobras e membranas bem desenvolvidas que focalizam as ondas sonoras, por isso as faces dos morcegos são carrancas. Além dessas características, a orelha externa tem um formato complexo, o que facilita o recebimento de ecos.



Michael Durham/Minden Pictures/Latinstock

Ecolocalização por um pequeno morcego marrom (*Myotis lucifugus*).

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

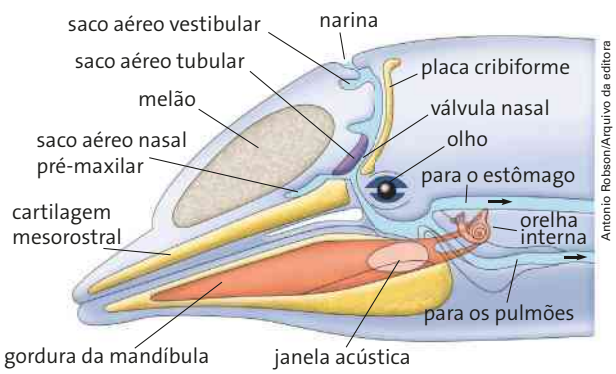
Na água

Como os golfinhos habitam águas turvas, sua visão é limitada; assim eles também possuem a característica de ecolocalização. Em razão da densidade da água, a transmissão do som é mais rápida nela do que no ar; por isso a ecolocalização desses animais é tão apurada que eles conseguem discernir objetos de tamanho similar, mas com formatos diferentes.

Os cetáceos não produzem sons na laringe, pois sua reserva de ar é limitada; assim, seria um grande desperdício utilizá-la com a produção de sons. O som é produzido pelo movimento do ar entre os sacos aéreos no interior das passagens nasais. O som amplificado é refletido em frente ao crânio e é focado sobre um corpo gorduroso (que atua como uma lente acústica) situado sobre a testa do animal. Eles recebem o som na região próxima ao osso da maxila inferior. As ondas sonoras passam através do osso para dentro do corpo gorduroso (no interior da mandíbula) que se estende até a orelha interna. Esta, por sua vez, é isolada do crânio com tecidos que absorvem os sons provenientes de todas as direções, exceto do ponto de contato com o corpo gorduroso mandibular.



Willyam Bradberry/Shutterstock/Glow Images



Antonio Robson/Arquivo da editora

O golfinho-nariz-de-garrafa (*Tursiops truncatus*) e as principais regiões de produção e recepção do som (representação sem escala e em cores fantasia).

Trabalho com o texto

1. Por que os morcegos e os golfinhos necessitam da audição bem desenvolvida?
2. Qual é a principal característica do som que esses animais produzem?
3. Por onde os golfinhos recebem os ecos?

Pesquise e discuta

4. A duração do pulso dos catáceos é de 0,2 s e a frequência emitida e captada por ele é de 0,25 Hz a 150 Hz. Qual é o motivo dessa variação tão grande? Lembre-se de que a frequência é o inverso do comprimento de onda.
5. Pesquise quais animais utilizam a ecolocalização e qual é a função dela.
6. Muitas vezes são utilizadas fontes ultrassônicas na proteção de ambientes contra morcegos. Qual é o conhecimento necessário para dizer que esse método é efetivo? Ele é efetivo? Justifique.
7. Faça uma pesquisa sobre o método da mariposa-tigre (*Bertholdia trigona*) para confundir o morcego.

UNIDADE 4

Óptica e informação

CAPÍTULO 8

Luz e reflexão luminosa

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

wavebreakmedia/Shutterstock



Garota experimentando roupa na frente do espelho.

O espelho reflete a direita exatamente onde está a direita, e a esquerda exatamente onde está a esquerda. É o observador (ingênuo, mesmo quando físico por profissão) que, por identificação, imagina ser o homem dentro do espelho, e olhando-se percebe que usa, por exemplo, o relógio no pulso direito.

Umberto Eco (1932-2016).

Por que as imagens são revertidas no espelho plano?

As imagens desta página não estão representadas em proporção.



Michaeljung/Shutterstock/Glow Images

Figura 8.1 Com o microscópio é possível observar microrganismos invisíveis a olho nu.



Kotsovolos Panagiotis/Shutterstock

Figura 8.2 Interior da Basílica de São Pedro, no Vaticano.
Veja resposta desta questão no Manual do Professor.

Para refletir
Quando olhamos para o céu em uma noite estrelada, vemos o presente, o passado ou o futuro?

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Introdução à Óptica geométrica

Nossa concepção de Universo saiu das trevas com o surgimento dos telescópios. A Biologia derrubou várias barreiras com a invenção do microscópio (figura 8.1). A qualidade de vida deu um salto com o aprimoramento dos óculos. Os momentos históricos ficam eternizados com as fotografias. Vieram, também, o cinema, a televisão e, mais recentemente, as holografias e a chamada realidade virtual. Tudo isso alicerçado pelos simples e antigos princípios da Óptica.

A luz e sua propagação

Na figura 8.2, observamos a entrada da luz pelas aberturas do teto da Basílica de São Pedro, no Vaticano.

A luz é uma radiação eletromagnética que se propaga tanto nos meios materiais como no vácuo e que pode sensibilizar nossos olhos. A luz emitida pelo Sol percorre 150 milhões de quilômetros, a uma velocidade de 300 mil quilômetros por segundo, até atingir a Terra.

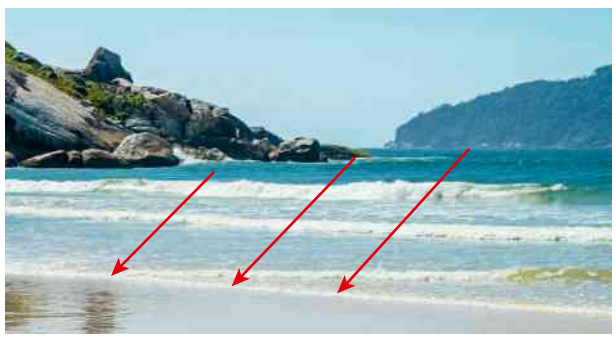
Em virtude de serem números extremamente grandes, é comum expressarmos as distâncias astronômicas em uma unidade denominada **ano-luz**:

1 ano-luz: distância percorrida pela luz no vácuo em 1 ano ($9{,}45 \cdot 10^{12}$ km).

Por exemplo, a luz emitida pelo Sol no exato momento em que você está lendo este livro, isso se estiver lendo-o em um ambiente iluminado por luz natural, demora 8 minutos e 20 segundos para chegar até a Terra. Já a luz emitida pela estrela Alfa da Constelação de Centauro – a segunda estrela mais próxima da Terra – demora cerca de 4,3 anos para chegar até nós. Dizemos, então, que essa estrela está a 4,3 anos-luz da Terra.

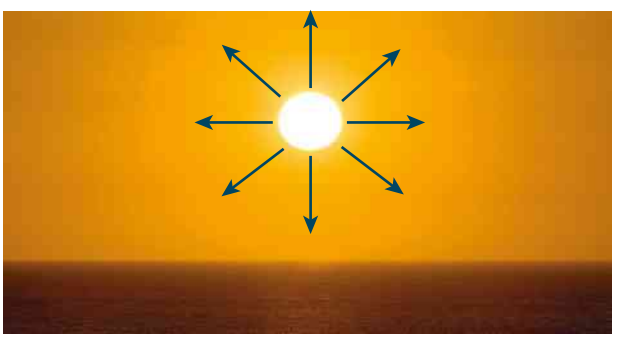
Para representar a direção e o sentido de **propagação da luz**, utilizamos os raios de luz, que são linhas orientadas. Os raios de luz não têm existência física; são meros elementos geométricos de representação.

Podemos representar as ondas do mar chegando à costa por um conjunto de linhas que mostrem a direção e o sentido de propagação de energia (figura 8.3). É também possível demonstrar, pelos respectivos raios, a energia luminosa proveniente do Sol irradiando-se em todas as direções (figura 8.4). Em ambos os casos, as representações também são apenas elementos geométricos.



Palê Zuppani/Pulsar Imagens

Figura 8.3 Ondas do mar chegando à praia. As setas vermelhas representam os raios de propagação de energia. Praia Moçambique, no Parque Estadual do Rio Vermelho. Florianópolis (SC), 2014.



Rogério Reis/Pulsar Imagens

Figura 8.4 Luz emanando do Sol. As setas azuis foram aplicadas para representar os raios de luz. Pôr do sol na Praia Grande, no Arraial do Cabo (RJ), 2014.

Fontes de luz

Alguns corpos são capazes de emitir luz. Eles são chamados de **corpos luminosos** e constituem as fontes primárias de luz. O fogo, por exemplo, é uma fonte primária de luz. Algumas fontes primárias, como as estrelas, são naturais e outras, como as lâmpadas, são artificiais.

Na figura 8.5, temos a foto de um peixe que produz luz e que habita as regiões abissais dos oceanos, as quais estão em profundidades de 500 m a 2000 m.



Dante Fenolio/Photoresearchers/Latinstock

Figura 8.5 Com luz produzida por órgãos localizados em várias partes do corpo, os peixes abissais atraem suas presas.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

A grande maioria dos corpos, porém, não é luminosa, isto é, não irradia luz própria. Os corpos não luminosos, como a Lua (figura 8.6) ou as páginas deste livro, são **fontes secundárias** de luz, as quais somente são visíveis quando refletem a luz. Esses corpos são chamados de **corpos iluminados**.

Os corpos iluminados podem, em determinadas condições, tornar-se corpos luminosos. É o que acontece, por exemplo, com um metal aquecido ao rubro, um pedaço de carvão em brasa ou uma lâmpada acesa (figura 8.7).

Rubro – Vermelho intenso. No contexto, um metal aquecido a uma temperatura alta emite luz na cor vermelha.



Worldswildlifewonders/Shutterstock/Glow Images

Figura 8.6 A Lua não emite luz própria; ela simplesmente reflete parte da luz que recebe de outra fonte luminosa, no caso, o Sol.



Jochen Tack/imagebrok/AGB Photo/Keystone

Figura 8.7 As lâmpadas incandescentes são feitas de um pequeno filamento de tungstênio. Quando esse filamento é percorrido por corrente elétrica, é aquecido tão intensamente (~ 2200 °C) que brilha, tornando-se um corpo luminoso.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Meios de propagação da luz

Observe a figura 8.8.



Matt Jones/Shutterstock/Glow Images



Tooga/Taxi/Getty Images



Coprid/Shutterstock/Glow Images

Figura 8.8 O que se encontra atrás da água e do vidro do aquário é visto nitidamente (**a**). A luz consegue passar pelo guarda-chuva; no entanto, os seus feixes sofrem desvios de orientação em razão da constituição do material que o compõe (**b**). A luz não se propaga pela porta de madeira, pois, ao incidir sobre ela, é em parte absorvida e em parte refletida (**c**).

Na figura 8.8.a, temos um meio **transparente**. Ele permite a passagem da luz de maneira regular; assim os objetos que se encontram depois dele são visualizados nitidamente.

Vale observar que, embora o vidro seja considerado um meio transparente, algumas placas de vidro com superfícies irregulares podem não permitir a passagem da luz regularmente, comprometendo a nitidez da imagem. Quanto à água, também classificada como meio transparente, é necessário levar em conta a espessura da camada de água. Uma camada muito espessa pode comprometer a nitidez da imagem e, em determinados casos, os objetos podem não ser vistos, como acontece nas grandes profundezas do mar.

Observe, agora, a figura 8.8.b. Quando olhamos para a mata através do guarda-chuva, vemos que a nitidez da imagem está comprometida. Nesse caso, o meio material no qual a luz se propaga é **translúcido**. De modo geral, dizemos que os meios translúcidos permitem a passagem da luz, mas não de maneira regular.

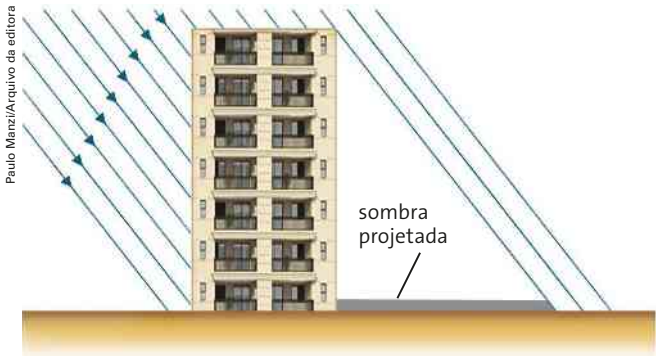
Existem meios que não permitem a passagem da luz; são os meios opacos. Observe a porta de madeira mostrada na figura 8.8.c. Trata-se de um meio **opaco**, pois não é possível a visualização dos objetos que se encontram atrás dela.

Princípios da Óptica geométrica

A Óptica geométrica se alicerça em três princípios básicos: a propagação retilínea da luz, a independência dos raios luminosos e a reversibilidade dos raios luminosos.

O **princípio da propagação retilínea da luz** estabelece que, nos **meios homogêneos** e transparentes, a luz se propaga em linha reta (figura 8.9).

Meio homogêneo – O meio que apresenta as mesmas propriedades em todos os seus pontos.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 8.9 A sombra projetada por um edifício confirma a propagação retilínea da luz. Representação sem escala e em cores fantasia.

O **princípio da independência dos raios luminosos** estabelece que as trajetórias dos raios de luz são independentes. Isso significa que, quando vários feixes luminosos são emitidos simultaneamente por fontes diferentes, cada um deles se comporta como se os outros não existissem; eles podem se cruzar sem que um altere a propagação do outro (figura 8.10).


Aija Lehtonen/Shutterstock/Glow Images

Figura 8.10 A luz de cada holofote atua independentemente, sem interferir na propagação das outras luzes.

O **princípio da reversibilidade dos raios luminosos** estabelece que a trajetória de um raio de luz não se modifica quando se inverte o sentido de sua propagação. As trajetórias dos raios de luz que vão de um ponto *A* até um ponto *B* são as mesmas dos raios que vão de *B* para *A*.

Assim, pelo espelho retrovisor interno de um carro, o motorista consegue enxergar a pessoa que está sentada no banco de trás; pelo mesmo espelho, essa pessoa enxerga o motorista (figura 8.11).


Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Figura 8.11 Se uma pessoa observa os olhos de outra por meio de um espelho, os olhos desta podem observar os olhos da primeira em virtude da reversibilidade da trajetória dos raios.

Um objeto que parece contrariar o princípio da reversibilidade dos raios luminosos é o vidro fumê, muito usado hoje em prédios e veículos. Durante o dia, do lado de dentro, enxergamos o lado de fora, mas do lado de fora não vemos o interior do prédio. O fenômeno pode ser explicado da seguinte forma: durante o dia, a intensidade da luz refletida pelo vidro é bem maior do que a proveniente de seu interior, predominando, para quem está do lado de fora, a visão dos reflexos provocados pelo vidro. Já durante a noite, quando se acende a iluminação interna, ocorre o contrário. O interior se torna visível para quem está do lado de fora, mas as pessoas do lado de dentro veem nos vidros apenas reflexos, que predominam em relação à luz de fora.

A cor de um corpo

À luz do Sol, os objetos se apresentam nas mais variadas cores: azul, vermelho, verde, etc. (figura 8.12). Mas como isso acontece, se todos são iluminados pela mesma radiação solar?

Em primeiro lugar, é preciso entender que a luz branca (branco-amarelado) que recebemos do Sol não é uma radiação monocromática, ou seja, não é constituída por um único tipo de radiação. A luz emitida pelo Sol é policromática, composta de várias radiações: vermelha, laranja, amarela, verde, azul, anil e violeta.

Essas sete cores compõem o espectro de luz visível e estão compreendidas entre as frequências de $4 \cdot 10^{14}$ Hz, para o vermelho, e $8 \cdot 10^{14}$ Hz, para o violeta. Ambos os valores são aproximados, conforme podemos ver na tabela 8.1 e na figura 8.13.


Seregam/Shutterstock/Glow Images

Figura 8.12 Corpos de diferentes cores iluminados pela luz branca.

Tabela 8.1 Comprimentos de onda, frequências e cores do espectro visível

Cor	Comprimento de onda	Frequência
vermelho	~ 625-740 nm	~ 480-405 THz
laranja	~ 590-625 nm	~ 510-480 THz
amarelo	~ 565-590 nm	~ 530-510 THz
verde	~ 500-565 nm	~ 600-530 THz
ciano	~ 485-500 nm	~ 620-600 THz
azul	~ 440-485 nm	~ 680-620 THz
violeta	~ 380-440 nm	~ 790-680 THz

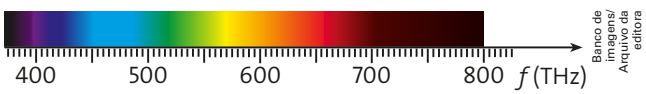


Figura 8.13 Espectro da luz visível.

Em segundo lugar, devemos levar em conta que os objetos não se comportam todos do mesmo modo em relação às radiações refletidas. Se, iluminado pela luz branca, determinado objeto refletir difusamente apenas a componente verde, será visto por nós na cor verde; se refletir somente o azul, será visto na cor azul (figura 8.14), e assim por diante.

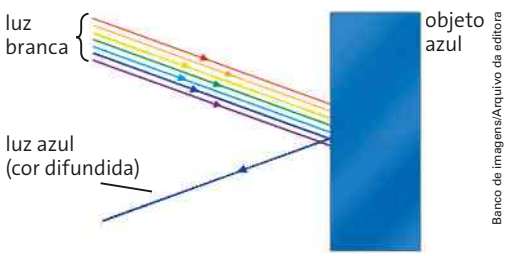


Figura 8.14 Objeto iluminado pela luz branca refletindo difusamente a componente azul. Representação sem escala e em cores fantasia.

Corpo branco é o que reflete difusamente todas as cores componentes da luz branca; corpo negro, ao contrário, é o que absorve todas as cores que nele incidem.

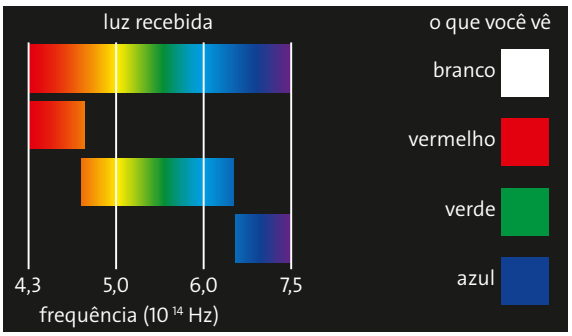
Vemos assim que nossa percepção de cores depende de vários fatores, como a fonte de luz usada, a luz refletida difusamente e, também, a nossa sensibilidade visual em relação à luz que recebemos.

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

A impressão colorida

Se uma gota de água for colocada sobre a região branca da tela de uma tevê ou do monitor de um computador, funcionará como uma lente de aumento dos pequenos pixels de cores que compõem a tela. Em vez de branco, você observará as cores vermelha, verde e azul. É o chamado padrão **RGB**, que significa ***r**ed* (vermelho), ***g**reen* (verde) e ***b**lue* (azul).

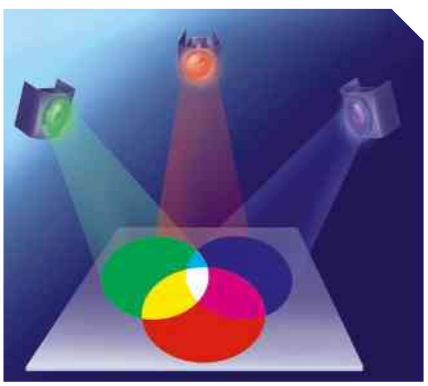
Isso nos permite dividir a radiação solar branca, composta das sete cores (vermelha, laranja, amarela, verde, azul, anil e violeta) em três regiões, conforme mostra a figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Regiões do espectro da luz solar e o resultado visual correspondente.

Vejamos, agora, o que acontece quando projetamos essas três luzes, vermelha, verde e azul, sobre um anteparo branco, conforme mostrado na figura a seguir.



BSIP/UIG/Getty Images

Composição ativa de cores com o uso de um retroprojetor.

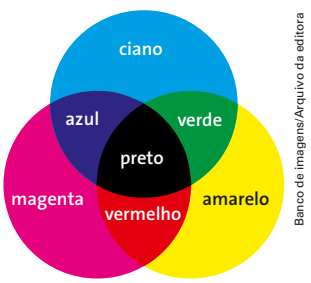
Observe que o resultado obtido depende de cada região. Por exemplo, na região onde a luz vermelha e a verde se superpõem, obtemos **amarelo**; na superposição das luzes vermelha e azul, obtemos **magenta**; na superposição das luzes verde e azul, obtemos **ciano** e, na região onde as três luzes se superpõem, obtemos branco. A **vermelha**, a **verde** e a **azul** são chamadas de **cores aditivas primárias**.

Vamos utilizar a figura anterior para analisar o aspecto subtrativo de cores. Observe a região que não é banhada pela luz verde, mas é atingida pelas cores vermelha e azul. Podemos imaginá-la como sendo a luz branca da qual foi subtraído o verde. Magenta e verde são opostos; quando adicionados produzem o branco.

A região da luz amarela não é banhada pela luz azul, mas recebe o verde e o vermelho. Podemos, da mesma forma, pensar no amarelo como sendo a luz branca da qual foi subtraído o azul. Amarelo e azul são opostos; quando adicionados produzem o branco.

Finalmente, observe uma terceira região, azulada, mas que não é propriamente o azul. É o branco do qual foi subtraído o vermelho. Ciano e vermelho são opostos; quando adicionados produzem o branco.

As cores ciano, magenta e amarela são denominadas **cores subtrativas primárias**. Pelos processos subtrativos, é possível compor os pigmentos das tintas. O conjunto ciano, magenta e amarelo, com o preto, é o padrão dessa composição. Os nomes em inglês fornecem a sigla desse padrão: **CMYK**: ***c**yan* (ciano), ***m**agenta* (magenta), ***y**ellow* (amarelo) e *blac**k*** (preto). É esse conjunto que se usa nas impressões coloridas.



Banco de imagens/Arquivo da editora

1. O que são cores aditivas primárias? E cores subtrativas primárias?
2. O que obtemos quando superpomos luzes vermelha, verde e azul?

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

1. (Enem)
Na eternidade / Eu quisera ter / Tantos anos-luz / Quantos fosse precisar / Pra cruzar o túnel / Do tempo do seu olhar.

Seu olhar. Gilberto Gil, 1984.

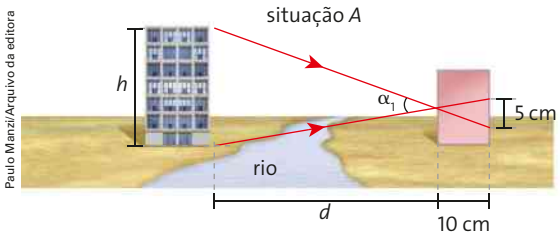
Gilberto Gil usa na letra da música a palavra composta **anos-luz**. O sentido prático, em geral, não é obrigatoriamente o mesmo que na ciência. Na Física, um ano-luz é uma medida que relaciona a velocidade da luz e o tempo de um ano e que, portanto, se refere a:

a) tempo. X c) distância. e) luminosidade.
b) aceleração. d) velocidade.

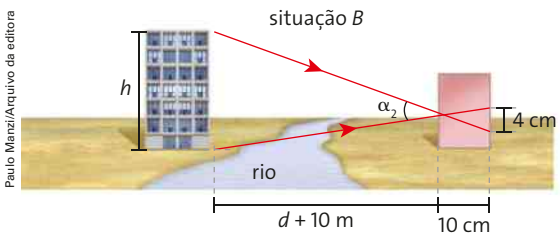
2. Em uma sala de aula, a luz solar penetrava através de uma janela de vidro transparente. O professor, após abrir a janela, perguntou: "O que aconteceu com a radiação solar no interior da sala: aumentou, diminuiu ou permaneceu constante?".
Roberto disse que a radiação solar permaneceu constante, pois o vidro transparente permite a passagem da luz de maneira regular. Já Luciana afirmou que aumentou, pois parte da luz solar não mais se refletiu no vidro da janela. Qual das duas respostas está correta? A resposta de Luciana.

3. Um estudante pretende determinar a altura de um edifício que fica do outro lado do rio. Para isso, ele constrói uma câmara escura com uma caixa de sapatos de 10 cm de profundidade e efetua duas medições do tamanho da imagem do edifício na câmara, conforme mostram as figuras.

Paulo Manzi/Arquivo da editora



Paulo Manzi/Arquivo da editora

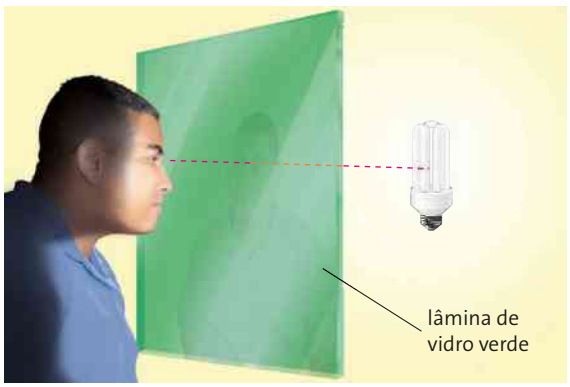


Na situação 1, o tamanho da imagem do prédio obtida foi de 5,0 cm. Na situação 2, ele se afastou 10 m da posição inicial e obteve 4,0 cm para o tamanho da imagem do prédio. Em relação a esses dados, verifique se cada afirmativa seguinte é certa ou errada.

I. Com base na situação *A*, conclui-se que a altura do prédio é igual à metade da distância *d*. Certa.
II. Na situação *B*, a altura do prédio é menor que na situação *A*.Errada.
III. Com base nas situações *A* e *B*, concluímos que a altura do prédio é 20 m. Certa.

4. Na figura, mostrada a seguir, entre a lâmpada, que emite luz branca, e o observador existe uma lâmina de vidro na cor verde. Em outra situação, o observador enxerga uma lâmina de plástico também na cor verde.

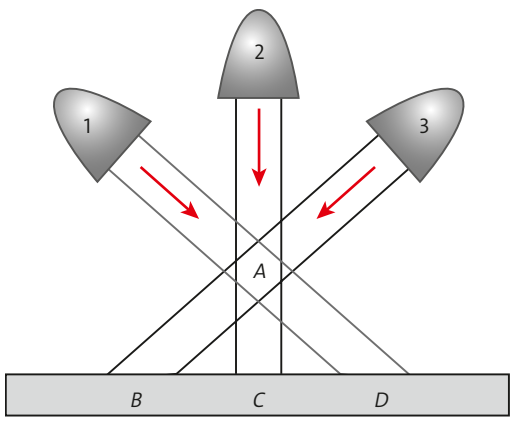
Antonio Robson/Arquivo da editora



Quanto à maneira de o observador enxergar as lâminas em cada uma das situações, responda:

a) O que acontece com a luz branca da lâmpada que incide na lâmina de vidro? É refletida difusamente.
b) Qual é o fenômeno que ocorre com a luz emitida pela lâmpada que incide na lâmina de plástico? Reflexão difusa.

5. Em uma sala existem três holofotes que, quando acesos, emitem feixes de luz de mesma intensidade, conforme mostra a figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

A: branca, *B*: azul, *C*: verde e *D*: vermelha.

Sabe-se que o feixe 1 é vermelho, o 2 é verde e o 3 é azul. Qual é a cor que será vista, respectivamente, em cada região *A*, *B*, *C* e *D*?

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

2 Sombra, penumbra e eclipse

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Em Óptica, a palavra **sombra** significa "região não iluminada". A sombra pode ser produzida pela interposição de um objeto opaco entre uma fonte de luz e um anteparo. É o que acontece quando estamos expostos à luz do Sol. Como o nosso corpo é opaco, a luz do Sol que incide sobre ele não o atravessa e, com isso, obtemos no solo uma região não iluminada, a nossa sombra projetada (figura 8.15).

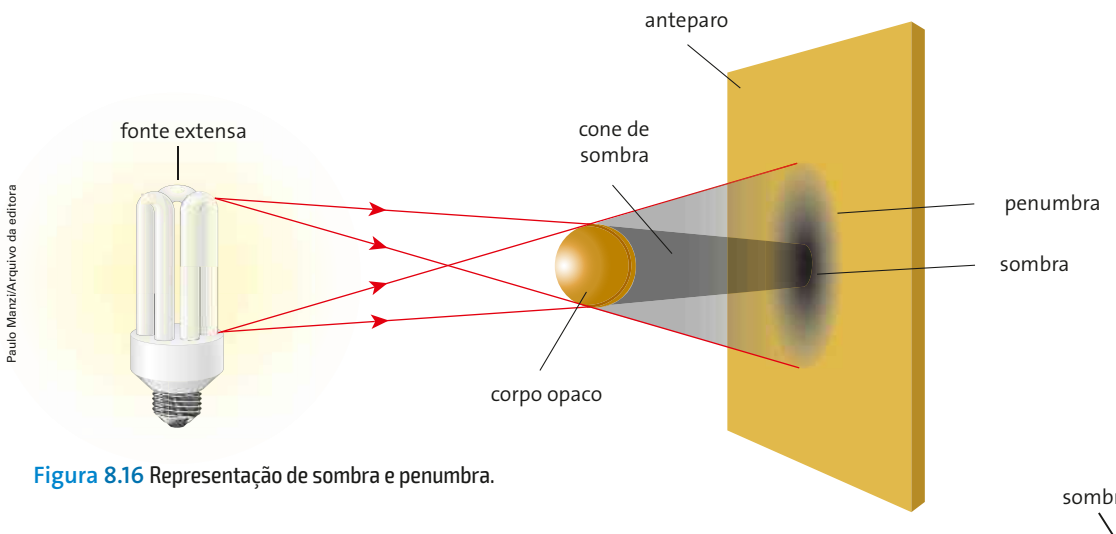
A sombra é consequência da propagação retilínea da luz. As dimensões da sombra de uma pessoa dependem da posição do Sol no céu naquele instante.

Para produzir sombra, podemos utilizar um dispositivo simples constituído de uma lâmpada acesa, que será a fonte de luz, um objeto opaco, como uma bola, e uma tela colocada atrás dele, a qual servirá de anteparo (figura 8.16).



Juan David/Shutterstock/Glow Images

Figura 8.15 A imagem projetada pela sombra é uma silhueta bidimensional e se apresenta de acordo com a propagação retilínea da luz.

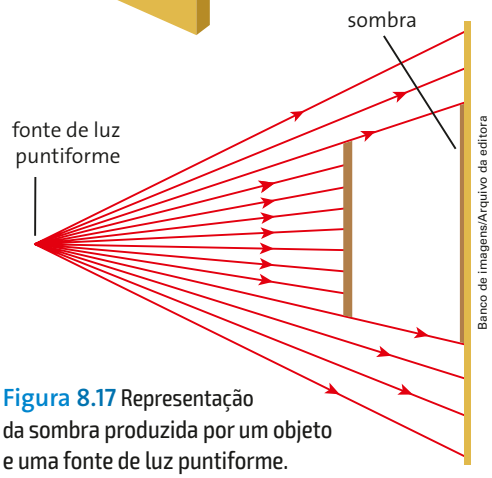


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 8.16 Representação de sombra e penumbra.

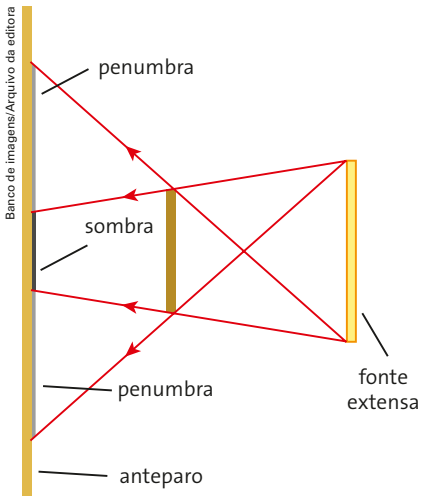
No anteparo, destacamos três regiões distintas: a primeira, totalmente escura, é a **sombra** projetada do objeto opaco; a segunda, parcialmente iluminada, é a **penumbra**; e a terceira é totalmente iluminada.

A região denominada penumbra está relacionada às dimensões da fonte de luz utilizada no experimento. A figura 8.17 mostra uma representação bidimensional para o caso extremo de formação somente de sombra, sem penumbra. Observe as dimensões da fonte de luz em relação ao tamanho do objeto e às distâncias envolvidas.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 8.17 Representação da sombra produzida por um objeto e uma fonte de luz puntiforme.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 8.18 Representação de sombra e penumbra de um objeto e uma fonte extensa.


Hideo Kurihara/Alamy/Other Images

Figura 8.19 Imagem do eclipse do Sol ocorrido em 21 de junho de 2012, observado em Tóquio, no Japão.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Os raios que atingem o objeto não o atravessam, pois ele é opaco. Assim, no anteparo, obtemos duas regiões distintas bem determinadas: uma não iluminada (sombra) e outra totalmente iluminada. A linha que delimita as duas regiões é determinada pelos raios de luz que, partindo da fonte, tangenciam o objeto opaco.

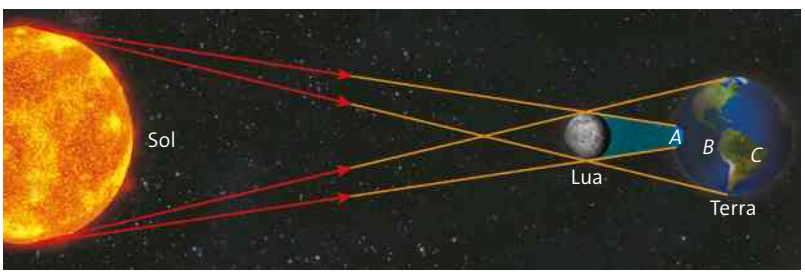
Como fica a representação bidimensional no caso de uma fonte de luz extensa? A **figura 8.18** ilustra essa situação, com as três regiões: sombra, penumbra e totalmente iluminada.

A seguir, vamos analisar a formação de sombra e penumbra por ocasião dos eclipses do Sol, da Terra e da Lua.

A palavra **eclipse** significa 'ocultação', total ou parcial, de um astro (luminoso ou iluminado) pela interposição de outro (luminoso ou iluminado) entre ele e o observador.

Por exemplo, ocorre eclipse do Sol quando a Lua, em seu movimento de translação, coloca-se entre o Sol e a Terra (**figura 8.19**).

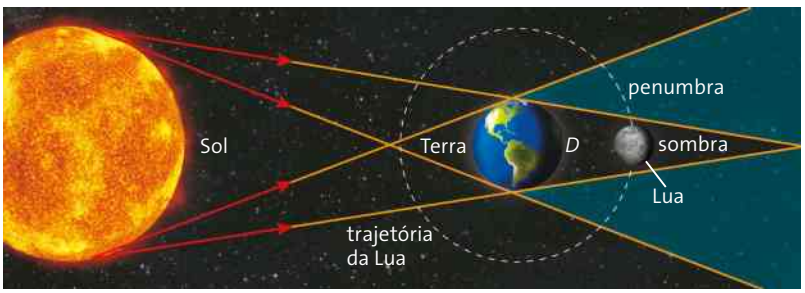
A localização do observador é que determina se ele verá um eclipse total, parcial, ou, ainda, se não verá eclipse nenhum. Observe a **figura 8.20**. Um observador na região *A*, que está na sombra, constata um eclipse total. Mas se ele estivesse na região *B*, que se encontra na penumbra, estaria vendo um eclipse parcial. E quem está em *C*, que está numa região totalmente iluminada, não vê eclipse nenhum.



Pedro Hamdan/Arquivo da editora

Figura 8.20 Eclipse solar e a posição de três observadores.

O eclipse da Lua ocorre quando esse satélite natural passa pela região de sombra da Terra, determinada pelos raios solares que tangenciam a superfície. Segundo o esquema da **figura 8.21**, é noite na região *D*. Um observador, em qualquer ponto dessa região, não está vendo a Lua. Isso acontece por duas razões: ela não é uma fonte luminosa e a luz solar não a atinge.



Pedro Hamdan/Arquivo da editora

Figura 8.21 Representação esquemática de um eclipse lunar.

Os eclipses e as fases da Lua

A **figura 8.22** ilustra a trajetória da Lua, considerando seu movimento ao redor da Terra. Essa órbita é ligeiramente elíptica e foi dividida em quatro partes: as fases da Lua.

Na figura, vemos que, assim como acontece com a Terra, metade da Lua está sempre iluminada pelo Sol. Cada fase da Lua depende de quanto podemos observar dessa metade iluminada pelo Sol. O intervalo de tempo entre duas fases idênticas é chamado de mês lunar, ou mês sinódico. Ele dura 29 dias, 12 horas, 44 minutos e 2,8 segundos.

Na **figura 8.23**, temos a representação da visão que um observador situado no hemisfério sul tem da Lua quando ela passa pelas posições P_1, P_2, P_3 e P_4 de sua órbita. No hemisfério norte, um observador vê essas mesmas figuras, porém invertidas. Isso não é por acaso. Em relação a quem está no hemisfério sul, esse observador está de ponta-cabeça.

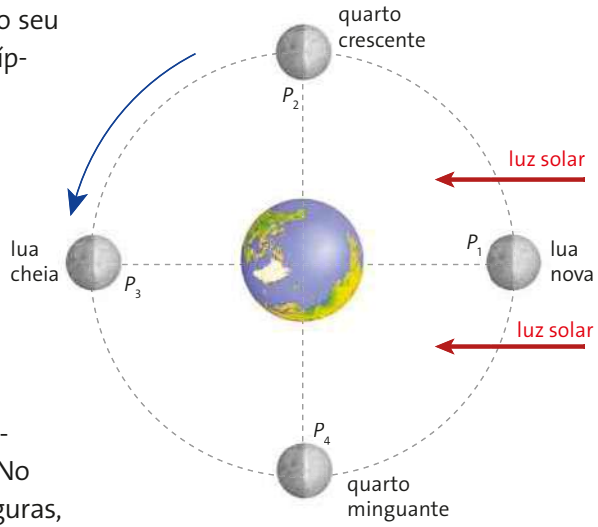
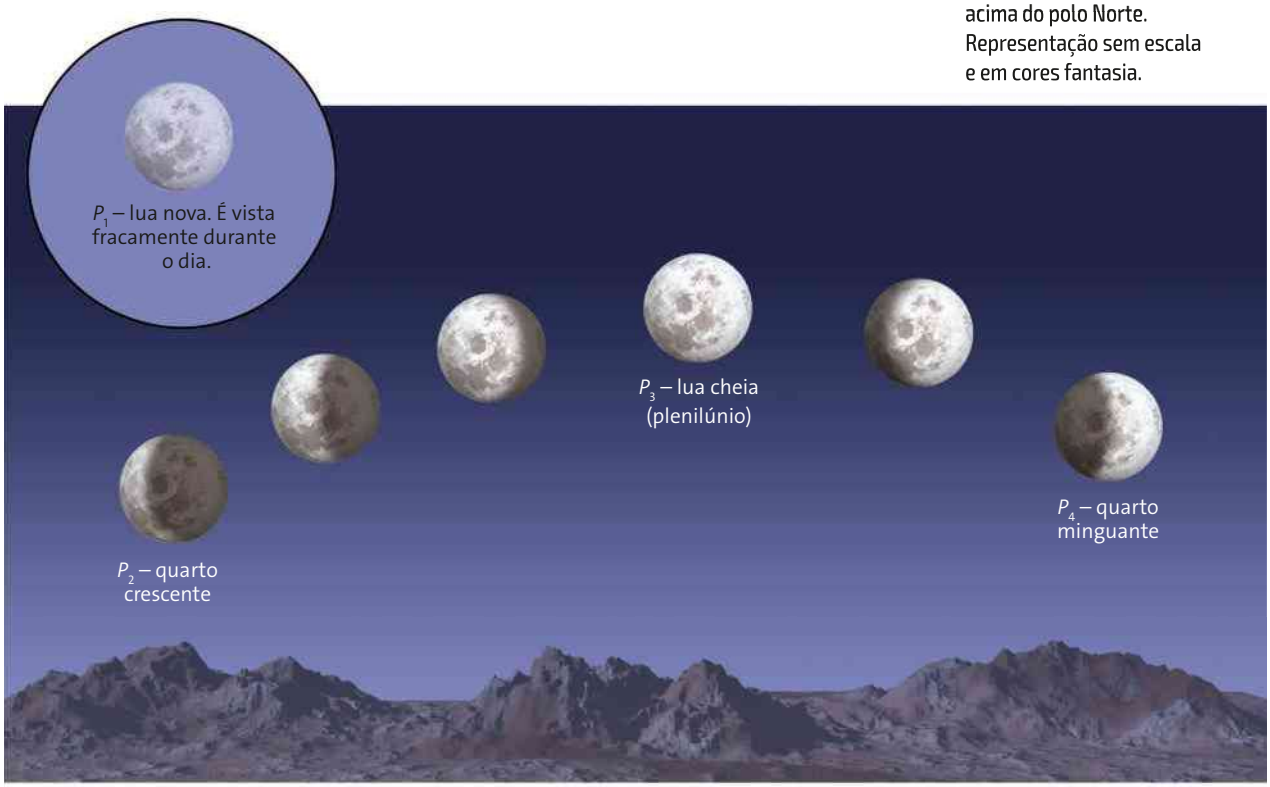


Figura 8.22 Trajetória da Lua em relação à Terra, considerando-se observação de um ponto muito acima do polo Norte. Representação sem escala e em cores fantasia.



Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 8.23 Visão que um observador situado no hemisfério sul tem da Lua. Representação sem escala e em cores fantasia.

Nos dias que sucedem à situação do ponto P_2, um observador percebe que a fração iluminada que ele pode ver vai aumentando. É o quarto crescente. Quando a Lua está no ponto P_3, mostra-se como um disco totalmente iluminado. Começa o período de lua cheia. A partir do ponto P_4, a fração iluminada que vemos aqui da Terra vai diminuindo (minguando). É o quarto minguante. No ponto P_1, a Lua apresenta-se com um disco escuro bem tênue e só é vista durante o dia. Só não fica totalmente invisível porque recebe luz refletida pela Terra. Depois desse trecho, um novo ciclo lunar vai começar. Essa é a fase da lua nova.

Só é possível a Lua estar alinhada com a Terra e o Sol nas fases de nova e cheia (situações *A* e *D*); mas, como a órbita da Lua está inclinada de 5°7' em relação ao plano da Terra ao redor do Sol, mesmo nessas fases o alinhamento ocorre com pouca frequência (**figura 8.24**). Quando ocorre, temos os eclipses.

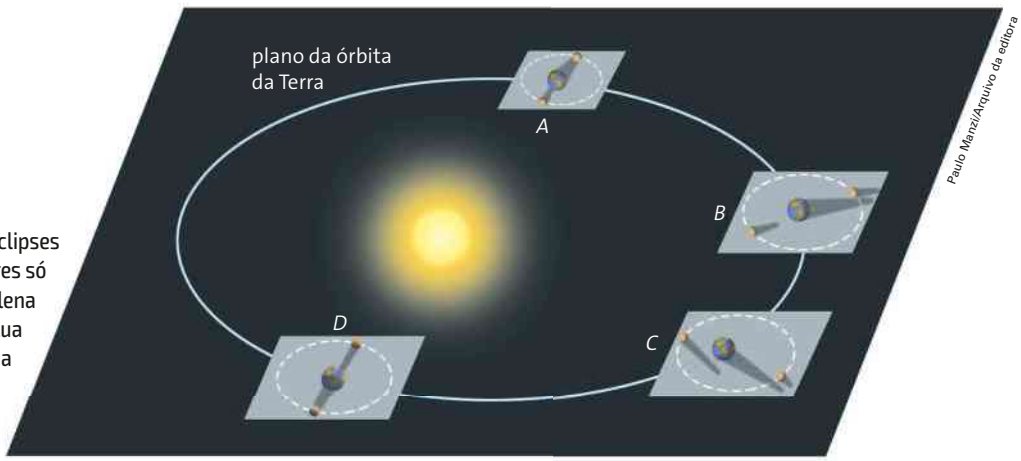


Figura 8.24 Os eclipses lunares e solares só ocorrem quando, em plena fase cheia ou nova, a Lua fura o plano da órbita da Terra, como nas situações *A* e *D*. Representação sem escala e em cores fantasia.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

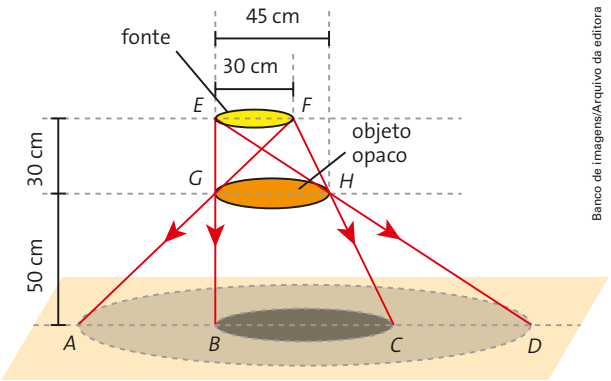
Exercícios

6. (Enem) A sombra de uma pessoa que tem 1,80 m de altura mede 60 cm. No mesmo momento, a seu lado, a sombra projetada de um poste mede 2,00 m. Se, mais tarde, a sombra do poste diminuiu 50 cm, a sombra da pessoa passou a medir:

a) 30 cm. c) 50 cm. e) 90 cm.
X b) 45 cm. d) 80 cm.

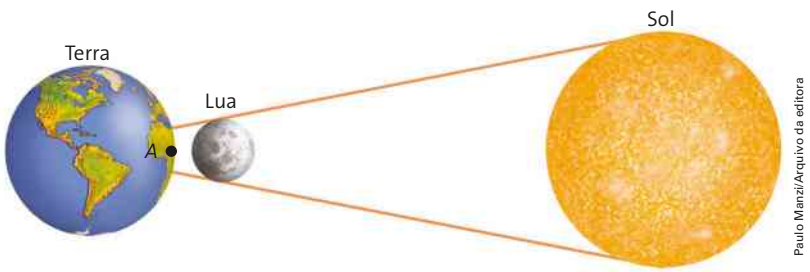
7. Não, mas na parte da penumbra ele pode ver uma parte da fonte.

7. Uma fonte extensa circular de diâmetro 30 cm está diante de um objeto plano e opaco, também circular e de diâmetro 45 cm. A fonte e o objeto situam-se em planos paralelos. No chão, que se encontra a 50 cm do objeto, conforme mostra a figura (sem escala e em cores fantasia), forma-se uma região de sombra e uma de penumbra. Existe algum ponto na região de sombra de onde um observador poderia ver alguma parte da fonte? E na região de penumbra?



8. Em qual fase da Lua é possível ocorrer um eclipse solar? Justifique. Lua nova, pois é a única fase na qual a Lua pode se interpor entre a Terra e o Sol.

9. A figura seguinte ilustra (sem escala e em cores fantasia) o alinhamento do Sol, da Terra e da Lua no momento de um eclipse.



a) Para uma pessoa colocada no ponto *A*, trata-se de um eclipse do Sol ou da Lua? Justifique. Solar.
b) O eclipse é total ou parcial? Total.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

3 Reflexão luminosa e espelhos planos

Na **figura 8.25**, temos a foto de uma pessoa e sua imagem refletida em um espelho plano.

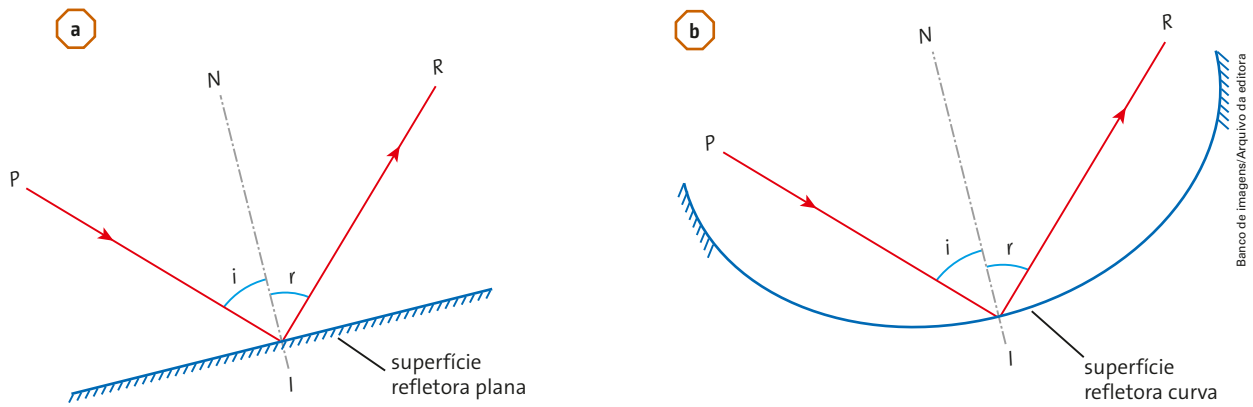
Para que possamos entender o processo geométrico de formação de imagens em espelhos planos, precisamos, em primeiro lugar, entender o fenômeno da reflexão luminosa e as leis a que ele obedece.

O fenômeno da reflexão luminosa ocorre quando um raio de luz incide na superfície de separação de dois meios e retorna ao meio de origem. As figuras seguintes ilustram esse fenômeno em duas situações distintas: a superfície refletora plana (**figura 8.26.a**) e a superfície refletora curva (**figura 8.26.b**).



Karen Struthers/Shutterstock

Figura 8.25 Adolescente e a sua imagem refletida em um espelho plano.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 8.26 Independentemente de a superfície refletora ser plana (**a**) ou curva (**b**), o raio de luz não muda de meio ao sofrer a reflexão.

A reflexão luminosa de um raio de luz obedece a duas leis:

1ª – O raio incidente, o raio refletido e a normal à superfície no ponto de incidência estão no mesmo plano;

2ª – A medida do ângulo de incidência (i) é igual à do ângulo de reflexão (r), ou seja, $i = r$.

É importante observar que:

- As leis da reflexão luminosa são válidas tanto para superfícies lisas como para rugosas. No segundo caso, em razão da irregularidade da superfície, a reta normal, ponto a ponto, varia bruscamente de direção. Esse fato faz com que a luz se reflita em todas as direções.

  A reflexão difusa é responsável pela nossa visão dos objetos iluminados.

- Nas superfícies lisas – planas ou não – existe regularidade na direção da luz refletida; por isso elas não são convenientes para a difusão da luz. No entanto, são adequadas para a obtenção de espelhos para onde a luz refletida é direcionada.

Espelhos planos

Um espelho plano é considerado um sistema óptico refletor. Uma pessoa, utilizando um espelho plano, vê sua imagem e a de outros objetos colocados dentro do campo visual do espelho. A luz difundida pela pessoa é refletida pelo espelho e retorna para os seus olhos: a pessoa enxerga a sua imagem. Nessas condições, dizemos que o sistema óptico (espelho) associa uma imagem ao objeto.

Inicialmente, vamos demonstrar que a imagem de um ponto, conjugada por um espelho plano, apresenta a propriedade de simetria, ou seja, objeto (*O*) e imagem (*I*) são simétricos em relação ao espelho. Observe a **figura 8.27**. Na figura, o raio luminoso que parte do ponto *O* (objeto) sofre reflexão no ponto *P* do espelho. Para a pessoa que olha para o espelho é como se o raio luminoso saísse de *I* e atingisse seu olho. O que a pessoa enxerga é o ponto *I*, imagem do objeto *O*. Para demonstrar que as distâncias do objeto ao espelho (d_O) e da imagem ao espelho (d_I) são iguais, ou seja, que os pontos objeto (*O*) e imagem (*I*) são equidistantes do espelho, basta verificar na figura que $\alpha = i$ e $\beta = r$.

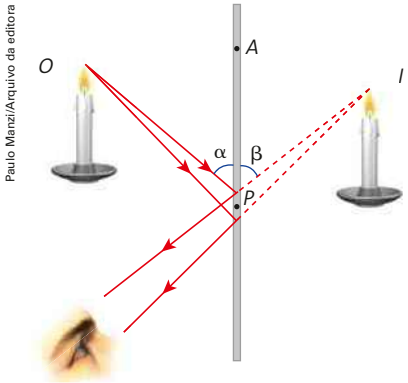
Mas, de acordo com a segunda lei da reflexão, $i = r$. Portanto, concluímos que $\alpha = \beta$ e que os triângulos *AOP* e *AIP* são congruentes. Nessas condições:

$$d_i = d_o$$

A demonstração acima foi feita com um único raio, mas podemos utilizar vários raios partindo do objeto *O*, conforme **figura 8.28**.

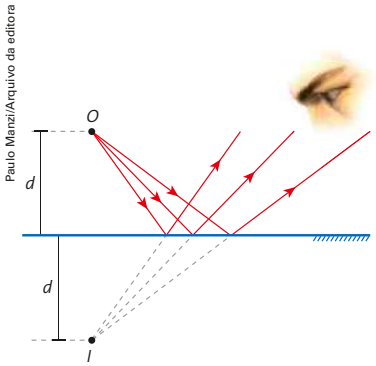
O ponto *O*, vértice da luz incidente, é denominado **ponto objeto real** e o *I*, vértice dos prolongamentos dos raios refletidos, é denominado **ponto imagem virtual**.

Esse procedimento também pode ser usado para a obtenção da imagem de um objeto extenso, que é um conjunto de pontos. Construímos a imagem do objeto extenso usando a propriedade da simetria, ponto por ponto. Na **figura 8.29**, em que uma pessoa vê a imagem de sua face no espelho, mostramos o processo para dois pontos, mas podemos continuar até o número de pontos que quisermos (**figura 8.30**).



Paulo Manzi/Arquivo da editora

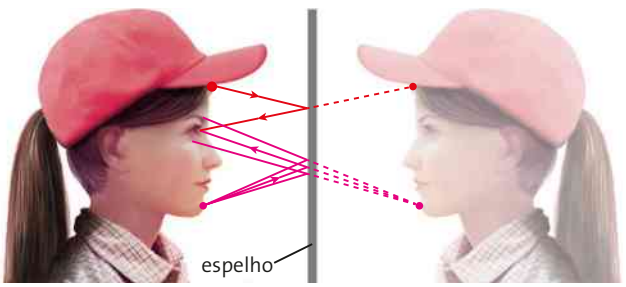
Figura 8.27 Imagem de uma vela conjugada por um espelho plano.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

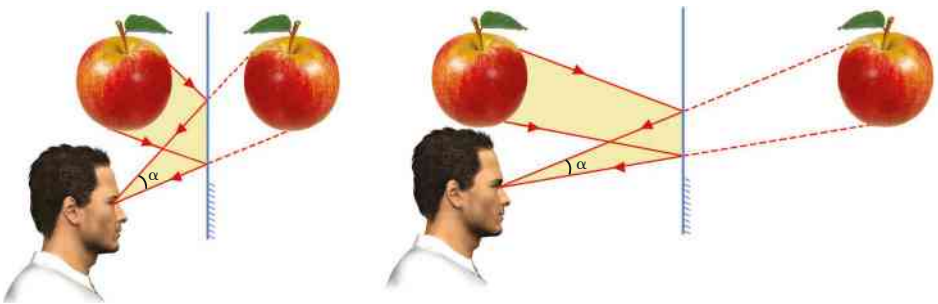
Figura 8.28 *O* é o ponto objeto: fonte dos raios incidentes; e *I* é o ponto imagem: fonte aparente dos raios refletidos.

As imagens desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.29 Representação da formação da imagem em um espelho plano.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 8.30 Observador visualizando as imagens que um espelho plano conjuga em duas situações diferentes. As duas imagens têm o mesmo tamanho, mas, no segundo caso, o observador vê segundo um ângulo de visada (α) menor.

Nos espelhos planos, o objeto e a imagem possuem sempre as mesmas dimensões, independentemente da distância que o objeto esteja do espelho. Entretanto, imagens mais distantes do observador são vistas sob ângulo visual menor. Por exemplo, quando um carro vai se afastando de um observador, vai sendo visualizado com ângulos cada vez menores; mas o seu tamanho real continua o mesmo.

Como as imagens conjugadas pelos espelhos planos são virtuais, isto é, se formam pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios que emergem do sistema óptico, não podem ser projetadas em uma tela.

Os espelhos planos não "invertem" a imagem. O termo correto que aqui se aplica é reversão, ou seja, a imagem corresponde ao avesso do objeto. Observe a **figura 8.31**. Se o garoto segura a escova com a mão direita, a imagem no espelho segura a escova com o avesso da mão direita: a mão esquerda.

As dimensões do objeto têm sempre a mesma medida que as da imagem. As figuras geométricas, entretanto, não são iguais, assim como o sapato do pé esquerdo não é igual ao do direito, embora eles tenham as mesmas dimensões.

A reversão é facilmente percebida quando tomamos como exemplo algumas letras não simétricas de nosso alfabeto. O resultado da reversão nos espelhos pode ser imitado escrevendo-se em uma fina folha de papel para depois olhá-la pela parte de trás. Observe a **figura 8.32**.

Regine Mahaux/The Image Bank/Getty Images



Figura 8.31 O reverso da mão direita é igual à mão esquerda.

Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora



Paulo Manzi/Arquivo da editora



Figura 8.32 As letras que têm eixo de simetria paralelo ao plano do espelho possuem imagens iguais (**a**).
O resultado da reversão nos espelhos pode ser imitado escrevendo-se em uma fina folha de papel para depois olhá-la pela parte de trás (**b**).

Campo visual

Observe a **figura 8.33**, na qual determinada região do espaço é visualizada, por reflexão, através de um espelho.

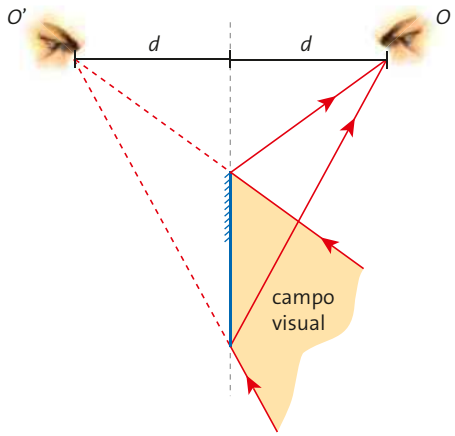
A região visualizada por uma pessoa em um espelho varia conforme a posição em que ela está. Dizemos que o campo visual do observador, relativamente ao espelho, depende da posição relativa entre eles.

A **figura 8.34** ilustra o procedimento para determinar o campo visual de um espelho plano para um dado observador (*O*). Na figura, *O'* representa a imagem do observador *O* (simétrica em relação ao plano do espelho). A partir de *O'*, traçamos duas semirretas que passam pelos extremos do espelho. No semiespaço em que a luz é incidente, essas retas determinam o campo visual do espelho para a posição do observador.



David Papazian/Shutterstock

Figura 8.33 Imagem obtida em um espelho plano.

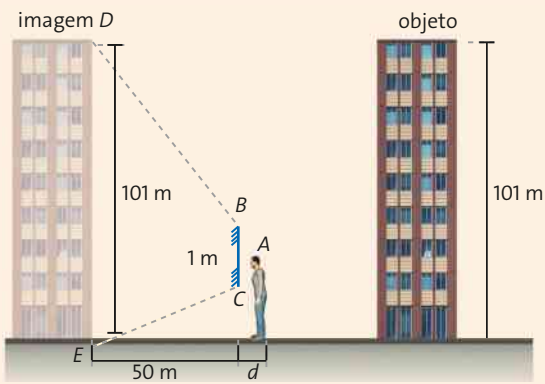


Paulo Manzi/Arquivos da editora

Figura 8.34 Campo visual de um espelho plano.

Exercício resolvido

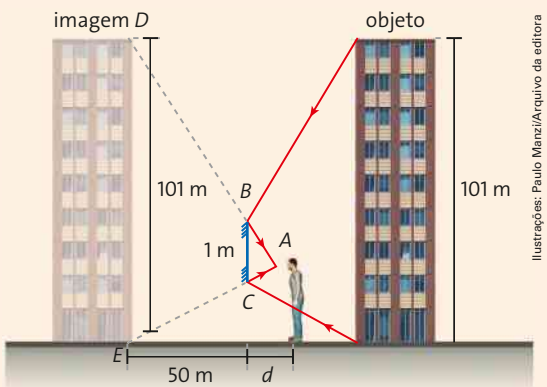
1. Uma pessoa deseja observar por inteiro um prédio de 101 m de altura por meio de um espelho plano de 1,0 m situado a 50 m do prédio, conforme mostra a figura (sem escala e em cores fantasia).



Qual a distância mínima (*d*) que a pessoa deve ficar do espelho?

Resolução:

A figura seguinte mostra os dois raios que partem dos extremos do objeto (prédio), refletem-se no espelho e atingem o olho do observador. Este vê a imagem do prédio que está a 50 m do espelho.



Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

De acordo com a figura acima, o triângulo *ABC* é semelhante ao *ADE*. Assim, podemos escrever que:

$$\frac{50 + d}{101} = \frac{d}{1} \Rightarrow 101 \cdot d = 50 + d \Rightarrow 100 \cdot d = 50 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d = 0{,}5$$

Portanto, a distância mínima que a pessoa deve ficar do espelho é 0,5 m (50 cm).

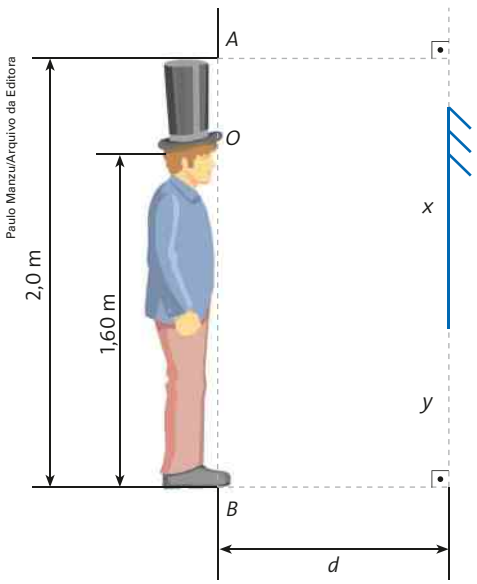
Exercícios

10. Suponha que você esteja, inicialmente, a 3,0 m de um espelho plano e, em seguida, aproxime-se do espelho ficando a 1,0 m dele.

a) Na posição inicial, qual era a distância entre você e sua imagem? $d = 6{,}0$ m

b) Ao se aproximar do espelho, o que aconteceu com o tamanho de sua imagem? Permaneceu o mesmo.

11. Uma pessoa com uma cartola na cabeça está a uma distância *d* de um espelho plano vertical. Do extremo superior da cartola até os pés, a altura é 2,00 m e, dos olhos da pessoa até o solo, 1,60 m. Considere que a ponta dos pés, o extremo superior da cartola e o olho do observador estejam situados num mesmo plano vertical.



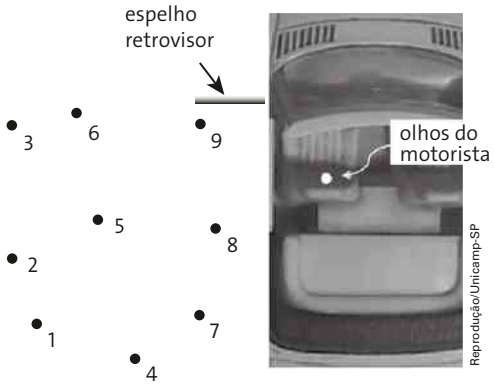
Paulo Manzi/Arquivo da Editora

a) Qual é a dimensão vertical mínima que o espelho deve ter para que a imagem seja vista integralmente? $x = 1{,}0$ m

b) Considerando que esteja sendo utilizado o espelho de dimensão mínima, a que distância do solo deve estar sua borda inferior? $y = 0{,}8$ m

c) Nesse caso, em que o objeto é o próprio observador, as respostas dos dois itens anteriores dependem da distância do objeto ao espelho? Não.

12. (Unicamp-SP) A figura a seguir mostra um espelho retrovisor plano na lateral esquerda de um carro. O espelho está disposto verticalmente e a altura do seu centro coincide com a dos olhos do motorista. Os pontos da figura pertencem a um plano horizontal que passa pelo centro do espelho. Nesse caso, os pontos que podem ser vistos pelo motorista são:

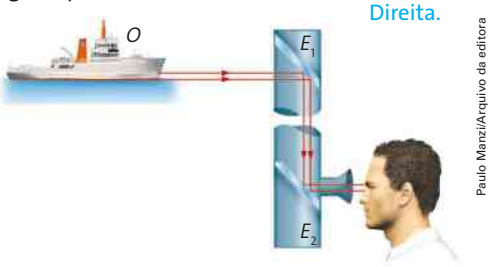


Reprodução/Unicamp-SP

a) 1, 4, 5 e 9.
b) 4, 7, 8 e 9.
x c) 1, 2, 5 e 9.
d) 2, 5, 6 e 9.

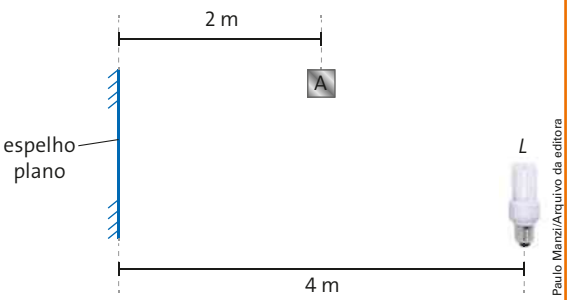
13. A figura abaixo é uma representação esquemática de um periscópio rudimentar que utiliza dois espelhos planos E_1 e E_2, de tal forma que o observador consegue ver, por reflexão da luz nesses espelhos, a imagem do objeto *O*.

De acordo com os dois raios de luz traçados na figura, a imagem que o observador vê é direita ou revertida? Direita.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

14. Na figura abaixo, *A* é um objeto que se encontra a 2,0 m de um espelho plano e *L* é uma lâmpada acesa que está a 4,0 m do espelho. *A*' e *L*' representam as imagens de *A* e *L*, respectivamente, conjugadas pelo espelho.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

a) Copie a figura em seu caderno e nela trace um raio de luz que parte da lâmpada *L* e, após sofrer reflexão no espelho, atinge o objeto *A*. Em que ponto esse raio atinge o espelho?

b) A distância percorrida pelo raio de luz do item **a** é maior, menor ou igual à distância de *A* até *L*'?

14. a) Veja resposta no Manual do Professor.
b) Igual.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

4 Associação de espelhos planos

A associação de espelhos planos permite-nos obter várias imagens de um mesmo objeto, conforme mostram as **figuras 8.35** e **8.36**.

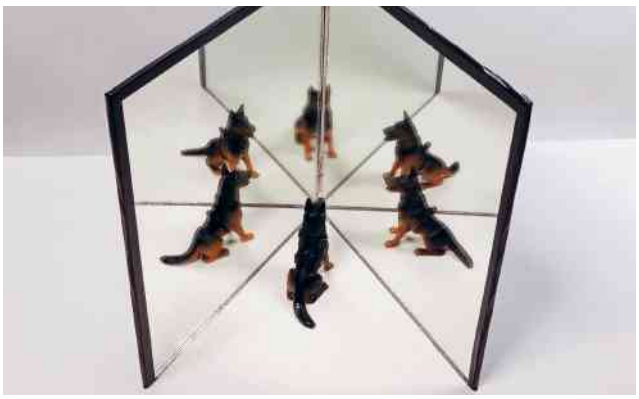


Figura 8.35 Objeto e cinco imagens formadas por dois espelhos planos.

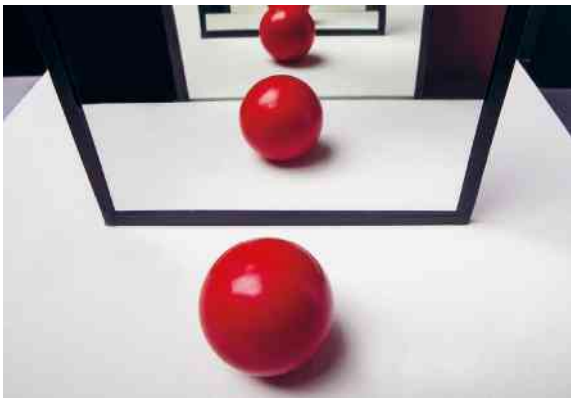


Figura 8.36 Objeto entre dois espelhos planos paralelos.

Fotos: Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Dependendo do ângulo entre os espelhos, podemos obter um número relativamente grande de imagens. Desconsiderando a absorção da luz, obtemos infinitas imagens no caso de os espelhos estarem paralelos.

O número n de imagens formadas pela associação de dois espelhos planos depende do ângulo entre eles. Esse número é dado por:

$$n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1$$

Essa expressão é valida quando n resulta em:

- um número ímpar, para o objeto colocado em qualquer ponto entre dois espelhos;
- um número par, para o objeto colocado no plano bissetor do ângulo θ.

Fora dessas duas condições, o número de imagens formadas é simplesmente:

$$n = \frac{360^\circ}{\theta}$$

Se n não for inteiro, devemos arredondá-lo para o inteiro imediatamente superior.

Quando dois espelhos são dispostos frontal e paralelamente ($\theta = 0$), a imagem de um serve de objeto para o outro. Dessa forma, obtêm-se infinitas imagens, como vemos na **figura 8.36**.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

15. Um armário de banheiro possui duas portas espelhadas com dobradiças no mesmo lugar. Uma delas gira no sentido horário e, a outra, no sentido anti-horário. Uma pessoa abre as duas portas e observa a formação de cinco imagens quando a sua mão é colocada entre elas. Nessas condições, determine o ângulo formado entre as duas portas. $\theta = 60^\circ$

16. Um fotógrafo tira uma foto de um casal que se cumprimenta com a mão direita, posicionado entre dois espelhos planos verticais. Sabendo que o ângulo entre os espelhos é de 60°, responda:

a) Quantos casais aparecem nessa foto? Seis.
b) Quantos casais se cumprimentam com a mão esquerda na foto? Três.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

5 Espelhos esféricos

Em determinadas situações, precisamos obter uma imagem ampliada (ou reduzida) de um objeto. Nesses casos, os espelhos esféricos podem nos ajudar, pois, nos espelhos planos, a imagem é do mesmo tamanho que o objeto.

Os espelhos esféricos são empregados em retrovisores de automóveis, esquemas de vigilância, telescópios, lanternas, clínicas de estética, etc. (figura 8.37). São instrumentos que ajudam a transcender os limites de nossa capacidade visual.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.



Keith Morris/Alamy/Other Images



Martin P Wilson/Demotix/Corbis/Latinstock

Figura 8.37 Espelho convexo (**a**) e espelho côncavo (**b**).

Normalmente, esses espelhos são calotas esféricas obtidas pelo corte de uma superfície esférica com um plano (figura 8.38) e, em seguida, espelhadas.

Se o espelhamento é feito na superfície interna da calota, o espelho esférico é denominado **côncavo** (figura 8.39).

Quando o espelhamento é feito na superfície externa da calota, o espelho esférico é denominado **convexo** (figura 8.40).

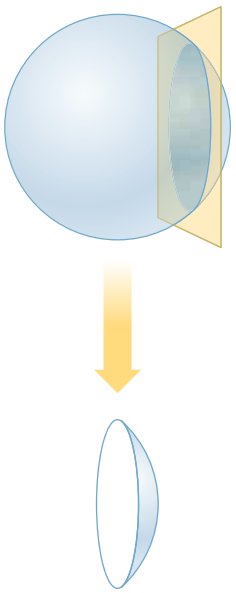


Figura 8.38 Obtenção da calota esférica pelo corte de uma superfície esférica com um plano.

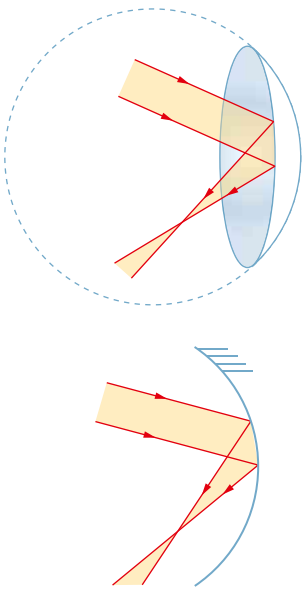


Figura 8.39 Espelho côncavo e seu esquema bidimensional. A parte espelhada é interna à calota.

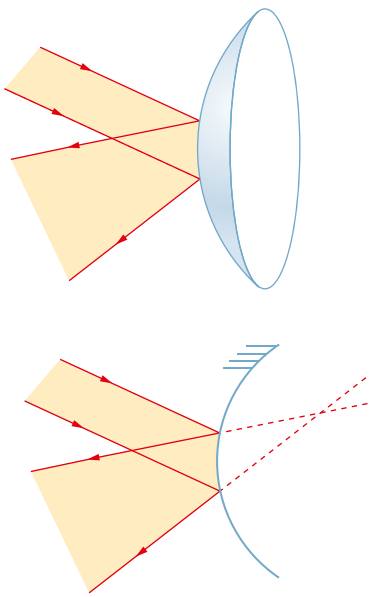


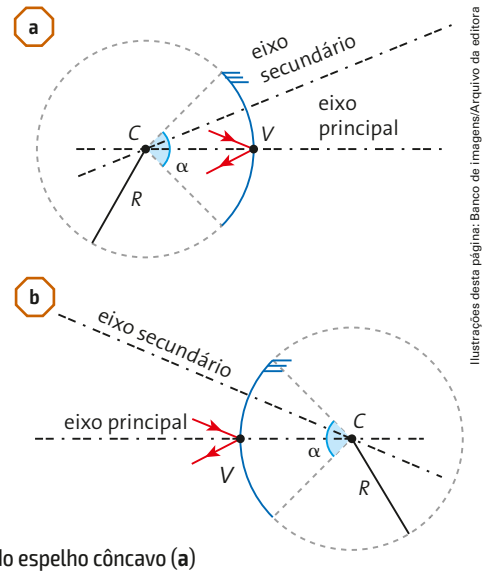
Figura 8.40 Espelho convexo e seu esquema bidimensional. A parte espelhada é externa à calota.

Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Elementos dos espelhos esféricos

Na figura 8.41, destacamos os elementos dos espelhos esféricos:

- *C* (centro de curvatura) – O centro da superfície esférica que deu origem ao espelho.
- *V* (vértice) – O centro geométrico da calota esférica.
- *R* (raio) – O raio da superfície esférica.
- *CV* (eixo principal) – Reta que contém o centro de curvatura (*C*) e o vértice (*V*).
- α (ângulo de abertura do espelho) – Medida do ângulo central correspondente à calota.



Ilustrações desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 8.41 Elementos do espelho côncavo (**a**) e elementos do espelho convexo (**b**).

Nos espelhos esféricos (côncavos e convexos), além do centro de curvatura (*C*) e do vértice (*V*), outro ponto merece destaque: o foco principal (*F*).

O foco principal de um espelho esférico (*F*) está no ponto médio entre o centro de curvatura (*C*) e o vértice (*V*). A distância entre o foco principal e o vértice do espelho é denominada **distância focal** (*f*) e seu módulo é dado por:

$$f = \frac{R}{2}$$

No espelho esférico côncavo, a distância focal (*f*) é positiva e, no espelho esférico convexo, é negativa (figura 8.42).

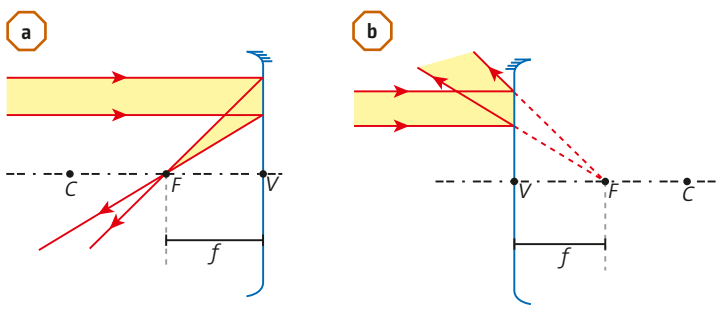
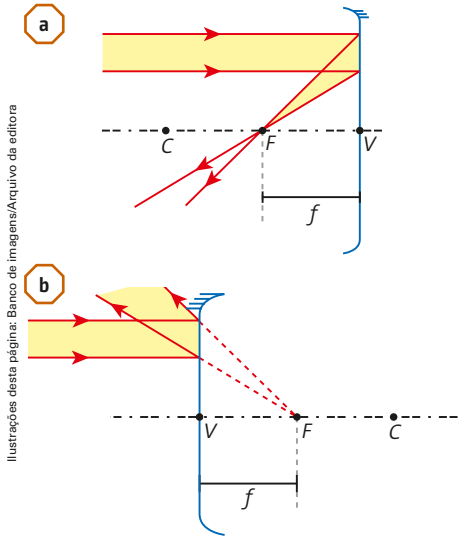


Figura 8.42 Foco principal (*F*) e distância focal (*f*) para o espelho côncavo (**a**) e para o espelho convexo (**b**).

Raios notáveis

Dentre os raios luminosos emitidos por um objeto que atingem um espelho esférico, alguns têm um comportamento específico – são os **raios notáveis**. Vamos apresentá-los na forma de propriedades.

- **Propriedade 1** – Os raios luminosos que incidem paralelamente ao eixo principal de um espelho são refletidos passando pelo foco (se o espelho for côncavo) (figura 8.43.a) ou são refletidos de tal forma que os seus prolongamentos passem pelo foco (se o espelho for convexo) (figura 8.43.b).



Ilustrações desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 8.43 Foco imagem real de um espelho côncavo (**a**). Foco imagem virtual de um espelho convexo (**b**).

Como esse foco se refere à luz emergente do sistema óptico (espelho), é chamado de **foco imagem**.

- **Propriedade 2** – Os raios luminosos (ou seus prolongamentos) que incidem passando pelo foco principal são refletidos paralelamente ao eixo principal (figura 8.44).

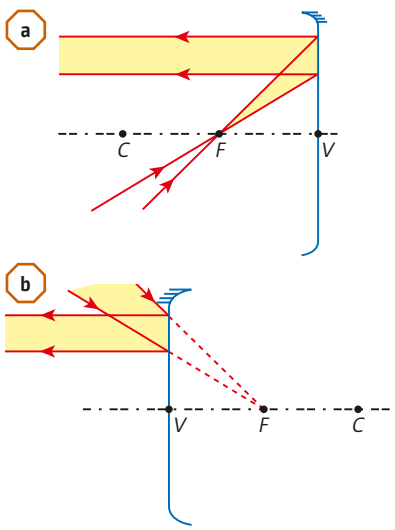


Figura 8.44 Foco objeto real de um espelho côncavo (**a**). Foco objeto real de um espelho convexo (**b**).

Como esse foco se refere à luz incidente ao sistema óptico (espelho), é chamado de **foco objeto**.

Observe que os raios luminosos notáveis utilizados nas propriedades 1 e 2 obedecem ao princípio da reversibilidade dos raios luminosos. Portanto, concluímos que, nos espelhos esféricos, o foco objeto e o foco imagem coincidem.

- **Propriedade 3** – Os raios luminosos (ou seus prolongamentos) que incidem passando pelo centro de curvatura são refletidos sobre si mesmos (figura 8.45).

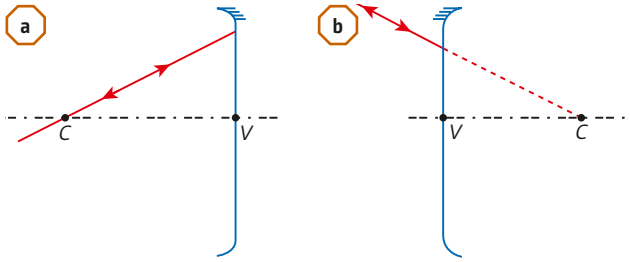


Figura 8.45 Centro de curvatura de um espelho côncavo (**a**). Centro de curvatura de um espelho convexo (**b**).

- **Propriedade 4** – O raio luminoso que incide no vértice do espelho tem como raio refletido o seu simétrico em relação ao eixo principal (figura 8.46).

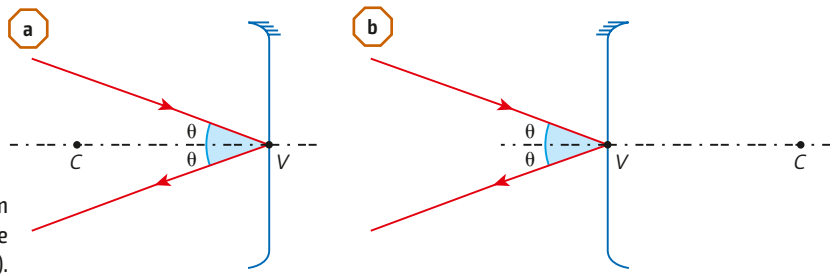


Figura 8.46 Vértice de um espelho côncavo (**a**). Vértice de um espelho convexo (**b**).

Exercícios

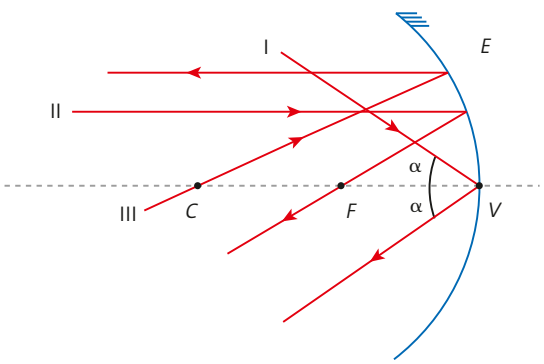
ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

17. Um farol de automóvel é constituído por um espelho e uma lâmpada que emite luz. Para que o farol funcione de acordo, produzindo um feixe de raios paralelos:

a) Qual deve ser o tipo de espelho: côncavo ou convexo? Côncavo.

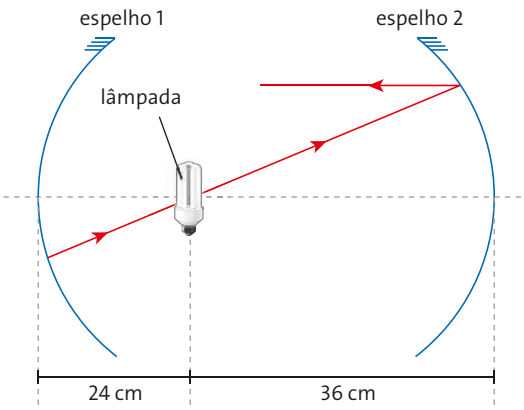
b) Em que ponto deve ser colocada a lâmpada? No foco principal.

18. Na figura seguinte estão representados três raios luminosos, I, II e III, que incidem sobre um espelho esférico côncavo.



Quais deles foram traçados de acordo com as propriedades dos raios notáveis? I e II.

19. Dois espelhos côncavos são colocados um em frente ao outro, com seus focos principais localizados sobre uma mesma reta. Entre os espelhos é colocada uma lâmpada acesa, conforme mostra a figura.



O raio luminoso mostrado na figura, após incidir no espelho 1 e refletir sobre si mesmo, incide no espelho 2 e reflete paralelamente à reta que contém os focos principais dos espelhos. Com base nos valores numéricos dados na figura, responda: quais são as distâncias focais dos dois espelhos? 12 cm e 36 cm.

Ilustrações desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

6 Construção de imagens

Quando um objeto real é posicionado diante de um espelho esférico, seja ele côncavo ou convexo, obtemos uma imagem conjugada que pode ser real ou virtual. Além disso, a imagem pode ser ampliada, reduzida ou do mesmo tamanho que o objeto.

No caso específico mostrado na **figura 8.47**, o espelho esférico é côncavo e a imagem está ampliada, ou seja, é maior que o objeto. Algumas pessoas costumam ter no banheiro de sua casa um espelho côncavo para facilitar a limpeza da pele do rosto, por exemplo.

Mark Boulton/Alamy/Other Images



Figura 8.47 Espelho côncavo utilizado para obter imagem ampliada.

Na figura, não vemos os raios de luz que emanam do rosto da pessoa e incidem no espelho, como também não vemos os prolongamentos dos raios de luz que emergem do espelho e formam a imagem. No entanto, podemos mostrar a construção geométrica da imagem conjugada pelo espelho.

Para isso, vamos, inicialmente, mostrar como obtemos a imagem (*I*) de um único ponto (*O*) (**figura 8.48**); em seguida, mostramos o procedimento para corpos extensos. O ponto objeto (*O*) é o vértice da luz que **incide** no espelho e o ponto imagem (*I*) é o vértice da luz que **emerge** do espelho, conforme mostram as figuras seguintes.

Banco de Imagens/Arquivo da editora

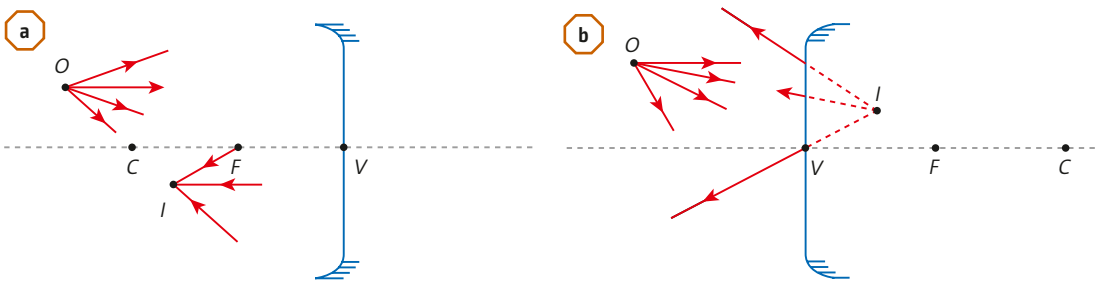


Figura 8.48 Espelho esférico côncavo: objeto real (*O*) e imagem real (*I*) (**a**). Espelho esférico convexo: objeto real (*O*) e imagem virtual (*I*) (**b**).

Nas figuras, observamos que, para um ponto objeto real (*O*), o espelho côncavo conjuga um ponto imagem real (*I*) e o espelho convexo, um ponto imagem virtual. Aqui, duas questões são pertinentes: conhecendo-se a posição do ponto objeto, como determinamos a posição do ponto imagem? O que acontece com a imagem se mudamos a posição do objeto?

Para responder à primeira questão, precisamos definir o tipo de espelho e traçar os raios de luz de acordo com as propriedades dos raios notáveis vistas no tópico anterior. Na **figura 8.49**, temos a construção geométrica da imagem (*A'*) conjugada por um espelho côncavo de um objeto (*A*).

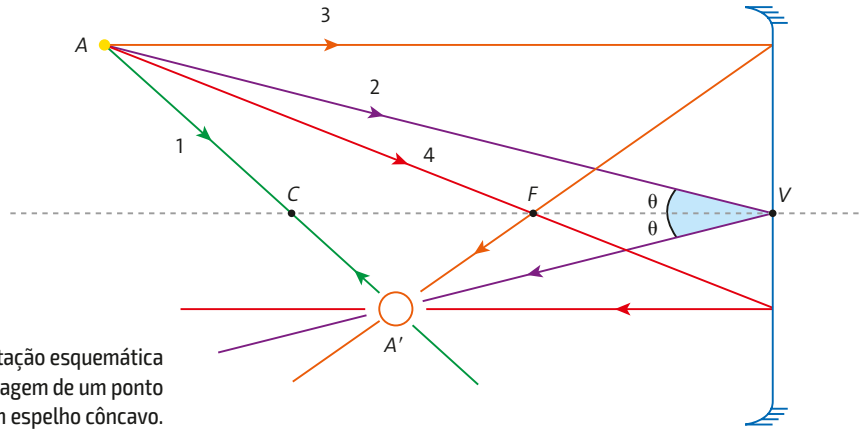
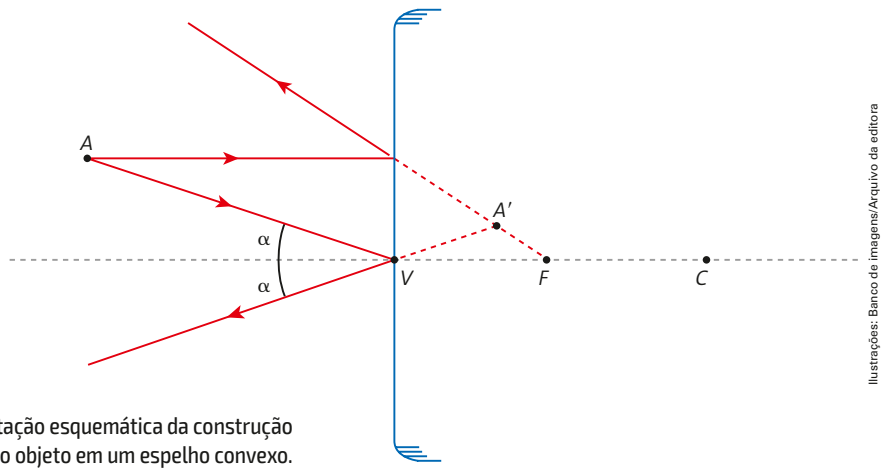


Figura 8.49 Representação esquemática da construção da imagem de um ponto objeto em um espelho côncavo.

Observe que não há necessidade de traçarmos os quatro raios notáveis. Somente dois são suficientes, ou seja, qualquer par de propriedades que escolhermos nos levará ao mesmo resultado.

A **figura 8.50** ilustra a construção da imagem (*A'*) de um ponto objeto (*A*) conjugada por um espelho esférico convexo, por meio de duas propriedades dos raios notáveis.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

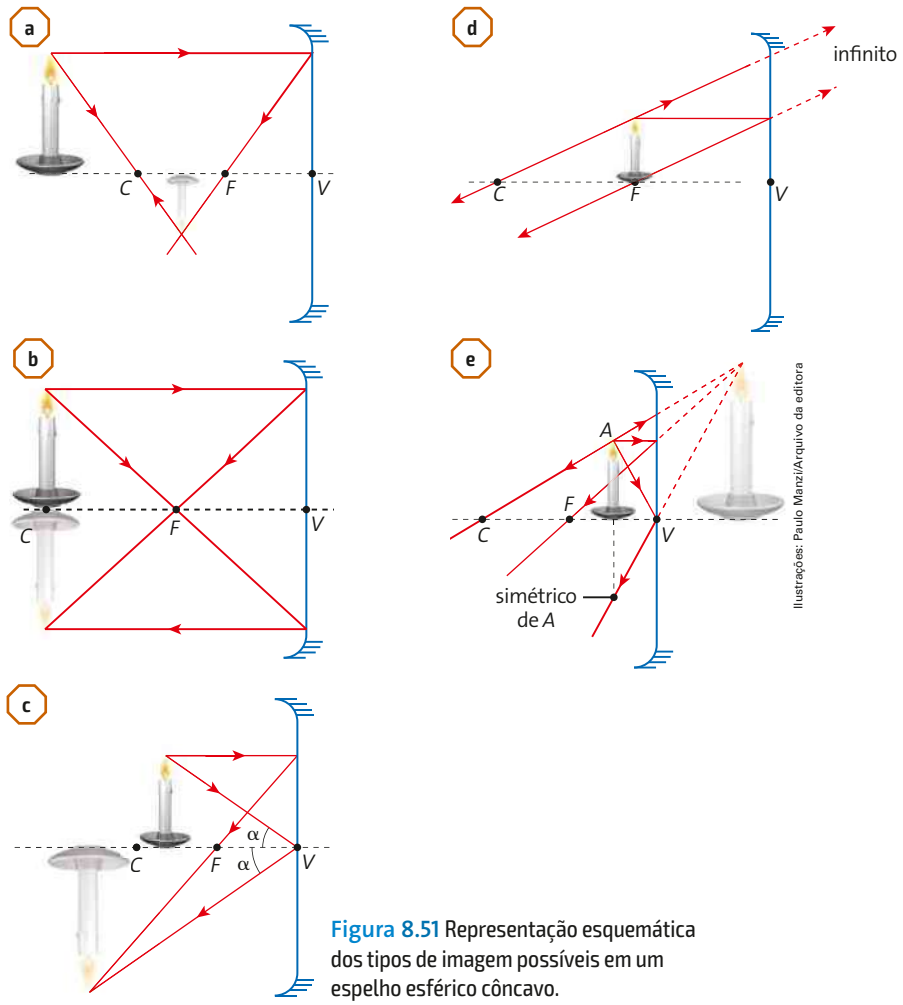
Figura 8.50 Representação esquemática da construção da imagem de um ponto objeto em um espelho convexo.

Vejamos, agora, a segunda questão. A posição do ponto imagem, bem como sua natureza (real ou virtual) depende da posição do ponto objeto em relação ao foco do espelho. Para mostrar como isso acontece nos espelhos côncavo e convexo, vamos utilizar objetos extensos no lugar do ponto objeto. Para esses casos, devemos observar algumas propriedades que facilitam o processo da construção geométrica dos raios notáveis:

- Se o objeto é retilíneo, a imagem também é.
- Se o objeto está sobre o eixo principal, a imagem também está.
- Se o objeto está disposto perpendicularmente ao eixo principal, a imagem também está.

Espelho côncavo

A figura 8.51 mostra a construção geométrica da imagem conjugada por um espelho esférico côncavo, para diferentes posições do objeto (nesse caso, um castiçal) em relação ao vértice do espelho. Observe que, em cada caso, utilizamos somente duas propriedades dos raios notáveis, mas nem sempre as mesmas.



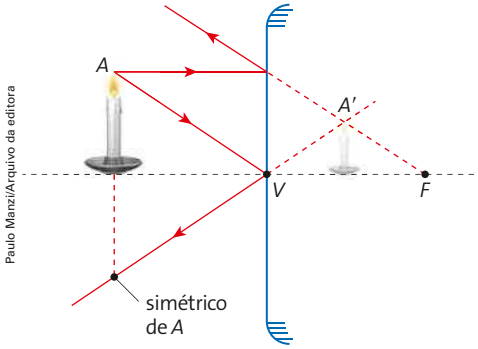
Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 8.51 Representação esquemática dos tipos de imagem possíveis em um espelho esférico côncavo.

Para um objeto real, o espelho côncavo pode conjugar uma imagem real ou virtual, direita ou invertida, menor, maior ou igual ao tamanho do objeto, dependendo da posição deste em relação ao vértice do espelho. Analisando as figuras, observamos que:

- quando a imagem é real, ela é invertida (três primeiras figuras), podendo ser menor, maior ou igual ao tamanho do objeto;
- quando a imagem é virtual, ela é direita e sempre maior que o objeto (última figura);
- se o objeto for colocado exatamente sobre o foco do espelho, a imagem vai para o infinito (figura 8.51.d). Ela é vista da mesma maneira como vemos a Lua e as estrelas, por exemplo – objetos extremamente grandes e distantes.

Portanto, com um espelho esférico côncavo não é possível obter uma imagem virtual, direita e menor que o objeto real. Esse tipo de imagem é característico dos espelhos esféricos convexos, como veremos a seguir.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 8.52 O espelho esférico convexo conjuga, de um objeto real, uma imagem virtual, direita e menor que o objeto.

Espelho convexo

Em relação a um objeto real, o espelho convexo conjuga sempre uma imagem direita, menor e de natureza virtual. Além disso, essa imagem estará sempre entre o foco e o vértice do espelho convexo, conforme mostra a **figura 8.52**.

Nos veículos automotores, é comum a utilização de um espelho esférico convexo para propiciar maior campo visual, como podemos ver na **figura 8.53**.


Gabor Nemes/Kino.com.br

Figura 8.53 O espelho convexo aumenta o campo visual.

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

20. Um objeto é colocado a 20 cm do vértice de um espelho esférico côncavo de distância focal igual a 8 cm.

a) A imagem conjugada pelo espelho é real ou virtual? Direita ou invertida? Maior, menor que o objeto ou igual a ele? Menor, real e invertida.

b) Explique o que acontece com as características da imagem se o objeto for deslocado para pontos mais próximos do vértice do espelho.
Veja resposta no Manual do Professor.

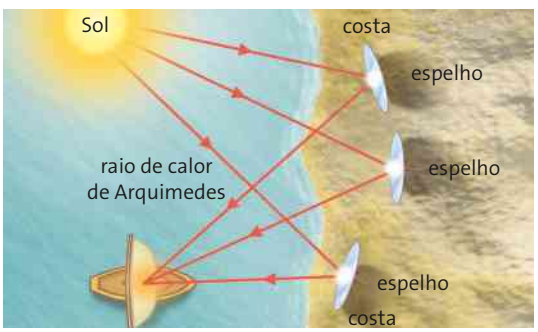
21. Para obter uma imagem ampliada do seu rosto, uma pessoa dispõe de um espelho esférico, com distância focal de 40 cm, em seu banheiro. Nessas condições:

a) O espelho esférico é côncavo ou convexo? Côncavo.

b) Qual é a distância máxima que a pessoa pode ficar do vértice do espelho? Ligeiramente menor que 40 cm.

22. Diz a lenda que Arquimedes, que viveu no século III antes de Cristo, defendeu a cidade de Siracusa de um ataque naval queimando as velas dos navios romanos utilizando a luz do Sol. $R = 100$ m

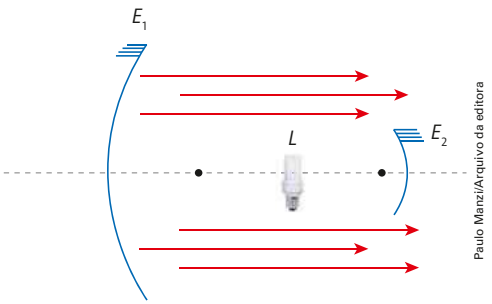
Para isso, após a ordem para que soldados polissem seus escudos, Arquimedes os colocou formando um arco com os escudos dispostos conforme a figura a seguir (sem escala e em cores fantasia).



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Supondo que os escudos formassem um espelho esférico côncavo e que a concentração dos raios solares fosse máxima, fazendo com que as velas dos navios se incendiassem, quando os navios estavam a 50 m dos escudos, responda: qual era o raio de curvatura do espelho côncavo formado?
No centro de curvatura do espelho E_2.

23. Para construir um holofote, uma pessoa utiliza dois espelhos esféricos côncavos, E_1 e E_2, e uma lâmpada L. Após alguns testes, ela consegue que a maior parte da luz proveniente da lâmpada seja projetada pelo espelho E_1 num feixe de raios praticamente paralelos, conforme mostra a figura.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Nesse arranjo, em que ponto a lâmpada se localiza:

a) em relação ao espelho E_1? No foco de E_1.

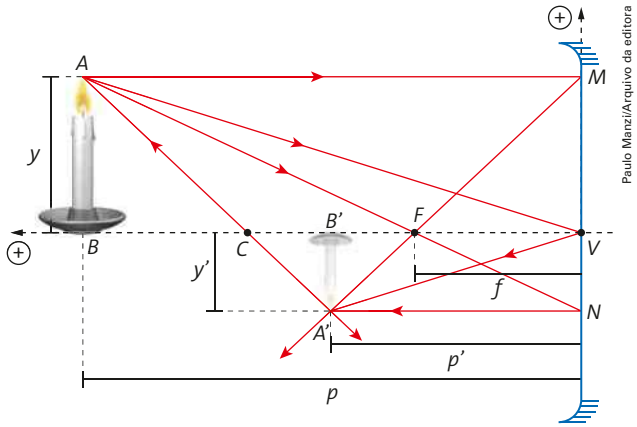
b) em relação ao espelho E_2?

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

7 Estudo analítico dos espelhos esféricos

Suponhamos um ponto A e sua imagem A'. Pelo conceito de objeto e imagem, a luz que emana de A, após ser refletida no espelho, determina A'. Reciprocamente, considerando-se o princípio da reversibilidade da luz, se A' for o objeto, sua imagem será o ponto A. É por essa razão que os pontos A e A' são ditos pontos conjugados. A imagem de A é A'; a imagem de A' é o ponto A.

Para fazer uma abordagem analítica das relações entre os elementos dos espelhos esféricos, devemos transformar as posições em coordenadas de determinado referencial. A **figura 8.54** ilustra o sistema de referência elaborado por Carl Friedrich Gauss.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 8.54 Objeto e imagem em um espelho esférico côncavo.

Temos:

- p (abscissas do objeto);
- y (ordenada do ponto objeto);
- p' (abscissas da imagem);
- y' (ordenada do ponto imagem);
- f (abscissas focais).

Nesse referencial temos:

- a origem é o vértice do espelho; as abscissas da região onde a luz é incidente são positivas; na região oposta são negativas;
- as coordenadas localizadas acima do vértice são positivas; no caso contrário, são negativas (no exemplo da **figura 8.54**, temos $y > 0$ e $y' < 0$).

Como decorrência dessa convenção, consideraremos a **tabela 8.2** para abscissas.

Já para as ordenadas, vamos observar:

- se y e y' têm o mesmo sinal, a imagem é direita;
- se y e y' têm sinais diferentes, a imagem é invertida.

Tabela 8.2 Natureza dos objetos em relação às abscissas

	Natureza real	Natureza virtual
abscissa	positiva	negativa
abscissa focal	$f > 0$ (côncavo)	$f < 0$ (convexo)
objeto	$p > 0$	$p < 0$
imagem	$p' > 0$	$p' < 0$

Equação dos pontos conjugados

A equação dos pontos conjugados relaciona as posições do objeto, da imagem e do foco no sistema de referência elaborado por Gauss.

Com base na **figura 8.54**, podemos demonstrar que a relação entre p, p' e f é dada por:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$ (equação dos pontos conjugados)

E o aumento linear transversal (A) é dado por:

$$A = \frac{y}{y'} = \frac{-p'}{p}$$

Para esta última relação, valem as seguintes observações:

- Se $|A| > 1$, o tamanho da imagem é maior que o do objeto;
- Se $|A| < 1$, o tamanho da imagem é menor que o do objeto;
- Se $|A| = 1$, o tamanho da imagem é igual ao do objeto.
- Se $A > 0$, a imagem e o objeto têm a mesma orientação (imagem direita);
- Se $A < 0$, a imagem e o objeto têm orientações diferentes (imagem invertida).

Exercício resolvido

2. Com um espelho esférico, uma pessoa consegue projetar sobre uma tela uma imagem que tem o dobro do tamanho do objeto. Sabendo-se que a distância focal do espelho é 20 cm:

a) Qual é o tipo de espelho (côncavo ou convexo) utilizado pela pessoa?

b) Determine as abscissas do objeto e da imagem conjugada, no referencial de Gauss.

c) Faça um esquema mostrando a construção da imagem.

Resolução:

a) Como a imagem é projetada numa tela, ela é real. Portanto, o espelho utilizado pela pessoa é côncavo, pois o convexo somente conjuga imagens virtuais para objetos reais.

b) Sendo a imagem real, ela é invertida em relação ao objeto. Como ela possui o dobro do tamanho do objeto, o aumento linear transversal é igual a $A = -2$. Assim, temos:

$$A = \frac{y}{y'} = \frac{-p'}{p} \Rightarrow -2 = \frac{-p'}{p} \Rightarrow p' = 2p$$

Substituindo na equação dos pontos conjugados, obtemos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{20} = \frac{1}{p} + \frac{1}{2p} \Rightarrow \frac{1}{20} = \frac{2+1}{2p} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2p = 60 \Rightarrow p = 30 \text{ cm}.$$

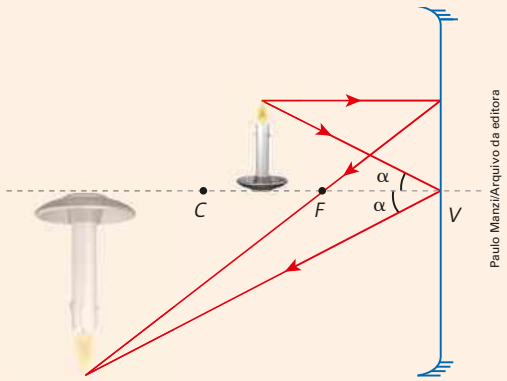
A abscissa do objeto é 30 cm.

Como $p' = 2 \cdot p$, temos:

$p' = 2 \times 30 \Rightarrow p' = 60$ cm.

A abscissa da imagem é 60 cm.

c) Na figura seguinte, temos a construção da imagem.



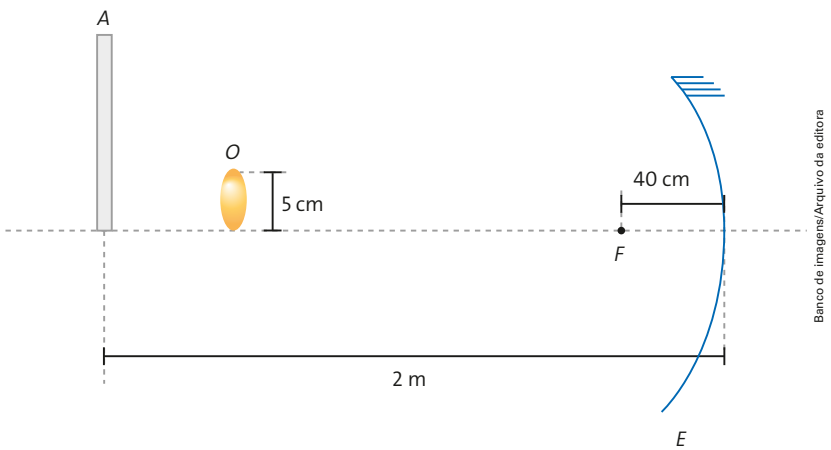
Paulo Manzi/Arquivo da editora

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

Exercícios

24. Em uma loja, foi instalado um espelho esférico, com raio de curvatura igual a 4,0 m, que permite ao proprietário observar imagens direitas e reduzidas de praticamente toda a loja. Determine as características da imagem (posição e tamanho) conjugada pelo espelho de uma pessoa de 1,70 m de altura que se encontra a 2,0 m dele. A imagem virtual e direita estará a 1,0 m e terá 0,85 m de altura.

25. Na figura seguinte (sem escala e em cores fantasia), temos a representação de um espelho côncavo de distância focal igual a 40 cm, de um objeto *O* de 5,0 cm de altura e de um anteparo *A*. Esse anteparo está a 2,0 m do vértice do espelho, onde a imagem do objeto é projetada com nitidez.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Qual é a abscissa do objeto? 50 cm

b) Qual é o tamanho da imagem conjugada pelo espelho no anteparo? 20 cm

Em construção

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

Carl Friedrich Gauss



Retrato de Carl Friedrich Gauss (1777-1855).

Carl Friedrich Gauss, astrônomo, físico e matemático alemão, nasceu em 1777 e faleceu em 1855. Filho único de pais pobres, Gauss, já na infância, impressionava por sua habilidade em Matemática. Graças aos seus professores e à dedicada mãe, ele foi encaminhado para o duque de Brunswick, que garantiu financeiramente sua educação e formação universitária.

Entre 1795 e 1798, Gauss estudou Matemática na Universidade de Göttingen e, em 1799, obteve seu doutorado com uma tese sobre Álgebra. Aos 18 anos, desenvolveu o método dos mínimos quadrados, de grande aplicação atual em pesquisas geodésicas. Deve-se a ele a conhecida lei de Gauss da distribuição normal, fundamental para aqueles que trabalham com estatística.

Aos 24 anos, Gauss publicou *Disquisitiones Arithmeticae*, considerado uma das mais brilhantes publicações no campo da Matemática. Seu trabalho em teoria dos números deu uma importante contribuição para a Álgebra, principalmente em relação à solução das equações algébricas.

Embora Gauss tenha contribuído significativamente para a Astronomia, o Eletromagnetismo e a Óptica, é considerado um dos maiores matemáticos do seu tempo. Nesse campo, Gauss ocupa uma posição de destaque comparável às de Arquimedes e de Newton. Para Gauss, "a Matemática é a rainha das ciências, e a Aritmética, a rainha da Matemática".

Em 1801, no primeiro dia do ano, a descoberta de um asteroide, que posteriormente foi denominado Ceres, levou Gauss a se dedicar à Astronomia. Aplicando o método dos mínimos quadrados, ele determinou a órbita do asteroide. Esse método, que consta de sua *Teoria do movimento dos corpos celestes*, publicada em 1809, tem sido usado, com poucas modificações, na computação moderna.

Em 1807, Gauss tornou-se professor de Astronomia e diretor do novo observatório da Universidade de Göttingen, onde permaneceu até o fim de seus dias. Por volta de 1820, passou a dedicar-se à geodésia: a determinação matemática do formato e do tamanho da superfície da Terra. Para isso, Gauss inventou o heliótropo, um instrumento no qual a luz solar pode ser utilizada para aumentar a acurácia das medidas.

Por volta de 1830, Gauss aplicou seus conhecimentos matemáticos na resolução de problemas físicos, particularmente em relação aos fluidos. Esse trabalho contribuiu para o desenvolvimento do princípio da conservação de energia. Os trabalhos com o físico alemão Wilhelm Weber (1804-1891), na área do Magnetismo, conduziram à invenção do telégrafo elétrico, que eles usavam, principalmente, para se comunicar.

Em seu livro *Óptica geométrica*, de 1841, Gauss desenvolveu o conceito de distância focal e fórmulas para o cálculo da posição e do tamanho de imagens conjugadas por lentes. Nessa área, estabeleceu as condições que um espelho esférico deve obedecer para se obterem imagens nítidas, denominadas condições de nitidez de Gauss, bem como o sistema de referência para o estudo analítico tanto dos espelhos esféricos como das lentes.

Gauss era profundamente religioso, de aspecto aristocrático e conservador. Teve seis filhos, três no primeiro casamento (sua primeira esposa faleceu em 1809) e três no segundo, que durou de 1810 a 1831. Recusou diversos convites para trabalhos em outras universidades, permanecendo na Universidade de Göttingen até o fim de sua vida. Após sua morte, foram cunhadas moedas em sua homenagem. Gauss foi considerado o príncipe dos matemáticos, um brilhante aritmético com uma fantástica memória para números.

Fontes de dados: ENCYCLOPAEDIA Britannica; BASSALO; J. M. F. *Nascimentos da Física*: 3500 a.C.-1900 a.D. Belém: EDUFPA, 1997.

Trabalho em equipe

Façam uma pesquisa sobre as **condições de nitidez de Gauss** em relação aos espelhos esféricos. Verifiquem se essas condições também são válidas para as lentes esféricas, assunto abordado no próximo capítulo.

Experimento

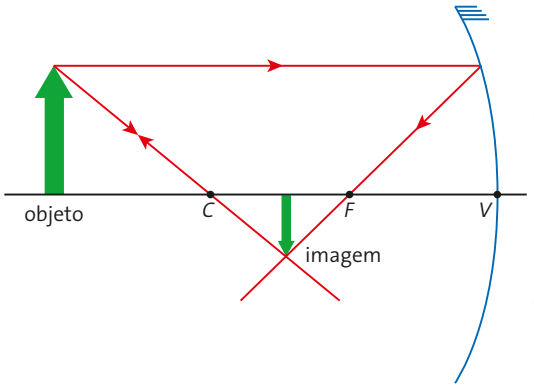
Veja comentários e sugestões sobre este experimento e respostas das atividades no Manual do Professor.

Espelho côncavo

Nesta atividade prática você poderá determinar a distância focal de um espelho côncavo. Para isso, são necessários os seguintes dispositivos:

- uma lâmpada, de 15 W ou 20 W/120 V, colocada em um suporte;
- um espelho côncavo colocado em um suporte;
- uma tela que sirva de anteparo.

O objetivo é obter no anteparo a melhor imagem do filamento da lâmpada (objeto), conjugada pelo espelho côncavo, conforme mostra a figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Com uma régua, ou uma trena, meça a distância da lâmpada ao espelho e do espelho à tela.

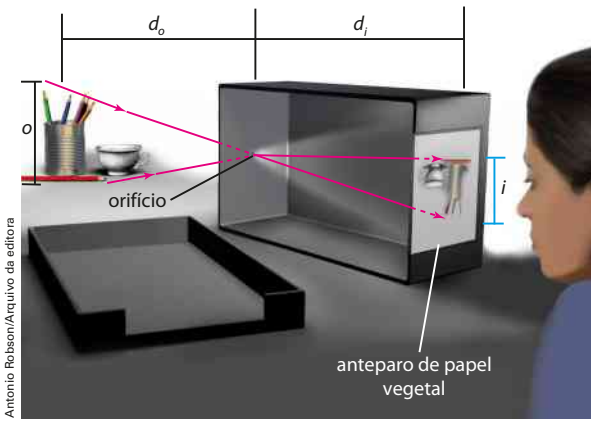
1. Quais as características da imagem obtida no anteparo?
2. O que acontece com a imagem do filamento da lâmpada à medida que esta se aproxima ou se afasta do espelho?
3. Qual é a distância focal do espelho côncavo usado no experimento?

Trabalho em equipe

Câmara escura

Nesta atividade, sob a orientação do professor, a equipe vai construir uma câmara escura de orifício, a qual ilustra o princípio básico de funcionamento de uma máquina fotográfica.

Trata-se de uma caixa de material opaco, com um orifício em uma das faces para penetração da luz. Colocando-se um objeto luminoso, ou iluminado, diante da face com o orifício, obtém-se na face oposta, feita de papel vegetal, uma imagem invertida do objeto. Observe a figura.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Representação (sem escala e em cores fantasia) da formação de imagem em uma câmara escura.

1. Com base na semelhança de triângulos, demonstre a relação:

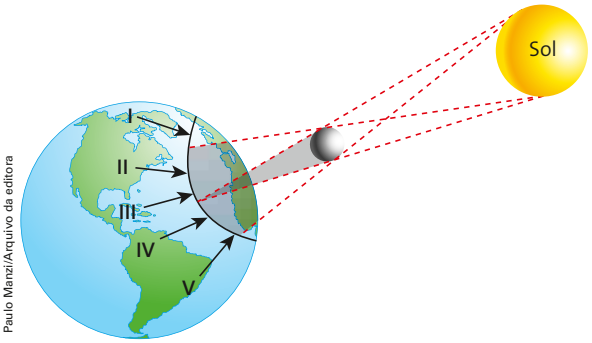
$$\frac{d_i}{d_o} = \frac{i}{o}$$

2. Que princípios da Óptica geométrica podem ser constatados com a câmara escura? Justifique.

Retomando

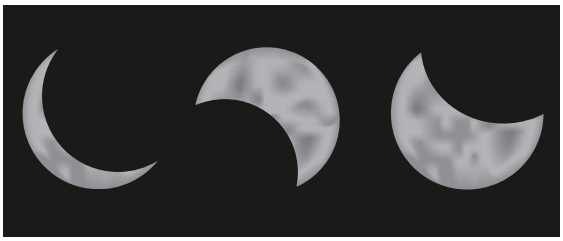
Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resoluções dos exercícios deste capítulo.

26. (Enem) A figura abaixo mostra um eclipse solar no instante em que é fotografado em cinco diferentes pontos do planeta.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Três dessas fotografias estão reproduzidas abaixo.


Paulo Manzi/Arquivo da editora

As fotografias poderiam corresponder, respectivamente, aos pontos:

X a) III, V e II.
b) II, III e V.
c) II, IV e III.
d) I, II e III.
e) I, II e V.

27. (UEA-AM) Um professor propôs a seus alunos que determinassem a altura da chaminé do Centro de Artes Chaminé, em Manaus.


Rubens Chaves/Pulsar Imagens

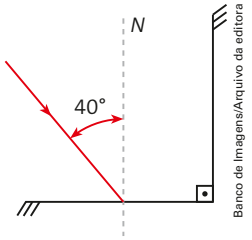
Lembrando de suas aulas de óptica, alguns alunos colocaram, em um dia ensolarado, uma haste vertical de 1,2 m de comprimento ao lado da chaminé e, após medirem os comprimentos das sombras dessa haste e da chaminé, chegaram à conclusão de que a altura da chaminé era de 24 m.

28. b) Como o raio incidente e o emergente são ambos inclinados de 40° em relação à vertical, eles são paralelos (ângulos correspondentes).

Supondo que a haste tenha projetado uma sombra de 40 cm, o comprimento, em metros, da sombra projetada pela chaminé foi de:

a) 2,0.
b) 4,0.
c) 5,0.
d) 6,0.
X e) 8,0.

28. A figura abaixo representa duas superfícies refletoras perpendiculares e um raio incidente em uma delas.



Banco de Imagens/Arquivo da editora

a) Copie em seu caderno a figura acima e construa a trajetória da luz até emergir do segundo espelho (indique todos os ângulos entre os raios de luz e as superfícies e entre os raios de luz e as retas normais). Veja resposta no Manual do Professor.
b) Mostre que o raio emergente, ao final do processo, é paralelo ao incidente.

29. (Unicastelo-SP) Na fotografia, podem-se ver as imagens de um mesmo carro, circulado em laranja, formadas por dois espelhos, 1 e 2.



Reprodução/Vestibular Unicastelo SP 2014

(http://blog.brasilacademico.com. Adaptado.)

Comparando as características dessas imagens e sabendo que o espelho 1 é esférico e o espelho 2 é plano, é correto afirmar que o espelho 1 é:

X a) convexo e a imagem conjugada por ele é virtual.
b) côncavo e a imagem conjugada por ele é real.
c) côncavo e a imagem conjugada por ele é virtual.
d) convexo e a imagem conjugada por ele é imprópria.
e) convexo e a imagem conjugada por ele é real.

CAPÍTULO 9

Refração luminosa

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

Delfim Martins/Pulsar Imagens



Exame oftalmológico.

Sentaram uma cigana num extremo da aldeia e instalaram o óculo de alcance na entrada da tenda. Mediante o pagamento de cinco reais, o povo se aproximava do óculo e via a cigana ao alcance da mão. "A ciência eliminou as distâncias", apregoava Melquíades.

Gabriel García Márquez (1927-2014)

Como funciona um óculo de alcance?
Como o oftalmologista identifica a necessidade de uma pessoa usar óculos?

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Refração luminosa

Você já reparou que uma piscina cheia de água sempre nos parece mais rasa do que ela realmente é? E que um objeto longo parcialmente mergulhado na água nos parece quebrado (figura 9.1)?

Fenômenos como esses podem ocorrer quando a luz passa de um meio para outro. Trata-se da **refração luminosa**.

Em nosso cotidiano, muitos fenômenos são explicados pela refração da luz. Além disso, ela está presente em diversos instrumentos ópticos, tanto de observação, como de projeção. No entanto, sua principal aplicação certamente está relacionada à nossa visão, pois é por meio da refração ocular que as imagens se formam na retina.

A principal característica da refração luminosa é a mudança de velocidade da luz em razão da mudança do meio de propagação. A velocidade de propagação da luz no vácuo é 300 000 km/s. No ar, esse valor é um pouco menor, mas normalmente utilizamos os mesmos 300 000 km/s. Na água, porém, esse valor cai para aproximadamente 225 000 km/s, ao passo que no interior de um bloco de vidro, a velocidade da luz fica reduzida a aproximadamente 200 000 km/s.

A figura 9.2 mostra o comportamento da velocidade de um raio de luz ao passar do ar para um bloco de vidro e, em seguida, retornar ao ar. Observe que, após sofrer a redução de velocidade no bloco de vidro, a luz volta a se propagar com a mesma velocidade que possuía antes de penetrar no vidro. Esse é um comportamento atípico, que normalmente não observamos no cotidiano: um projétil, ao atravessar um bloco de madeira, por exemplo, não apresenta a mesma velocidade que possuía antes de atravessá-lo.

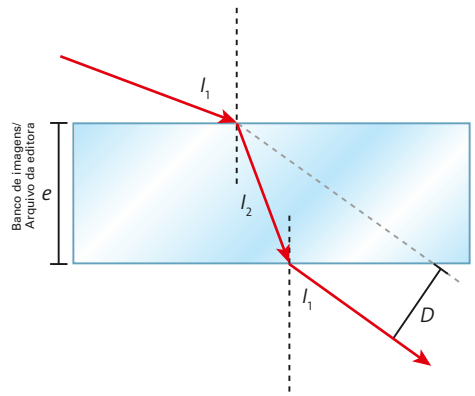


Figura 9.2 Representação do comportamento da velocidade de um raio de luz ao passar do ar para o vidro e ao voltar para o ar. Ao incidir na superfície de separação ar-vidro, o raio de luz sofre uma primeira refração. Quando ele incide na segunda superfície de separação vidro-ar, há uma segunda refração.

Para relacionar as velocidades da luz no vácuo e em determinado meio de propagação, utilizamos uma grandeza adimensional (sem unidades) denominada **índice de refração absoluto** (***n***), característica do meio de propagação.

O índice de refração absoluto (n) de um meio é a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz no meio (v). Em símbolos, temos:

$$n = \frac{c}{v}$$

Como a velocidade da luz no vácuo (c) é sempre maior ou igual à velocidade da luz em um meio qualquer (v), o índice de refração de um meio é um número sempre maior ou igual a 1.


Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Figura 9.1 O fato de o lápis mergulhado na água parecer quebrado deve-se ao fenômeno da refração luminosa.

Refração – O termo tem origem no verbo latino *refringere*, que significa 'quebrar' uniformemente pela barra.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir
Lembrando da equação fundamental da onda, explique por que as cores possuem índices de refração diferentes para um mesmo meio.

A **tabela 9.1** apresenta o índice de refração para diferentes substâncias.

Tabela 9.1 Índices de refração de algumas substâncias

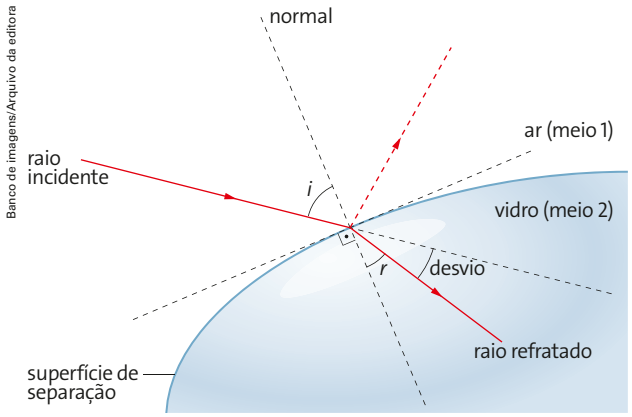
Substância		Índice de refração (*n*)*
Sólidos	Gelo (H_2O)	1,309
	Fluorita (CaF_2)	1,434
	Poliestireno	1,49
	Sal ($NaC\ell$)	1,544
	Quartzo (SiO_2)	1,544
	Zircônia ($ZrO_2 \cdot SiO_2$)	1,923
	Diamante (C)	2,417
	Fabulita ($SrTiO_3$)	2,409
	Rutila (TiO_2)	2,69
Vidros (valores típicos)	*Crown*	1,52
	Flint médio	1,62
Líquidos (a 20 °C)	Metanol (CH_3OH)	1,329
	Água (H_2O)	1,333
	Etanol (C_2H_5OH)	1,36
	Tetracloreto de carbono ($CC\ell_4$)	1,460
	Terebintina	1,742
	Glicerina	1,473
	Benzeno	1,501
	Dissulfeto de carbono (CS_2)	1,628

* Índices de refração referentes à luz amarela de sódio ($\lambda = 589$ nm).

Fonte: YOUNG & FREEDMAN. *University Physics*. Nova York: Pearson/Addison Wesley, 2009, p. 534.

Quando um meio apresenta índice de refração absoluto maior que outro, dizemos que ele é mais **refringente**. Assim, com base na **tabela 9.1**, dizemos que o diamante é mais refringente que a água. Maior refringência implica menor velocidade da luz. Portanto, a luz se propaga com maior velocidade na água que no diamante.

A exemplo da reflexão, a refração luminosa é regida por duas leis. Na **figura 9.3**, temos a ilustração de um raio de luz monocromática propagando-se inicialmente no meio 1, incidindo na superfície de separação entre os meios 1 e 2, sofrendo reflexão e refração, e passando a se propagar no meio 2.



Banco de imagens/Arquivo da editora

As leis da refração luminosa são as seguintes:

1ª) O raio incidente, o raio refratado e a normal à superfície de separação, no ponto de incidência, são coplanares.

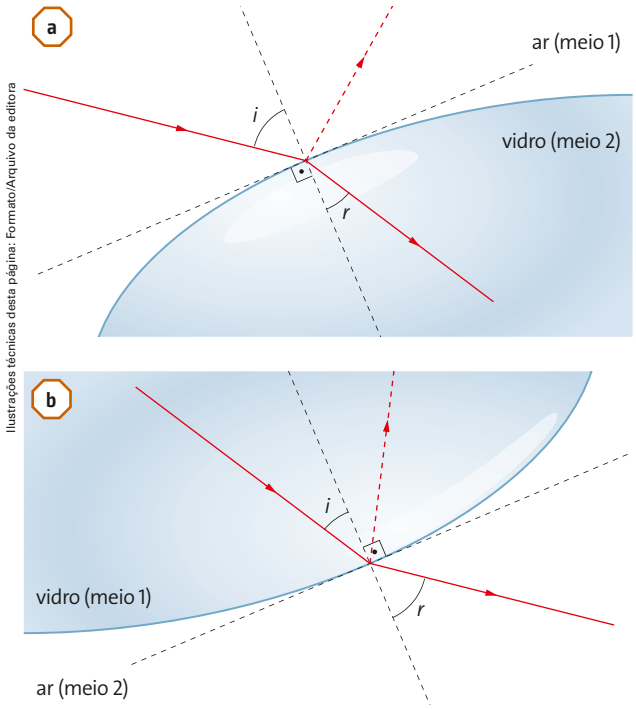
2ª) Para cada par de meios (1 e 2) e cada cor de luz vale a lei de Snell-Descartes:

$$n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } r$$

Figura 9.3 Representação da refração de um raio luminoso. A reflexão, que ocorre com a refração, está representada pelo raio pontilhado.

Nessa expressão, n_1 e n_2 são os índices de refração absolutos dos meios 1 e 2, respectivamente, i é a medida do ângulo de incidência e r é a medida do ângulo de refração.

De acordo com a lei de Snell-Descartes, o meio de menor índice de refração absoluto corresponde ao maior ângulo e vice-versa. Assim, quando a luz passa para um meio mais refringente, temos um ângulo de refração menor que o de incidência. Reciprocamente, ao passar para um meio menos refringente, o raio refratado apresenta um ângulo de refração maior que o ângulo de incidência (**figuras 9.4.a** e **9.4.b**)



Ilustrações técnicas desta página: Formato/Arquivo da editora

Figura 9.4 Representação do comportamento de um raio luminoso. O meio 2 é mais refringente que o 1: (**a**) o ângulo de refração (r) é menor que o ângulo de incidência (i). O meio 1 é mais refringente que o 2: (**b**) o ângulo de refração (r) é maior que o de incidência (i).

De modo geral, quando a luz muda de meio de propagação, podemos ter três situações distintas como mostram os itens a seguir.

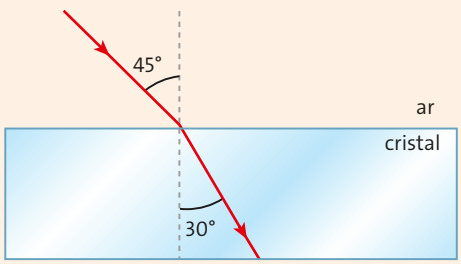
Exercício resolvido

1. Um raio monocromático atravessa a superfície de separação entre o ar e um determinado cristal sob o ângulo de incidência de 45° e o ângulo de refração de 30°.

Considerando o índice de refração do ar igual a 1, determine:

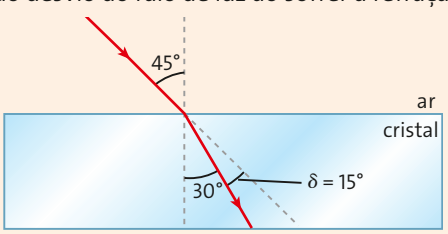
a) o desvio que o raio sofre com a refração;

b) o índice de refração absoluto desse cristal para essa radiação.



Resolução:

a) A figura a seguir ilustra o ângulo δ correspondente ao desvio do raio de luz ao sofrer a refração.



Vemos pela figura que: $\delta + 30° = 45° \Rightarrow \delta = 15°$

b) De acordo com a lei de Snell-Descartes:

$n_{ar} \cdot \text{sen } i = n_{cristal} \cdot \text{sen } r \Rightarrow$

$\Rightarrow 1 \cdot \text{sen } 45° = n_{cristal} \cdot \text{sen } 30° \Rightarrow$

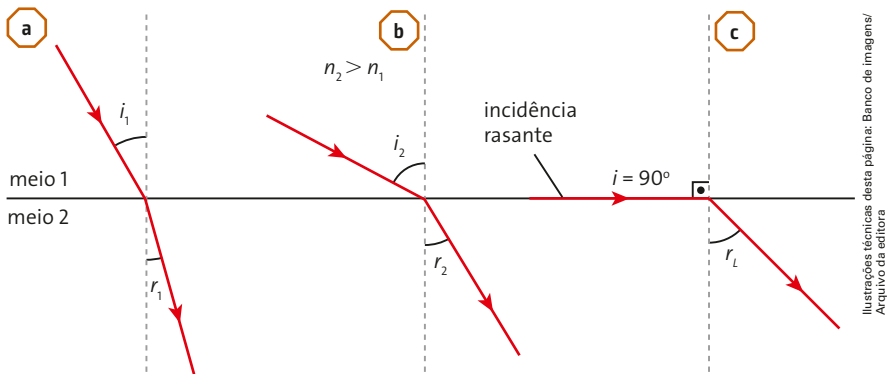
$\Rightarrow \frac{\sqrt{2}}{2} = n_{cristal} \cdot \frac{1}{2} \Rightarrow$

$\Rightarrow n_{cristal} = \sqrt{2} = 1{,}4$

A luz passa para um meio mais refringente que o de origem

Observe que, à medida que aumentamos o ângulo de incidência *i*, aumenta o ângulo de refração *r*, conforme mostram as **figuras 9.5.a** e **9.5.b**. Mas, de acordo com a lei de Snell-Descartes, a medida do ângulo de refração *r* é sempre menor que a do ângulo de incidência *i*, pois $n_2 > n_1$. Quando o ângulo de incidência é o maior possível (incidência rasante, mostrada na **figura 9.5.c**), obtemos o maior ângulo de refração, chamado de **ângulo limite de refração** (r_L), dado por:

$$n_1 \cdot \text{sen } 90° = n_2 \cdot \text{sen } r_L \Rightarrow n_1 \cdot 1 = n_2 \cdot \text{sen } r_L \Rightarrow \text{sen } r_L = \frac{n_1}{n_2}$$



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/ Arquivo da editora

Figura 9.5 Representação dos comportamentos de raios de luz ao passar para um meio mais refringente.

A luz passa para um meio menos refringente que o de origem

À medida que aumentamos o ângulo de incidência *i*, aumenta o ângulo de refração *r*, conforme mostram as **figuras 9.6.a** e **9.6.b**. Mas a medida do ângulo de refração *r* é sempre maior que a do ângulo de incidência *i*, pois $n_2 < n_1$. Quando o ângulo de incidência atinge certo valor-limite, chamado de **ângulo limite de incidência** (i_L), obtemos um ângulo de refração rasante, $r = 90°$ (**figura 9.6.c**). A partir dessa situação, não há mais refração, mas sim a reflexão total da luz incidente, como mostrado na **figura 9.6.d**.

O ângulo limite de incidência (i_L) é dado por:

$$n_1 \cdot \text{sen } i_L = n_2 \cdot \text{sen } 90° \Rightarrow n_1 \cdot \text{sen } i_L = n_2 \cdot 1 \Rightarrow \text{sen } i_L = \frac{n_2}{n_1}$$

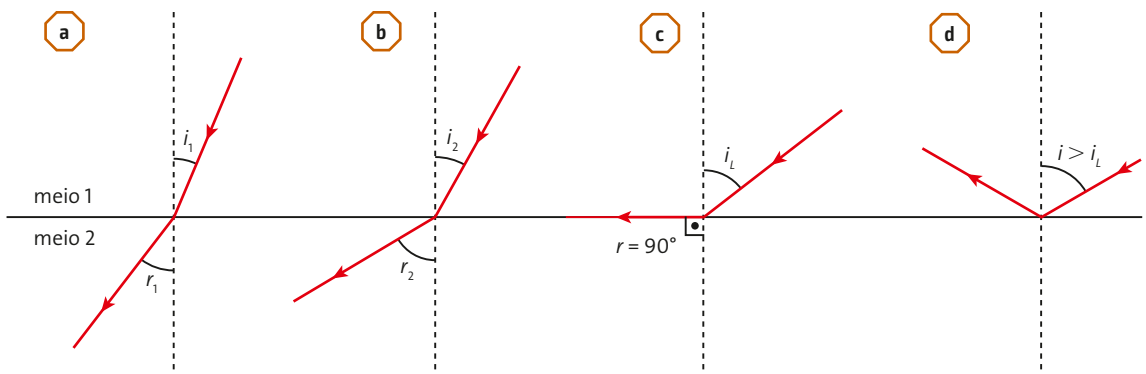


Figura 9.6 Representação dos comportamentos de raios de luz ao passar para um meio menos refringente.

Veja resposta no Manual do Professor.

A luz passa para um meio de mesmo índice de refração que o de origem

Existem substâncias diferentes que possuem o mesmo índice de refração. É o caso, por exemplo, do vidro e do tetracloroetileno. Então, ao passar do vidro para o tetracloroetileno, a luz comporta-se conforme mostrado na **figura 9.7**. Em termos ópticos, é como se não houvesse mudança no meio de propagação; por isso não ocorre reflexão ou refração da luz na fronteira entre os dois meios. Dizemos que esses dois meios apresentam continuidade óptica, como no exemplo mostrado na **figura 9.8**.

Para refletir

Para se tornar invisível, uma pessoa precisaria eliminar totalmente a reflexão e a refração da luz que incide sobre ela. Nessas condições, o que se pode dizer das propriedades ópticas do ser humano em relação ao ar?

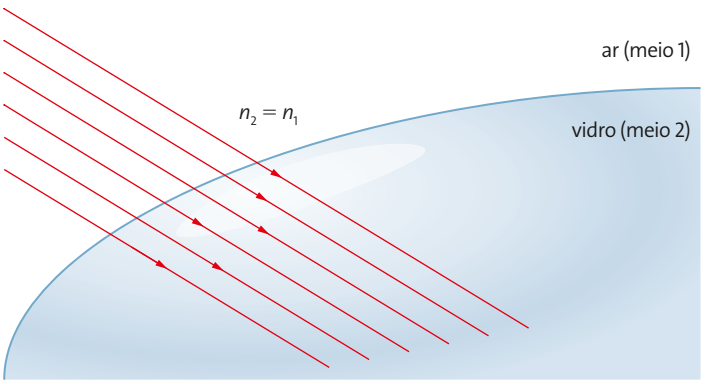


Figura 9.7 Representação do comportamento de raios de luz quando passam de um meio a outro de mesmo índice de refração.



Sergio Dotta Jr/Acervo do fotógrafo

Figura 9.8 Quando um bastão de vidro é mergulhado em um líquido de índice de refração idêntico ao seu (tetracloroetileno), ele fica invisível.

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

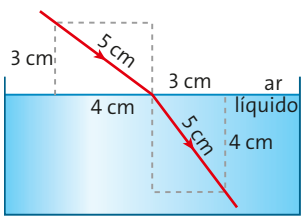
Exercícios

1. A velocidade de determinada radiação luminosa é 200 000 km/s em um meio *A*, 250 000 km/s em outro meio, *B*, e 300 000 km/s em um meio *C*. Qual dos três meios: a) Mais refringente: *A*; menos refringente: *C*.

a) é o mais refringente? E o menos refringente?

b) possui o maior índice de refração absoluto? E o menor índice de refração? $n_A > n_B > n_C$

2. Em uma experiência sobre refração, um raio de luz propagando-se, inicialmente, no ar ($n = 1$) incidiu sobre a superfície de separação do ar com um líquido e passou a se propagar no líquido. No experimento, foi possível obter as medidas indicadas na figura.

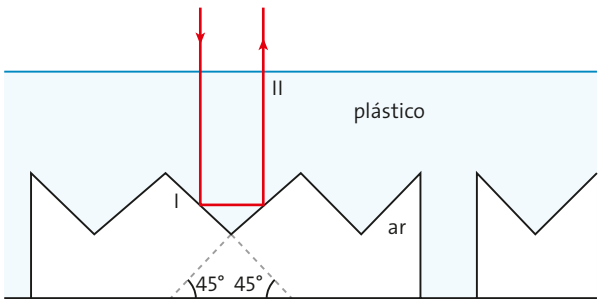


a) Com base na figura, quais os valores dos senos dos ângulos de incidência e refração? 0,8 e 0,6.

b) Qual o índice de refração absoluto do líquido utilizado na experiência? $n = 1{,}33$

3. Em algumas rodovias, é possível encontrar um dispositivo de segurança denominado "olho de gato" que ajuda os motoristas a dirigir durante a noite. A função desse dispositivo é fazer com que a luz do farol do carro retorne ao motorista, orientando sobre os limites da estrada.

A figura ilustra o comportamento de um raio de luz ao atingir um "olho de gato".



a) Descreva os fenômenos ópticos que ocorrem com o raio de luz nos pontos I e II. Reflexão total e refração.

b) O índice de refração do plástico deve ser maior, menor ou igual ao índice de refração do ar? Maior.

Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

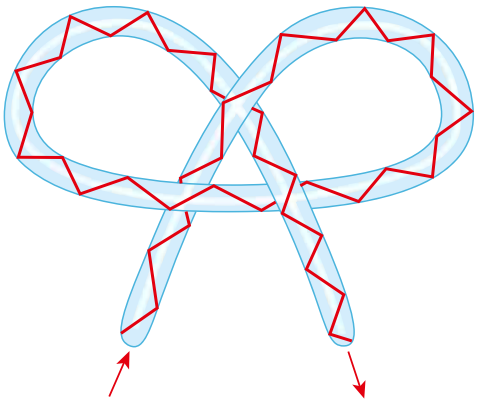
Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

Fibras ópticas

Uma importante aplicação da reflexão total acontece nas **fibras ópticas**, que constituem um recurso interessante e muito utilizado na prática. Comparada aos bons espelhos, que refletem cerca de 80% da luz incidente, a eficiência da reflexão nas fibras ópticas chega perto de 100%. Como possuem um diâmetro muito pequeno e apresentam boa flexibilidade, as fibras ópticas podem até ser entrelaçadas em forma de nó, embora sejam de vidro. A luz é conduzida dentro de um núcleo cilíndrico com alto grau de pureza e com um índice de refração maior que o índice do meio que envolve a fibra, uma fina casca de outro tipo de vidro.

A **figura a** destaca um raio de luz que sofre sucessivas reflexões totais dentro da fibra óptica, até emergir na outra extremidade.

Dentro do material ocorre a difusão, que nos dá a estranha sensação de que a fibra inteira está "acesa". (**figura b**).



Banco de imagens/Arquivo da editora

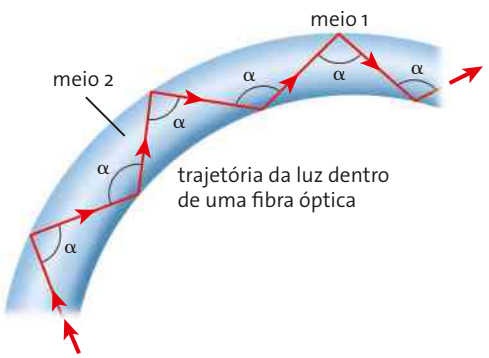
Figura a Representação (sem escala e em cores fantasia) das várias reflexões totais de uma fibra óptica.



Acervo do autor/Arquivo da editora

Figura b Propagação da luz no interior de uma matéria transparente com sucessivas reflexões.

- A figura ao lado representa um pedaço de uma fibra óptica e um raio de luz que sofre reflexões totais dentro da fibra, desde que o ângulo α seja maior ou igual a 45°. O uso da fibra óptica vai desde as telecomunicações até exames médicos minuciosos, principalmente do coração e do estômago (endoscopia), sem necessidade de cirurgia.
  a) Qual dos dois meios da fibra óptica possui maior índice de refração: o meio 1 ou o 2?
  b) O que acontece com o raio de luz se o ângulo α for menor que 45°?



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

2 Dioptros planos

Vamos utilizar a lei de Snell-Descartes para demonstrar a relação entre a profundidade real (d_O) e a profundidade aparente (d_I) de um objeto imerso na água. Para isso, vamos considerar um objeto colocado no fundo de uma piscina que será visto por uma pessoa posicionada fora da piscina, conforme mostra a **figura 9.9**.

A esse par de meios (ar-água) separado por uma superfície plana damos o nome de **dioptro plano**. Genericamente, quaisquer dois meios homogêneos e transparentes, separados por uma superfície plana, constituem um dioptro plano.

Em razão da refração luminosa sofrida pelos raios de luz emitidos pelo objeto *O* que atingem a superfície de separação da água com o ar, o objeto é visto por uma pessoa que está fora da piscina, no ponto *I*, a uma profundidade aparente d_I menor que a profundidade real d_O. Portanto, quando olhamos para objetos dentro de uma piscina, eles aparentam estar a uma profundidade menor. O que vemos é uma **imagem virtual** do objeto.

A relação entre a profundidade aparente (d_I) e a profundidade real (d_O) é obtida por meio da lei de Snell-Descartes. Para ângulos de incidência (i) e de refração (r) de no máximo 15°, os senos são aproximadamente iguais às tangentes. Assim, de acordo com a **figura 9.9**, podemos escrever:

$$\operatorname{sen} i = \tan i = \frac{x}{d_O} \text{ e } \operatorname{sen} r = \tan r = \frac{x}{d_I}$$

Substituindo na expressão da lei de Snell-Descartes, obtemos:

$$n_{\text{água}} \cdot \frac{x}{d_O} = n_{\text{ar}} \cdot \frac{x}{d_I} \Rightarrow \frac{d_I}{d_O} = \frac{n_{ar}}{n_{água}}$$

Note que essa expressão para a determinação da profundidade aparente do objeto só pode ser utilizada quando se consideram pequenos ângulos de incidência, ou seja, o objeto deve ser observado sob incidência praticamente normal.

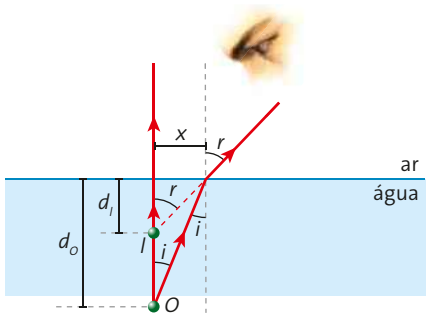
Vejamos, agora, a situação oposta. Como uma pessoa dentro da água enxerga um objeto fora dela? A **figura 9.10** ilustra essa situação.

O objeto *O*, situado a uma altura h_O em relação à superfície da água, em razão da refração, é visto pela pessoa colocada dentro da água na posição *I*, a uma altura h_I.

Por meio de um desenvolvimento semelhante ao anterior, podemos demonstrar que a relação entre a altura aparente (h_I) e a altura real (h_O) é dada por:

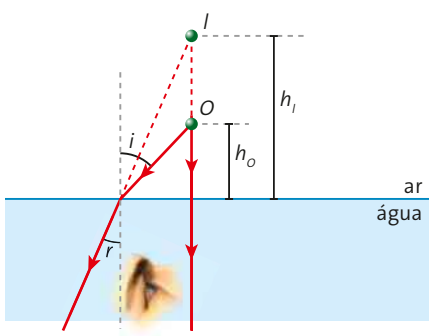
$$\frac{h_I}{h_O} = \frac{n_{\text{água}}}{n_{\text{ar}}}$$

Portanto, de dentro da água uma pessoa vê uma imagem virtual do objeto a uma altura maior que a real.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.9 Representação do comportamento dos raios de luz em um dioptro plano.



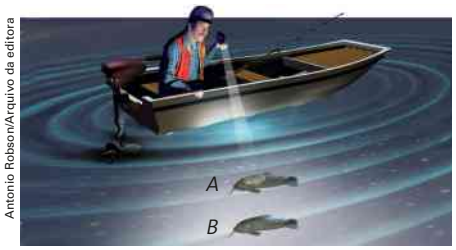
Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.10 Representação dos raios de luz incidindo em uma interface ar-água.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

4. Em virtude do fenômeno da refração luminosa, um objeto imerso na água aparenta estar a uma profundidade menor que a real. A figura mostra uma pessoa dentro de um barco que deseja atingir um peixe com um raio de luz. Na figura, estão representados o peixe na sua posição real (*B*) e sua imagem (*A*) vista pela pessoa. Considere que o peixe e a pessoa estejam parados.



Antonio Robson/Arquivo da editora

a) Para qual ponto, *A* ou *B*, a pessoa deve dirigir o raio de luz para atingir o peixe? Ponto *A*.

b) Responda à questão anterior supondo que a pessoa use uma lança para atingir o peixe. Ponto *B*.

5. As paredes de uma piscina são revestidas com azulejos quadrados de 10 cm de lado. Uma pessoa aproxima-se da piscina, cheia de água, e conta 20 azulejos desde a borda até o fundo. Considere $n_{ar} = 1$ e $n_{água} = \frac{4}{3}$.

Qual é a profundidade real da piscina? Qual é a profundidade aparente da piscina vista pela pessoa? $h = 2{,}0$ m e $h_{aparente} = 1{,}5$ m

6. Suponha uma pessoa dentro de uma piscina olhando para um objeto *O* situado fora dela a uma altura h_O em relação ao nível da água. Para essa pessoa, o objeto será visto a uma altura aparente h_I maior que a altura real h_O, conforme mostrado na **figura 9.10**. Considere $n_{ar} = 1$ e $n_{água} = \frac{4}{3}$.

Se a altura real do objeto, em relação ao nível da água, é 1,2 m, determine a altura aparente desse objeto visto pela pessoa. $h = 1{,}6$ m

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

3 Lâminas de faces paralelas e prismas

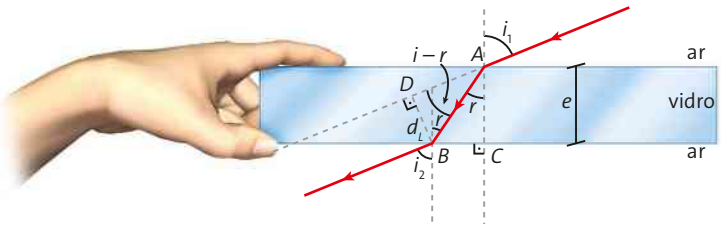


Figura 9.11 Representação da trajetória realizada por um raio de luz ao atravessar uma placa de vidro.

Uma lâmina de faces paralelas é constituída por um conjunto de três meios homogêneos e transparentes – ar, vidro e ar – separados por duas superfícies planas e paralelas. De modo geral, quaisquer três meios que tenham essas características recebem o nome de **lâmina de faces paralelas**. A janela de vidro comum é um bom exemplo desse tipo de lâmina.

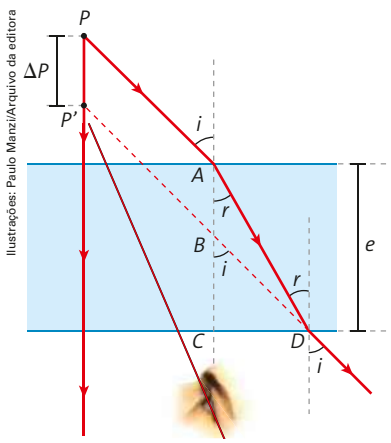
Na **figura 9.11**, temos o comportamento de um raio de luz que atravessa uma placa de vidro imersa no ar.

Observe que o raio de luz, proveniente do ar, ao atravessar a placa de vidro sofre duas refrações: a primeira no ponto *A* e a segunda no ponto *B*. A lei de Snell-Descartes aplicada a esses dois pontos nos fornece:

- Ponto A – $n_{ar} \cdot \text{sen } i_1 = n_{vidro} \cdot \text{sen } r$
- Ponto B – $n_{vidro} \cdot \text{sen } r = n_{ar} \cdot \text{sen } i_2$

Comparando essas duas expressões, concluímos que os ângulos i_1 e i_2 têm a mesma medida. Portanto, o raio luminoso que emerge da lâmina é paralelo ao raio que incide nela.

Quando um raio de luz, emitido pelo objeto luminoso *P*, atravessa uma lâmina de faces paralelas mais refringente que o meio que a envolve, tem-se a impressão de que o raio de luz que emerge da lâmina provém de um ponto *P'* mais próximo, deslocado em relação ao ponto objeto *P*, conforme mostra a **figura 9.12**.



Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.12 *P* é o ponto objeto e *P'* é o ponto imagem, visto pelo observador na posição indicada. ΔP é o deslocamento: distância do ponto objeto ao ponto imagem.

A imagem P' está deslocada ΔP em relação ao ponto objeto P, conforme mostra a **figura 9.12**. Esse deslocamento é sempre menor que a espessura da lâmina. Assim, se a espessura da lâmina for desprezível, esse deslocamento também será desprezível.

O para-brisa dos automóveis, os vidros transparentes de janelas, as películas de plástico que recobrem embalagens, ou mesmo os quadros recobertos por uma fina lâmina de vidro são exemplos de lâminas de faces paralelas. Seu uso se justifica exatamente pelo fato de a imagem produzida por essas lâminas ter o mesmo tamanho e praticamente a mesma posição do objeto, ao mesmo tempo que elas protegem contra a ação do vento, da chuva e da poeira (**figura 9.13**).


JoeFox/Alamy/Other Images

Figura 9.13 O para-brisa é um item muito importante para a proteção do motorista, apesar de produzir uma imagem levemente diferente daquela do objeto.

Prismas

Em Óptica, um bloco de vidro com formato de um prisma triangular, imerso no ar, é chamado simplesmente de **prisma**: conjunto de três meios homogêneos e transparentes (ar-vidro-ar), separados por duas superfícies planas e não paralelas.

Após atingir uma das faces de um prisma, a luz sofre duas refrações, conforme mostra a **figura 9.14**.

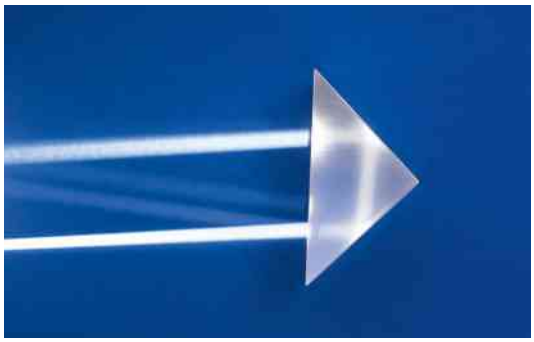

GIPhotoStock/Photo Researchers/Latinstock

Figura 9.14 Prisma em que a luz sofre suas reflexões totais.

Vamos analisar um prisma de vidro (meio 2) de ângulo de refringência A, imerso no ar (meio 1), como mostra a **figura 9.15**. Ao incidir no prisma com ângulo i_1, um raio de luz passa por duas refrações e emerge, segundo o ângulo i_2, com sua direção alterada: o raio de luz sofre um deslocamento angular δ.

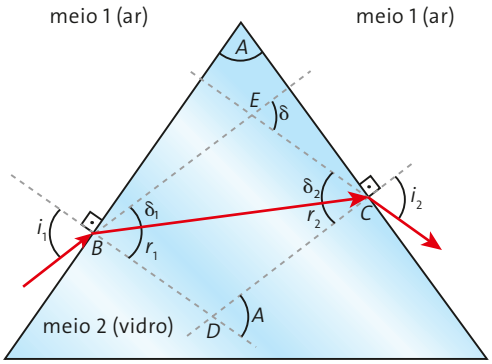


Figura 9.15 Representação da trajetória percorrida pelo raio de luz que incide em um prisma.

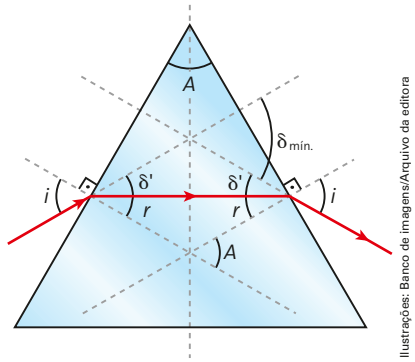
Com base no esquema da figura, podemos escrever as seguintes relações:

- $n_1 \cdot \text{sen } i_1 = n_2 \cdot \text{sen } r_1$ (lei de Snell-Descartes no ponto B);
- $n_2 \cdot \text{sen } r = n_1 \cdot \text{sen } i_2$ (lei de Snell-Descartes no ponto C);
- $A = r_1 + r_2$ (teorema do ângulo externo no triângulo BCD);
- $\delta = \delta_1 + \delta_2$ (teorema do ângulo externo no triângulo BCE);
- $\delta_1 = i_1 - r_1$ e $\delta_2 = i_2 - r_2$.

Combinando as quatro últimas equações, obtemos:

$$\delta = i_1 + i_2 - A$$

À medida que variamos o ângulo de incidência (i_1), o desvio angular (δ) também varia. Pode-se mostrar que, no caso de um prisma mais refringente que o meio externo, o desvio por refração é mínimo quando $i_1 = i_2$. Mas, se isso ocorre, temos também $r_1 = r_2$. Vamos, então, chamar esses ângulos simplesmente de i e r. A situação fica exatamente simétrica em relação ao plano bissetor do prisma, como se pode ver na **figura 9.16**.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 9.16 Representação da trajetória de um raio de luz quando incide em um prisma.

Em determinados prismas, o raio de luz pode sofrer refração na primeira face e reflexão na segunda. Nesse caso, o prisma recebe o nome de **prisma de reflexão total**.

Na figura 9.17, temos as representações dos raios luminosos nos dois prismas de reflexão total mais utilizados na prática. Ambos têm formato de um triângulo retângulo isósceles, porém estão em posições diferentes em relação à luz incidente.

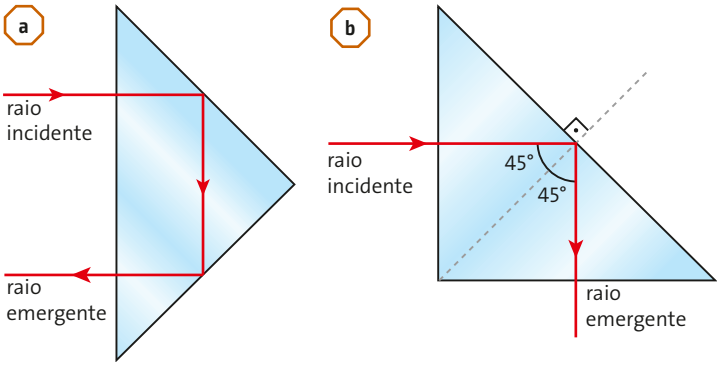
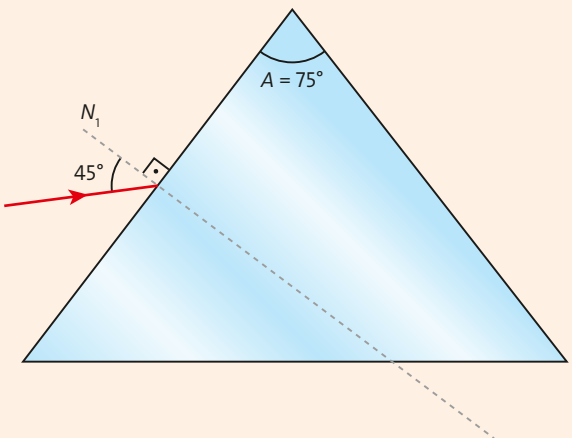


Figura 9.17 Representação de raios luminosos em prismas de reflexão total. Prisma de Porro (**a**). Prisma de Amici (**b**).

No prisma de Porro (figura 9.17.a), o raio emergente apresenta a mesma direção do raio incidente, mas sentido contrário. No prisma de Amici (figura 9.17.b), o raio emergente é perpendicular ao raio incidente, em razão da reflexão total. Os prismas de reflexão total possuem grande aplicação prática, principalmente em substituição aos espelhos planos nos instrumentos ópticos.

Exercício resolvido

2. Um raio luminoso monocromático, propagando-se no ar, incide sobre a face de um prisma de ângulo de refringência 75° com ângulo de 45°, conforme ilustra a figura. O material do prisma possui índice de refração $\sqrt{2}$ para a radiação incidente.



Determine:

a) o ângulo de refração da primeira face (r_1);

b) o desvio angular sofrido nessa primeira refração (δ_1);

c) o ângulo sob o qual o raio incide na segunda face do prisma (r_2);

d) o ângulo sob o qual o raio emerge na segunda face do prisma (i_2);

e) o desvio sofrido nessa segunda refração (δ_2);

f) o desvio total que o raio sofreu ao atravessar o prisma (δ).

Resolução:

a) Aplicando a lei de Snell-Descartes na primeira face, temos:

$n_1 \cdot \text{sen}\, i_1 = n_2 \cdot \text{sen}\, r_1 \Rightarrow 1 \cdot \text{sen}\, 45° = \sqrt{2} \cdot \text{sen}\, r_1 \Rightarrow$

$\Rightarrow \frac{\sqrt{2}}{2} = \sqrt{2} \cdot \text{sen}\, r_1 \Rightarrow \text{sen}\, r_1 = \frac{1}{2} \Rightarrow r_1 = 30°$

b) $\delta_1 = i_1 - r_1 \Rightarrow \delta_1 = 45° - 30° \Rightarrow \delta_1 = 15°$

c) Como $A = r_1 + r_2$, temos $75 = 30 + r_2 \Rightarrow r_2 = 45°$

d) Vamos aplicar a lei de Snell-Descartes para a segunda refração:

$n_2 \cdot \text{sen}\, r_2 = n_1 \cdot \text{sen}\, i_2 \Rightarrow \sqrt{2} \cdot \text{sen}\, 45° = 1 \cdot \text{sen}\, i_2 \Rightarrow$

$\Rightarrow \text{sen}\, i_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow \text{sen}\, i_2 = \frac{1}{2} \Rightarrow i_2 = 90°$

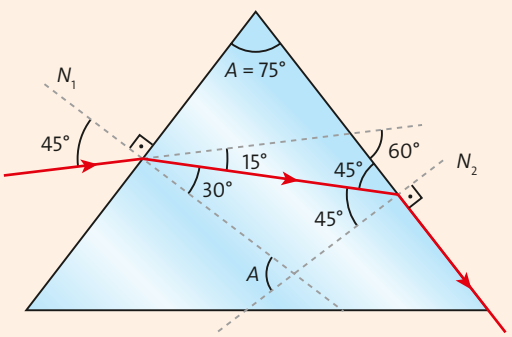
Portanto, o raio na segunda refração emerge rasante à face direita do prisma.

e) $\delta_2 = i_2 - r_2 \Rightarrow \delta_2 = 90° - 45° \Rightarrow \delta_2 = 45°$

f) O desvio total é dado por:

$\delta = \delta_1 + \delta_2 \Rightarrow \delta = 15° + 45° \Rightarrow \delta = 60°$

A trajetória do raio luminoso através do prisma é visualizada na figura.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Exercícios

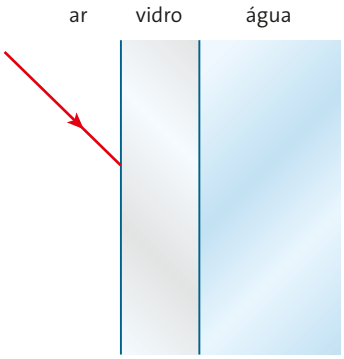
9. a) Veja resposta no Manual do Professor.

10. a) Refração na primeira face, reflexão total na segunda e refração na base.

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

7. Em relação à imagem de um objeto visto por um observador através de uma lâmina de faces paralelas, podemos dizer que ela:
a) é real ou virtual? Virtual.
b) está mais afastada ou mais próxima da lâmina? Mais próxima.

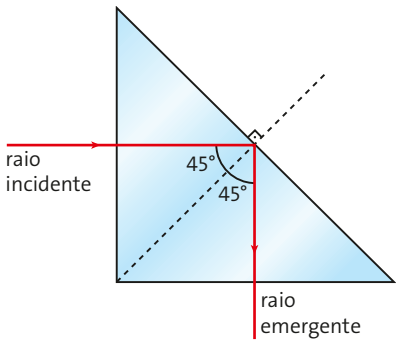
8. Um raio luminoso, propagando-se no ar, incide sobre uma parede lateral de um aquário (lâmina de vidro) que separa o ar da água, conforme mostra a figura abaixo (sem escala e em cores fantasia).



Os índices de refração são: 1,0 para o ar; 1,3 para a água e 1,5 para o vidro.
a) Copie a figura em seu caderno e represente a trajetória do raio de luz. Veja resposta no Manual do Professor.
b) Existe possibilidade de esse raio de luz sofrer reflexão total? Não.

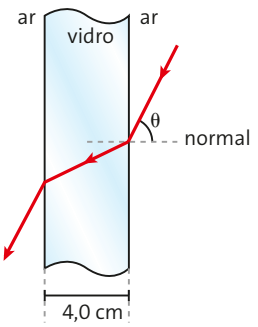
9. Um raio de luz incide com ângulo de 45° sobre uma das faces de um prisma imerso no ar e atravessa o prisma sofrendo desvio mínimo. Sabendo-se que o ângulo de refringência do prisma é 60°:
a) faça, no seu caderno, uma figura mostrando a trajetória do raio de luz através do prisma;
b) determine o índice de refração absoluto do material que constitui o prisma. $n = \sqrt{2}$

10. A figura representa o comportamento de um raio luminoso ao atravessar um prisma de Amici imerso no ar ($n = 1$).



a) Identifique as refrações e/ou reflexões sofridas pelo raio luminoso ao atravessar o prisma.
b) Sabendo-se que 45° é o ângulo limite de incidência, qual é o índice de refração do prisma? $n = \sqrt{2}$

11. Um raio luminoso proveniente do ar atravessa uma placa de vidro de 4,0 cm de espessura e índice de refração 1,5, conforme mostra a figura (fora de escala). Sabendo que o ângulo de incidência θ do raio luminoso é tal que sen θ = 0,90 e que o índice de refração do ar é 1,0, calcule a distância que a luz percorre ao atravessar o prisma. $d = 5{,}0$ cm



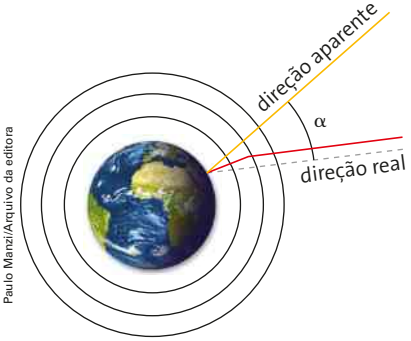
Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

4 Refração atmosférica e dispersão luminosa

Nos gases, particularmente no ar, o índice de refração diminui com a densidade. Como a densidade do ar atmosférico que envolve a Terra não é constante, à medida que a luz solar (ondas luminosas) atinge camadas mais densas (meios diferentes), sofre sucessivas refrações, delineando uma trajetória curva. Vejamos algumas consequências desse fato.

Suponha que, em uma noite estrelada, uma pessoa observa uma estrela ou um astro qualquer. Ela identifica a posição da estrela por meio da direção da luz recebida. Como a luz proveniente da estrela, ou de um astro qualquer, sofre sucessivas refrações enquanto penetra em nossa atmosfera, a pessoa vê a estrela em uma posição aparente, que não é a real, conforme ilustrado na **figura 9.18**.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.18 Representação (sem escala e em cores fantasia) das direções aparente e real de um raio de luz na atmosfera terrestre.

Se a estrela observada estivesse exatamente na vertical, a distorção seria nula. A maior distorção ocorre quando a estrela está bem próxima da linha do horizonte. É o que acontece frequentemente com o Sol, no nascente e no poente. Em razão dessa distorção, vemos o Sol dois minutos antes de ele realmente nascer, e continuamos a vê-lo dois minutos após se pôr.

As **miragens** (ou espelhismo) são outro fenômeno associado à variação de densidade do ar atmosférico. Em dias muito ensolarados, o ar próximo do asfalto fica menos denso que o ar das camadas superiores. Então, as ondas luminosas, provenientes de um objeto qualquer, propagando-se de um meio mais denso para um meio menos denso, podem sofrer, rente à superfície do asfalto, o fenômeno da **reflexão total**, em lugar da refração. Em virtude desse fenômeno, por exemplo, uma pessoa dentro de um carro em uma estrada tem a ilusão de que existem poças de água à sua frente, conforme ilustra a figura 9.19.

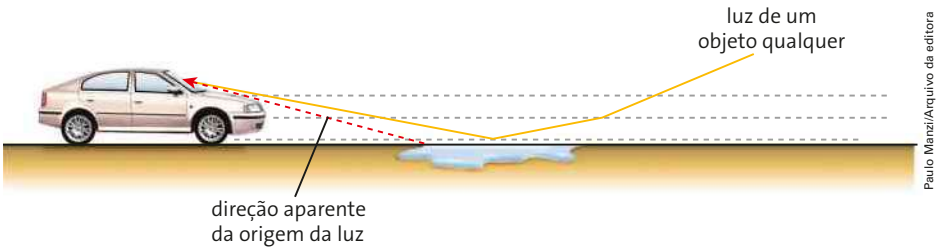


Figura 9.19 Representação (sem escala e em cores fantasia) de uma miragem vista por um observador no carro.

No deserto, esse fenômeno se torna mais impressionante com a produção das famosas miragens de água.

Dispersão luminosa



Figura 9.20 Representação do fenômeno da dispersão luminosa.

A dispersão ocorre porque, além de depender do meio, a velocidade de propagação da onda depende também de outros fatores, tais como a frequência e a amplitude. Esse fenômeno acontece com a luz nos meios materiais, onde ondas de diferentes frequências se propagam com diferentes velocidades. Em razão dessa diferença na velocidade de propagação, a luz se separa em cores ao sofrer refração.

As cores que compõem a luz branca solar são: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta. No vácuo, todas essas componentes propagam-se com a mesma velocidade. No entanto, ao incidir sobre a superfície de separação de dois meios, cada uma refrata com um ângulo diferente, por causa da diferença de velocidade entre elas, separando-se (figura 9.20). Esse fenômeno, que recebe o nome de **dispersão luminosa**, pode tornar-se mais acentuado se a luz sofrer duas refrações seguidas, como pode acontecer nos prismas.

Um exemplo clássico de dispersão luminosa é o **arco-íris**. Ele se forma em virtude da dispersão da luz branca solar ao incidir nas gotas de água em suspensão na atmosfera. Podemos entender como se processa essa dispersão analisando uma gota isoladamente.

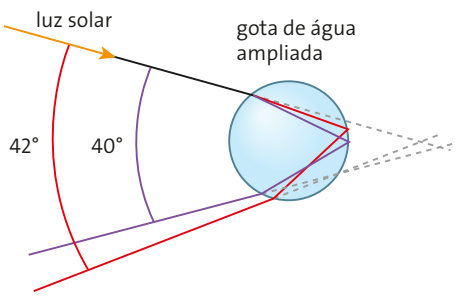
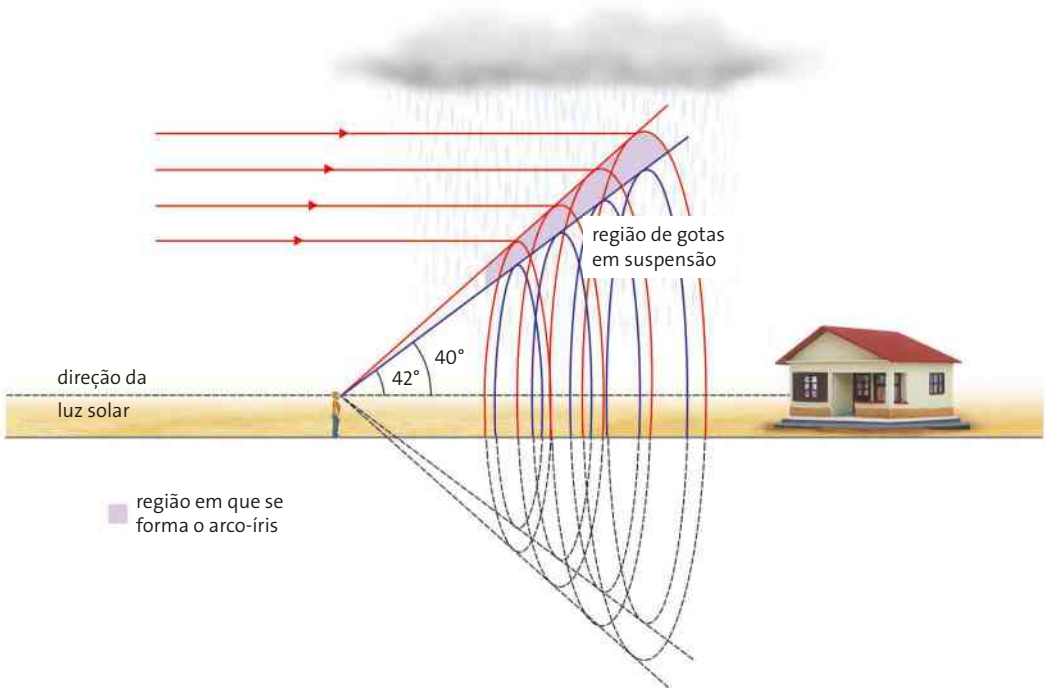


Figura 9.21 Representação (sem escala e em cores fantasia) da incidência de um raio de luz sobre uma gota de água na atmosfera, fazendo com que ocorra a formação de um arco-íris.

A figura 9.21 ilustra o comportamento de um raio de luz solar ao incidir sobre uma gota de água na atmosfera.

Observe que, depois de sofrer uma refração, uma reflexão e finalmente uma segunda refração, o raio de luz solar se apresenta separado em cores.

Uma pessoa que esteja de costas para o Sol e olhando um conjunto de gotas em suspensão na atmosfera (**figura 9.22**), em qualquer direção que forme um ângulo de 40° com a direção da luz incidente, verá a radiação violeta. Com um ângulo de 42°, a pessoa observará um círculo de cor vermelha. Entre esses dois extremos, podem ser observadas as demais cores do arco-íris.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.22 Representação (sem escala e em cores fantasia) da formação de um arco-íris.

Se dentro da gota ocorrer uma segunda reflexão, teremos, além do primeiro, um segundo arco-íris. Como a parcela de luz refletida é menor a cada reflexão, esse segundo arco-íris será bem mais tênue e, portanto, difícil de observar. Quando perceptível, ele aparece acima do primeiro com a sequência de cores invertida (**figura 9.23**).



Alexandre Cappi/Pulsar Imagens

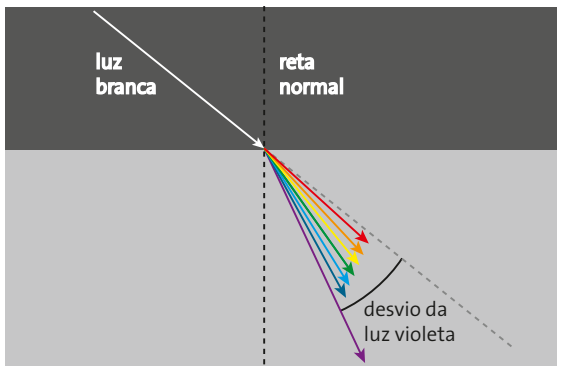
Figura 9.23 Formação de dois arco-íris. Observe o tênue segundo arco-íris que aparece um pouco acima do primeiro. Parque Nacional da Chapada Diamantina, Lençóis (BA), 2013.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

12. Classifique a frase a seguir em verdadeira ou falsa, reescrevendo-a corretamente no seu caderno se for falsa.
Nas estradas, em dias quentes, as camadas de ar próximas ao asfalto têm índice de refração menor que as camadas superiores. Esse fato, com os fenômenos da refração e da reflexão total da luz solar, é suficiente para explicar a impressão de "asfalto molhado" que às vezes se tem ao dirigir nas estradas.
Verdadeira.

13. Quando um feixe de luz branca sofre uma refração em um bloco de vidro, cada cor componente da luz branca sofre um desvio diferente, conforme mostra a figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Com base na figura, indique certo ou errado em cada afirmativa, reescrevendo corretamente aquelas que forem erradas.
I. A luz vermelha é a que sofre menor desvio. Certo.
II. A luz violeta é a que sofre maior desvio. Certo.
III. A luz verde é mais desviada que a luz amarela. Certo.

14. (Enem) Será que uma miragem ajudou a afundar o Titanic? O fenômeno ótico conhecido como Fata Morgana pode fazer com que uma falsa parede de água apareça sobre o horizonte molhado. Quando as condições são favoráveis, a luz refletida pela água fria pode ser desviada por uma camada incomum de ar quente acima, chegando até o observador, vinda de muitos ângulos diferentes. De acordo com estudos de pesquisadores da Universidade de San Diego, uma Fata Morgana pode ter obscurecido os *icebergs* da visão da tripulação que estava a bordo do Titanic. Dessa forma, a certa distância, o horizonte verdadeiro fica encoberto por uma névoa escurecida, que se parece muito com águas calmas no escuro.

Disponível em: <http://apod.nasa.gov> (adaptado). Acesso em: 6 set. 2012.

O fenômeno ótico que, segundo os pesquisadores, provoca a Fata Morgana é a:
a) ressonância.
b) refração.
c) difração.
X d) reflexão.
e) difusão.

15. Com relação ao arco-íris, classifique em certa ou errada cada afirmativa, reescrevendo corretamente aquelas que forem erradas.
I. Se uma pessoa observa um arco-íris à sua frente, certamente o Sol também está à sua frente. Errada.
II. O arco-íris se forma em virtude da dispersão da luz do Sol nas gotas de água. Certa.
III. O arco-íris é um fenômeno determinado pela refração e pela reflexão da luz solar no interior das gotas de chuva. Certa.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

5 Lentes esféricas

As lentes são os dispositivos ópticos de maior aplicação prática. Basta observar a quantidade de pessoas que delas se utilizam para corrigir anomalias da visão. Além disso, são vastas as aplicações em instrumentos ópticos, como máquinas fotográficas, microscópios, lunetas, projetores de *slides*, etc.

Vamos analisar o comportamento da luz ao atravessar uma lente, com a correspondente formação de imagem. Em lentes esféricas, a formação de imagens mais próximas ou mais afastadas, ampliadas (**figura 9.24.a**) ou reduzidas (**figura 9.24.b**) é decorrente do fenômeno da refração luminosa.





Fotografias: Andrew Lambert/SPL/Latinstock

Figura 9.24 Lentes que ampliam imagens (**a**) refratam a luz de maneira diferente das lentes que reduzem imagens (**b**).

Com base na **figura 9.25**, vamos destacar os principais elementos de uma lente:

- C_1 e C_2 – centros de curvatura das superfícies;
- r_1 e r_2 – raios de curvatura da lente;
- V_1 e V_2 – vértices da lente;
- e – espessura da lente;
- **eixo principal** – reta que contém os pontos C_1 e C_2.

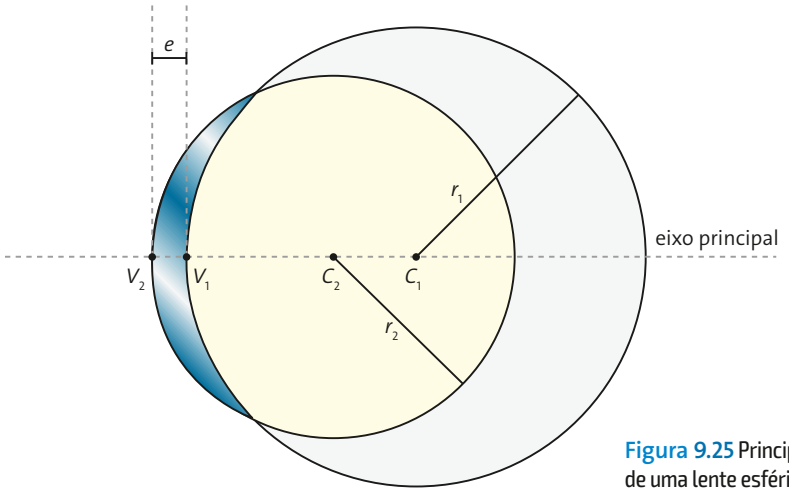
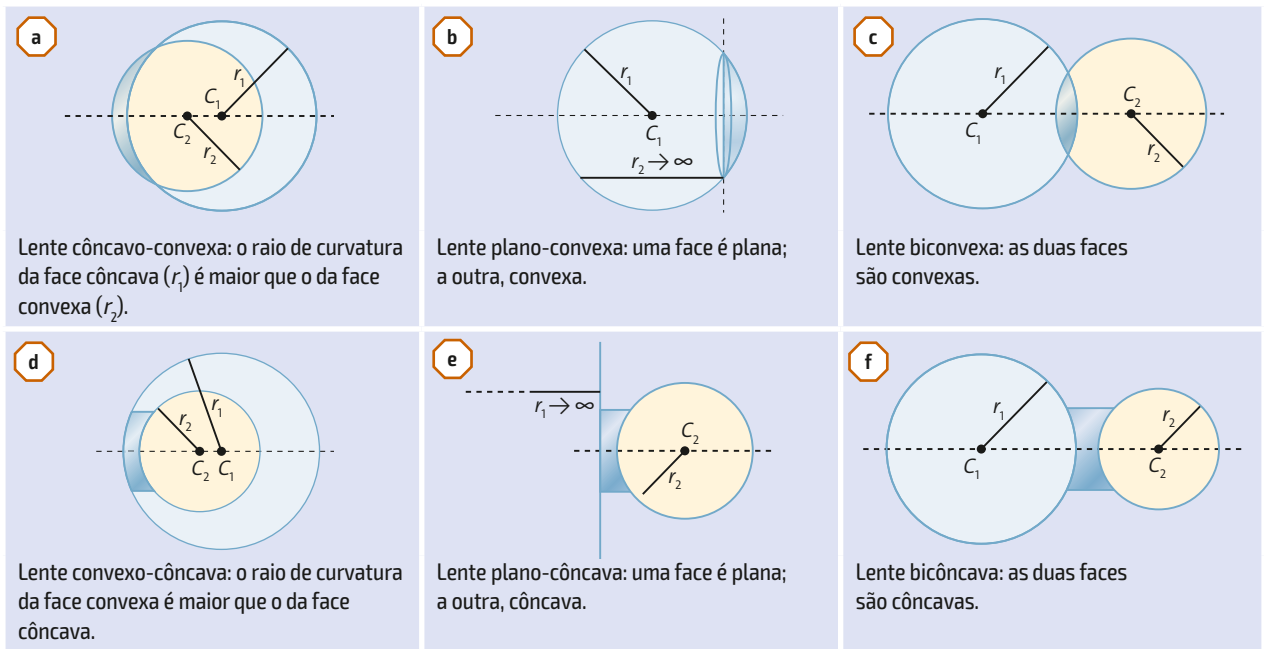


Figura 9.25 Principais elementos de uma lente esférica delgada.

As lentes esféricas são classificadas de acordo com a face (côncava, convexa ou plana) que possui maior raio de curvatura. Existem seis tipos de lente esférica, conforme mostra a **figura 9.26**.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 9.26 Tipos de lente esférica.

De acordo com a figura, temos três lentes convexas: côncavo-convexa (**a**), plano-convexa (**b**) e biconvexa (**c**); e três lentes côncavas: convexo-côncava (**d**), plano-côncava (**e**) e bicôncava (**f**). Observe que as lentes convexas têm bordas finas, ao passo que as côncavas possuem bordas grossas.

Geralmente, as lentes são utilizadas imersas no ar. Nessas condições, as lentes convexas são convergentes e as côncavas, divergentes. As figuras 9.27 e 9.28 ilustram o comportamento óptico das lentes convergentes e das divergentes, bem como a representação de cada uma.

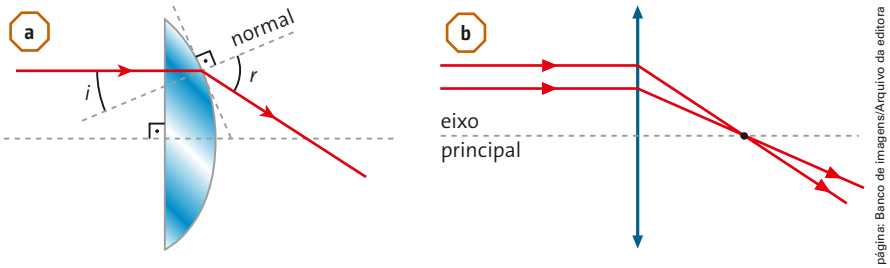


Figura 9.27 Representação do comportamento dos raios de luz em uma lente convergente (**a**). Representação geométrica do comportamento dos raios de luz em uma lente convergente (**b**).

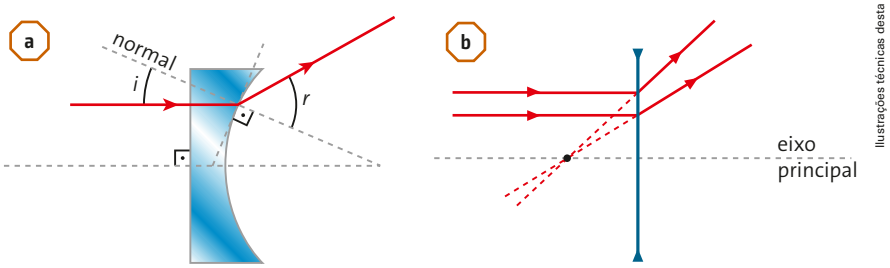


Figura 9.28 Representação do comportamento dos raios de luz em uma lente divergente (**a**). Representação geométrica do comportamento dos raios de luz em uma lente divergente (**b**).

Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Observe que, nas representações esquemáticas das figuras acima, as espessuras (*e*) das lentes foram desprezadas, pois em geral as superfícies encontram-se suficientemente próximas uma da outra.

Pontos notáveis

Nas lentes convergentes e nas divergentes, destacamos os seguintes pontos notáveis: **centro óptico** (O), **foco principal objeto** (F_o) e **foco principal imagem** (F_i) (figura 9.29). Os focos principais de uma lente são simétricos em relação a seu centro óptico.

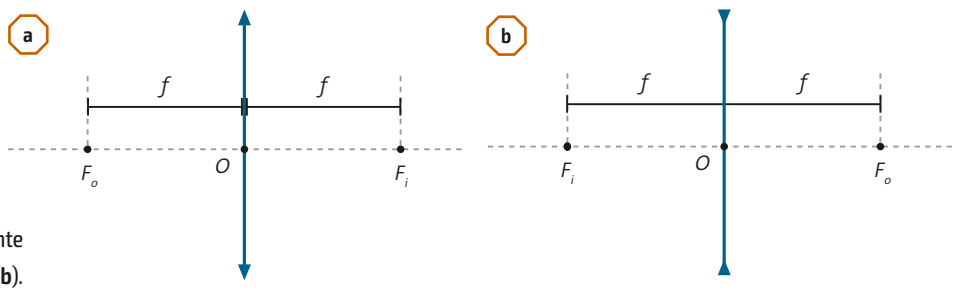


Figura 9.29 Lente convergente ($f > 0$) (**a**). Lente divergente ($f < 0$) (**b**).

A distância entre um foco principal e o centro óptico da lente é chamada de **distância focal**, mas, na realidade, trata-se de uma **abscissa focal** (f). A abscissa focal é positiva nas lentes convergentes e negativa nas divergentes.

A determinação da abscissa focal (f) de uma lente é feita por meio de uma expressão denominada **fórmula dos fabricantes de lentes**, proposta pelo astrônomo inglês Edmond Halley. Essa fórmula leva em conta os raios de curvatura r_1 e r_2 das faces da lente, além dos índices de refração dela e do meio no qual ela está imersa:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_{\text{lente}}}{n_{\text{meio}}} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$$

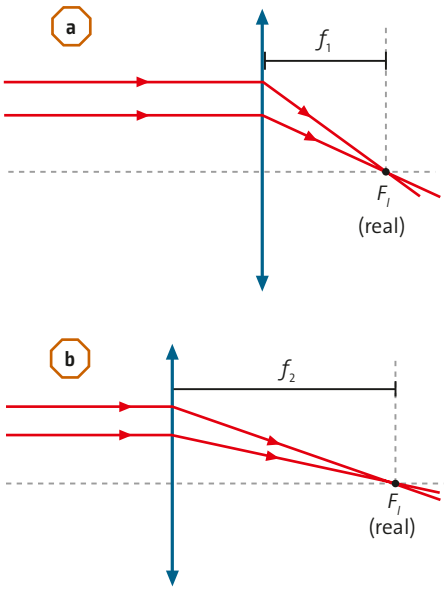
Ao utilizar essa expressão, devemos obedecer à seguinte convenção: se a face da lente é convexa, o raio de curvatura é positivo ($r > 0$); se a face é côncava, o raio de curvatura é negativo ($r < 0$); e, se a face é plana, o raio de curvatura tende a infinito ($r \to \infty$).

O inverso da abscissa focal, em metros, é definido como a **convergência** (C) da lente (antigamente o nome era vergência). A convergência de uma lente possui o mesmo sinal da abscissa focal e é dada por:

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

No Sistema Internacional (SI), a unidade de convergência é a **dioptria** (di), tal que $1\ \text{di} = \frac{1}{m} = m^{-1}$. Popularmente, a unidade de convergência (dioptria) é chamada de "grau". As pessoas geralmente se referem às lentes dos óculos como, por exemplo, de 2 graus e não 2 dioptrias.

Observe na figura 9.30 que, quanto menor a abscissa focal de uma lente, maior o seu módulo de convergência e, consequentemente, maior a sua capacidade de desviar a luz que incide sobre ela.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 9.30 A lente (**a**) apresenta convergência maior que a lente (**b**). Por isso, o desvio da luz na lente (**a**) é maior que o desvio da luz na lente (**b**).

Construção de imagens

Assim como fizemos com os espelhos esféricos, para construir a imagem de um objeto conjugada por uma lente precisamos conhecer alguns comportamentos específicos (propriedades) dos raios luminosos que, emitidos por um objeto, atravessam a lente sofrendo refração. Assim, temos:

Propriedade 1: Todo raio luminoso que incide passando pelo centro óptico da lente (ponto O) não sofre desvio.

Propriedade 2: Todo raio luminoso que incide passando pelo foco principal objeto da lente (ponto f_o), ou pelo seu prolongamento, emerge paralelamente ao eixo principal.

Propriedade 3: Todo raio luminoso que incide paralelamente ao eixo principal da lente emerge passando pelo foco principal imagem da lente (ponto f_i), ou pelo seu prolongamento.

A figura 9.31 ilustra as três propriedades para a lente convergente (**a**) e para a lente divergente (**b**).

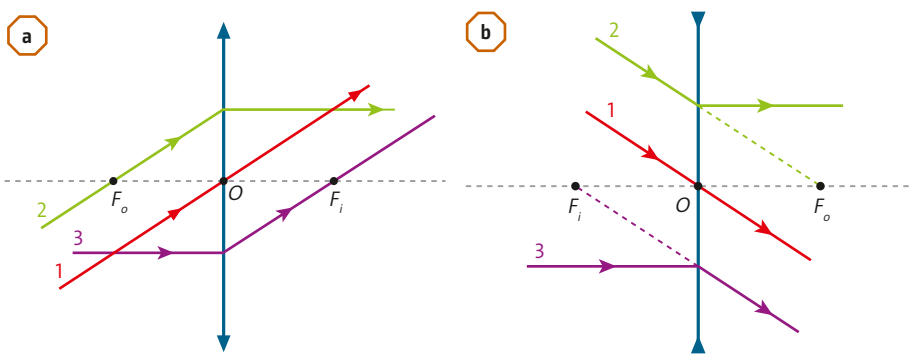


Figura 9.31 Representação geométrica do comportamento dos raios notáveis para a lente convergente (**a**) e para a lente divergente (**b**).

Vejamos, então, a construção de imagens conjugadas por uma **lente convergente** para um objeto real colocado à esquerda dela. Dependendo da posição do objeto em relação ao centro óptico da lente, esta pode associar uma imagem real ou virtual, direita ou invertida, maior, menor ou do mesmo tamanho que o objeto. Nas **figuras 9.32** e **9.33**, nas quais utilizamos somente duas das três propriedades citadas, mostramos dois tipos de imagens possíveis. Os pontos A_o e A_i têm papel importante como referências, pois são análogos aos centros de curvatura dos espelhos esféricos.

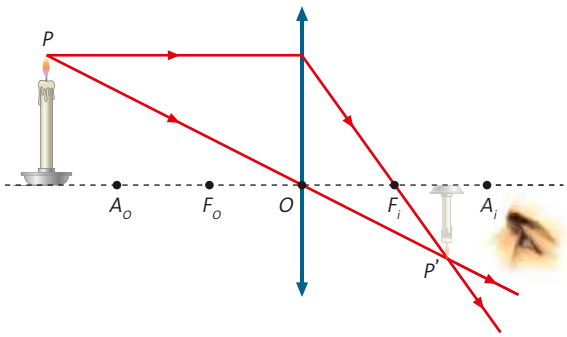
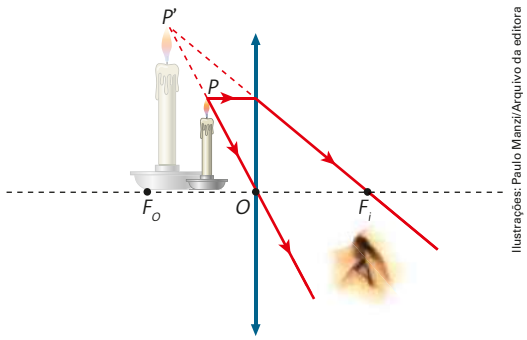


Figura 9.32 A imagem é real, invertida e menor que o objeto.



Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.33 A imagem é virtual, direita e maior que o objeto.

Trabalho em equipe

Utilizando uma lente convergente e um objeto real, construam no caderno as figuras correspondentes à:

a) imagem real, invertida e do mesmo tamanho que o objeto;

b) imagem real, invertida e maior que o objeto.

Respondam: Quais as relações entre as distâncias do objeto à lente e da imagem à lente?

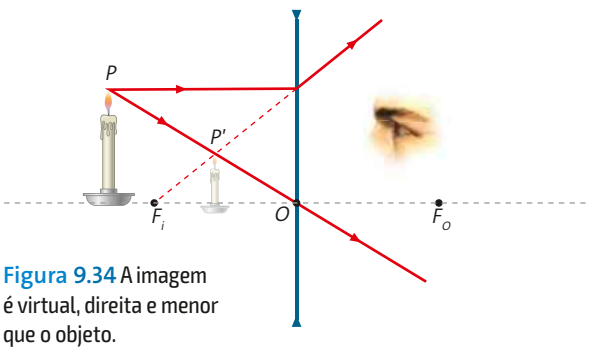


Figura 9.34 A imagem é virtual, direita e menor que o objeto.

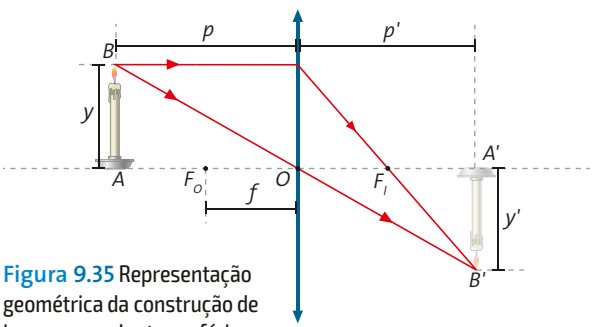


Figura 9.35 Representação geométrica da construção de imagens nas lentes esféricas.

Para uma **lente divergente**, seja qual for a posição do objeto real, a imagem obtida é sempre virtual, direita e menor que o objeto, conforme mostra a **figura 9.34**.

Do mesmo modo como fizemos nos espelhos esféricos, podemos relacionar as abscissas do objeto e da imagem com a abscissa focal da lente por meio da equação dos pontos conjugados, conforme mostra a **figura 9.35**.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$ (equação dos pontos conjugados)

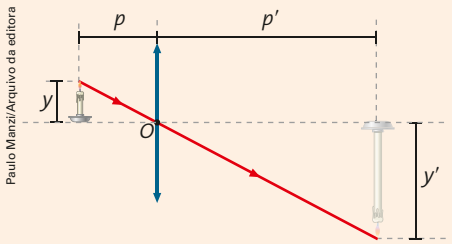
O aumento linear transversal (A) é dado por:

$$A = \frac{y'}{y} = -\frac{p'}{p}$$

Na utilização dessas duas expressões, devemos obedecer às mesmas convenções adotadas para os espelhos esféricos.

Exercício resolvido

3. Uma lente convergente projeta uma imagem real de um objeto real colocado a 12 cm do centro óptico da lente. Determine a abscissa focal, em metros, e a convergência da lente, em dioptrias, sabendo que a imagem tem cinco vezes o tamanho do objeto.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Resolução:

Como o objeto e a imagem são reais, tanto p (abscissa do objeto) quanto p' (abscissa da imagem) são positivos. O fato de a imagem ser real leva-nos a concluir que ela é invertida; sabendo que ela é cinco vezes maior que o objeto, construímos a figura.

De acordo com os dados da questão, temos: $p = 12$ cm e, como a imagem é invertida, $A = -5$. Podemos, então, calcular a abscissa da imagem (p') por meio da expressão:

$$A = \frac{p'}{p} \Rightarrow -5 = -\frac{p'}{12} = p' = 60 \text{ cm}$$

De acordo com a equação dos pontos conjugados, obtemos a abscissa focal da lente:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{12} + \frac{1}{60} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{5+1}{60} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f = 10 \text{ cm} = 0{,}1 \text{ m}$$

A convergência da lente, em dioptrias, vale:

$$C = \frac{1}{f} \Rightarrow C = \frac{1}{0{,}1} \Rightarrow C = 10 \text{ di}$$

Exercícios

17. a) A lente de $f = 40$ cm

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

16. No capítulo anterior, comentamos a lenda de que Arquimedes teria incendiado os navios romanos com o uso de escudos polidos formando um espelho côncavo. No entanto, é possível fazer pequenos pedaços de papel pegarem fogo com uma lente, conforme mostra a figura.

a) Qual deve ser a lente utilizada para isso: convergente ou divergente? Convergente.

b) Em que ponto os pedaços de papel devem ser colocados para tal finalidade? No foco.


Antonio Robson/Arquivo da editora

17. As lentes dos óculos de uma pessoa possuem as seguintes distâncias focais: olho direito, 40 cm, e olho esquerdo, 50 cm.

a) Qual das duas lentes possui maior convergência?

b) Qual delas possui maior capacidade de desviar a luz que incidir sobre ela? Também a lente de $f = 40$ cm

18. Um professor montou o seguinte experimento em sala de aula: inicialmente acendeu uma vela e colocou-a na frente de uma lente convergente apoiada em um suporte. Em seguida, colocou uma tela atrás da lente. Variando a posição da lente, o professor obteve na tela uma imagem nítida da chama da vela. Com uma régua, ele mediu a distância da vela até a lente e desta até a tela e verificou que elas eram praticamente iguais a 30 cm. Nessas condições, responda:

a) A imagem da chama da vela obtida na tela é real ou virtual? Direita ou invertida? Real e invertida.

b) Qual é a distância focal da lente utilizada pelo professor? $f = 15$ cm

19. Um objeto, com 2,0 cm de altura, é colocado a 6,0 cm do centro óptico de uma lente convergente com distância focal de 4,0 cm.

a) Desenhe, em seu caderno, uma figura mostrando a construção da imagem. A imagem obtida é real ou virtual? Direita ou invertida? Real e invertida.

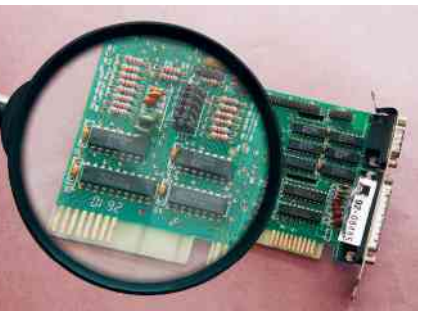
b) Aplique a equação dos pontos conjugados para determinar a abscissa da imagem e o seu tamanho. $p' = 12$ cm e $y' = -4{,}0$ cm

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

6 Instrumentos ópticos

Os instrumentos ópticos mais comuns são classificados em dois grupos:

- **instrumentos ópticos de observação** – lupa, luneta, telescópio e microscópio –, que produzem uma imagem final virtual, observada diretamente pelo operador do instrumento;
- **instrumentos ópticos de projeção** – câmera fotográfica e projetor de *slides* –, que produzem uma imagem final real, que pode ser projetada em um anteparo qualquer.



Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

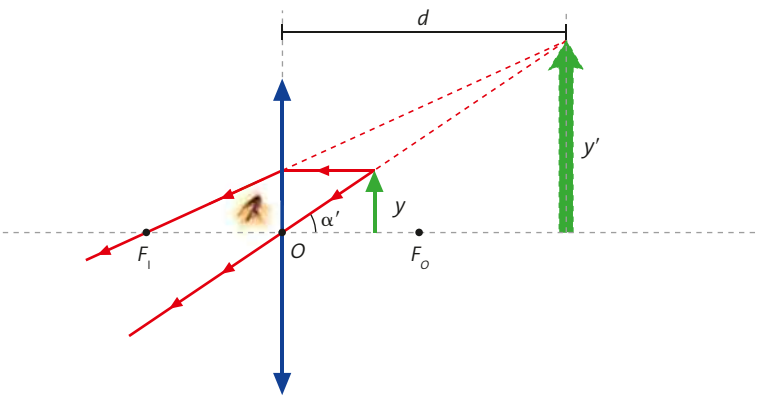
Figura 9.36 A lupa é considerada um microscópio simples. Na foto, está ampliando um circuito integrado.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Lupa

Para uma observação mais detalhada de pequenos objetos ou áreas de uma superfície, utilizamos a **lupa**, também conhecida como microscópio simples. A lupa é um instrumento de ampliação composto de uma lente convergente que nos fornece uma imagem virtual, direita e ampliada de um objeto real (**figura 9.36**).

Na **figura 9.37**, temos a representação de uma pessoa observando a imagem ampliada y' de um objeto y, através de uma lupa.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.37 A pessoa coloca a lente próximo do objeto para obter uma imagem virtual, direita e ampliada.



Djaó5/Shutterstock/Glow Images

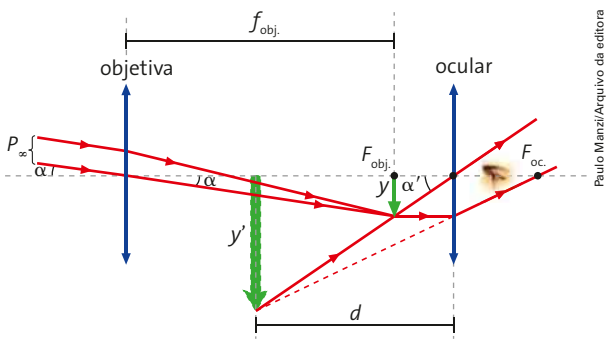
Figura 9.38 Luneta astronômica.

Lunetas

A **luneta astronômica** (**figura 9.38**) é empregada para a observação de astros ou objetos distantes que não conseguimos ver em detalhes a olho nu, porque o ângulo visual é pequeno. A função dessa luneta é exatamente produzir um aumento visual desses objetos.

A luneta astronômica contém duas lentes convergentes: a **objetiva**, de grande distância focal, que conjuga uma imagem real e invertida do objeto observado, e a **ocular**, de pequena distância focal, que nos fornece uma imagem final virtual e invertida em relação ao objeto.

A **figura 9.39** ilustra a formação da imagem final de tamanho y' conjugada pela luneta de um objeto distante.

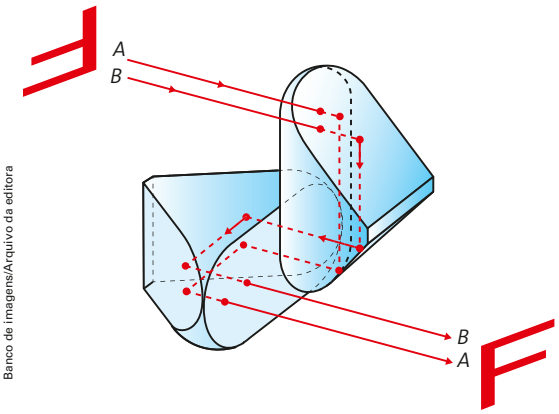


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.39 Representação esquemática do funcionamento de uma luneta astronômica.

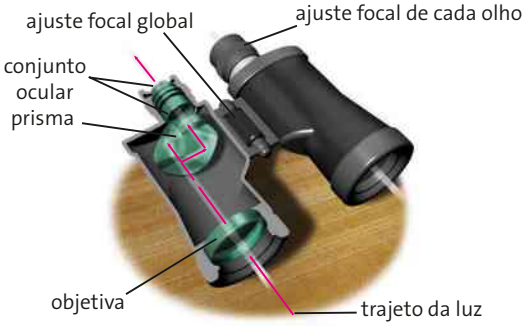
Para observações de objetos terrestres acrescenta-se à luneta astronômica um dispositivo óptico chamado **veículo**, cuja função é inverter novamente a imagem, com o objetivo de torná-la direita.

Com essa modificação, o instrumento é denominado **luneta terrestre**, como acontece no **binóculo** (figura 9.40), que possui duas lunetas terrestres acopladas, para que o observador possa ter noção de profundidade. Em cada luneta terrestre são utilizados dois prismas como veículos. Observe, na figura 9.41, como o par de prismas de Porro faz a dupla reversão da imagem final.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 9.41 Representação de dois prismas de Porro compondo um veículo. Note a ordem, na vertical, dos raios que chegam à associação (*AB*) e a ordem dos raios que emergem da associação (*BA*).



Antonio Robson/Arquivo da editora

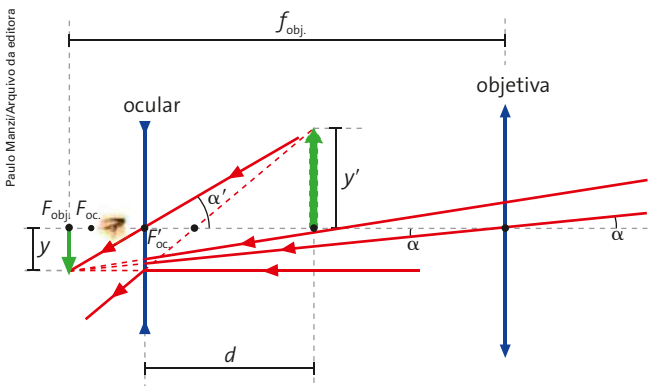
Figura 9.40 Normalmente, tanto a objetiva como a ocular dos binóculos são constituídas por uma associação de lentes com a finalidade de minimizar aberrações cromáticas e distorções geométricas. Representação sem escala e em cores fantasia.

A **luneta de Galileu** (figura 9.42) é mais curta que a astronômica em razão de dois fatores: sua ocular é uma lente divergente e ela não usa veículo, pois a imagem final é direita. A figura 9.43 ilustra a formação da imagem final nessa luneta.



Album/Akg-Images/Latinstock

Figura 9.42 Luneta de Galileu, também conhecida como binóculo de teatro.



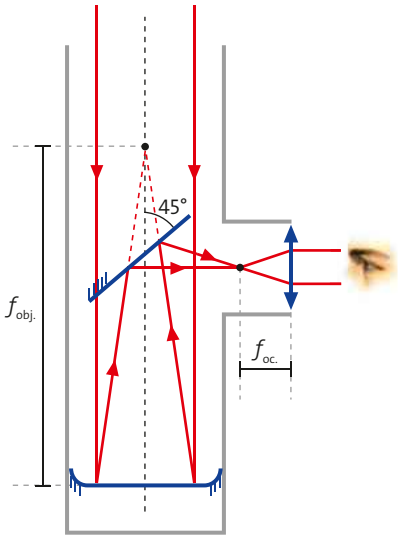
Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.43 Representação esquemática da construção de imagens na luneta de Galileu.

Aberração cromática – Devido aos diferentes índices de refração, as lentes produzem uma dispersão em diversos comprimentos de onda.

Telescópio

Normalmente, o telescópio é uma luneta na qual a função da objetiva é exercida por um espelho curvo, ocasionando uma construção mais fácil e sendo mais preciso que uma lente, além de evitar o fenômeno da **aberração cromática**.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.44 Representação esquemática do funcionamento do telescópio newtoniano.



Museu de Ciência, Londres/foto: Erich Lessing/Album/Latinstock

Figura 9.45 Telescópio newtoniano.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Para localizar objetos no infinito, o espelho utilizado nesse telescópio possui um perfil parabólico, que é mais preciso que um espelho esférico. Para dirigir a luz refletida do espelho curvo para a ocular, usa-se um espelho plano, ou um prisma, inclinado 45° em relação ao eixo do espelho. Na **figura 9.44**, temos o esquema de funcionamento do telescópio newtoniano (**figura 9.45**).

Richard J. Green/Photoresearchers/Latinstock

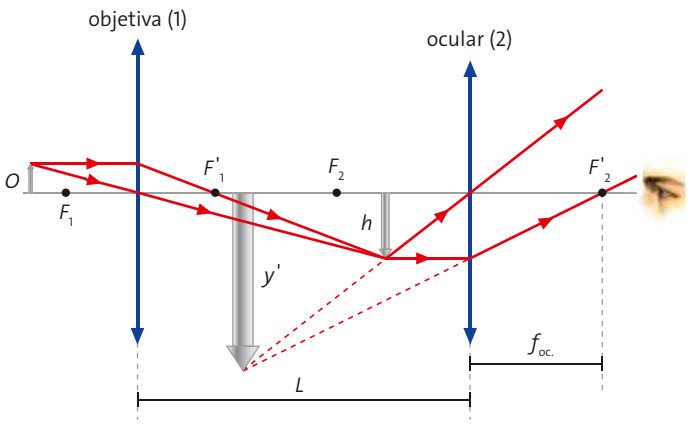


Figura 9.46 O microscópio composto é normalmente utilizado para observação de tecidos biológicos e alguns minerais.

Microscópio

O microscópio composto (**figura 9.46**) é utilizado para observar regiões minúsculas que, apesar de estarem próximas dele, o olho do observador não dispõe de resolução suficiente para ver.

Na **figura 9.47**, temos o esquema de formação de imagem no microscópio composto, que é constituído basicamente por duas lentes convergentes, ambas de pequena distância focal.

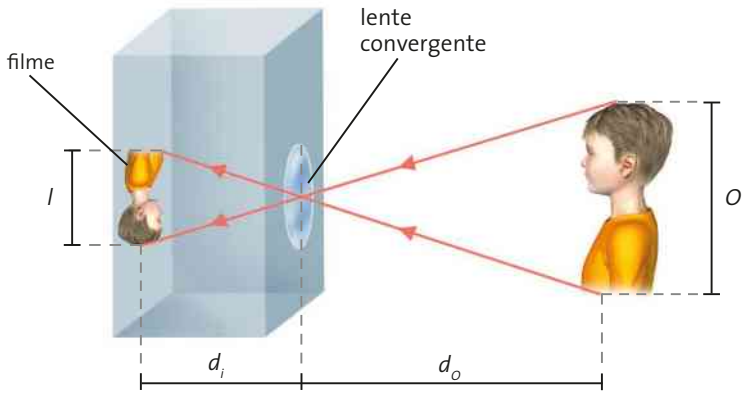


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.47 Representação esquemática da formação de imagens no microscópio composto.

Câmera fotográfica

Basicamente, a câmera fotográfica é constituída por uma lente convergente cuja função é projetar sobre o filme uma imagem real de um objeto real. A **figura 9.48** ilustra o esquema de funcionamento dessa câmera.



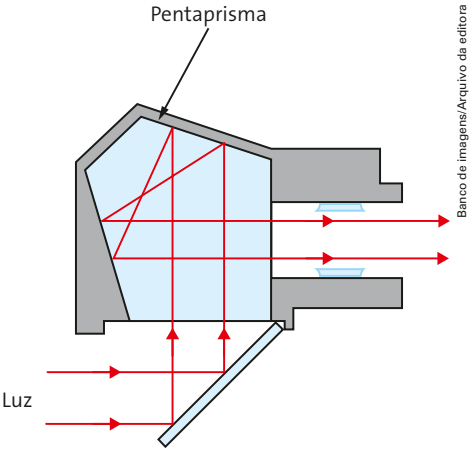


Figura 9.48 Representação esquemática do funcionamento de uma câmera fotográfica.

Com base na figura, percebemos que a relação entre os tamanhos da imagem e do objeto é igual à relação entre as distâncias da imagem à lente e do objeto à lente, ou seja:

$$\frac{i}{o} = \frac{d_i}{d_o}$$

Como normalmente os objetos fotografados estão a uma distância bem maior que a distância focal da objetiva da câmera, a imagem se forma praticamente no plano focal da imagem da lente. As pequenas diferenças são ajustadas alterando-se a posição da lente em relação ao filme. A **figura 9.49** mostra um esquema simplificado de uma câmera fotográfica.

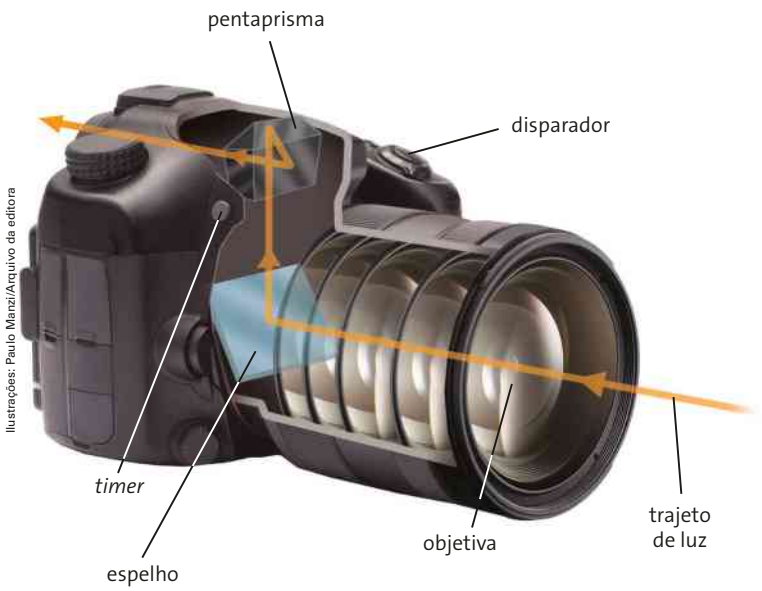


Figura 9.49 Representação simplificada dos componentes de uma câmera fotográfica e do desvio da luz no pentaprisma.

Projetor de *slides*

O esquema de funcionamento do projetor de *slides* é inverso ao da câmera fotográfica. A lente convergente conjuga para um pequeno *slide*, bem iluminado, uma imagem real e projetada sobre um anteparo, conforme mostra a **figura 9.50**.

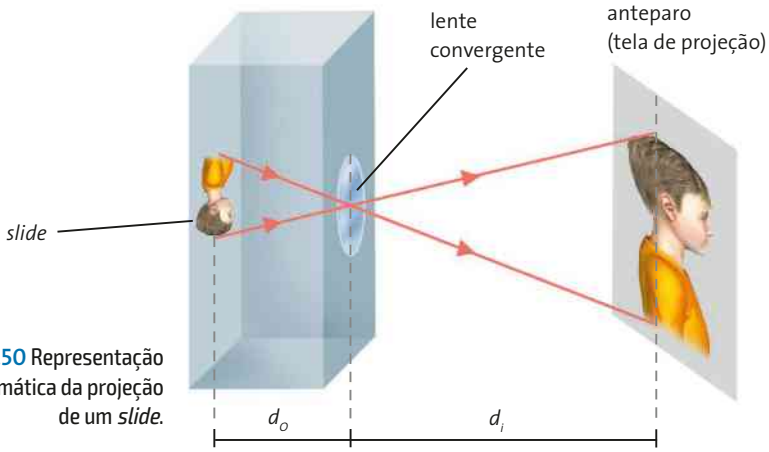


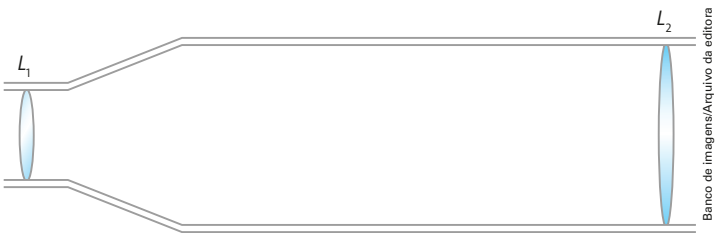
Figura 9.50 Representação esquemática da projeção de um *slide*.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

20. Um colecionador examina um selo com uma lupa colocada a 2,0 cm deste. Sabendo-se que a imagem observada está ampliada 5 vezes, determine a convergência da lente em dioptrias. $C = 40$ di

21. Um estudante construiu uma luneta com duas lentes L_1 e L_2, conforme mostra a figura a seguir (sem escala e em cores fantasia).



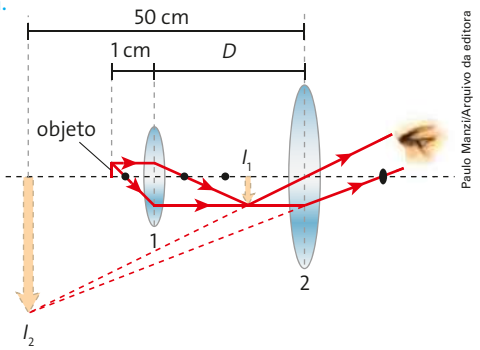
Banco de imagens/Arquivo da editora

Sabendo-se que a distância focal da lente L_1 é 20 mm e a da lente L_2, 1000 mm, responda:

a) As lentes são convergentes ou divergentes? Convergentes.

b) Qual delas é a ocular e qual é a objetiva? L_1 é ocular, L_2 é objetiva.

22. Um microscópio é composto de duas lentes convergentes: a objetiva e a ocular. A imagem do objeto conjugada pela objetiva serve de objeto para a ocular, que conjuga uma imagem final ampliada que será vista pelo observador. A figura ilustra (sem escala e em cores fantasia) o esquema de funcionamento de um microscópio.



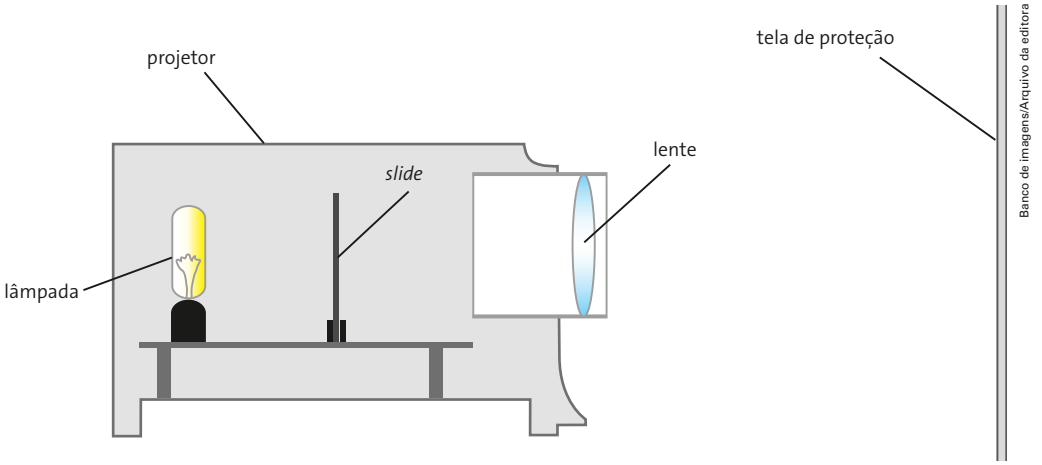
Paulo Manzi/Arquivo da editora

a) Nesse esquema, qual das lentes, 1 ou 2, funciona como objetiva e qual funciona como ocular? Objetiva: lente 1; ocular: lente 2.

b) Qual é a imagem final, I_1 ou I_2, vista pelo observador? I_2

23. Uma câmera fotográfica, equipada com uma objetiva de distância focal igual a 50 mm, é utilizada para fotografar um objeto que se encontra a 1,0 m da lente. Se a imagem está em foco, determine a distância entre o centro óptico da lente e o plano do filme. $p' = 52{,}6$ mm

24. A figura representa (sem escala e em cores fantasia) o esquema simplificado de um projetor constituído por uma lâmpada, um *slide*, uma lente convergente e uma tela de projeção.



Banco de imagens/Arquivo da editora

A lente conjuga na tela uma imagem ampliada do *slide* iluminado pela lâmpada. Nessas condições,

a) a distância do *slide* à lente deve ser maior, menor ou igual à distância focal da lente? Maior.

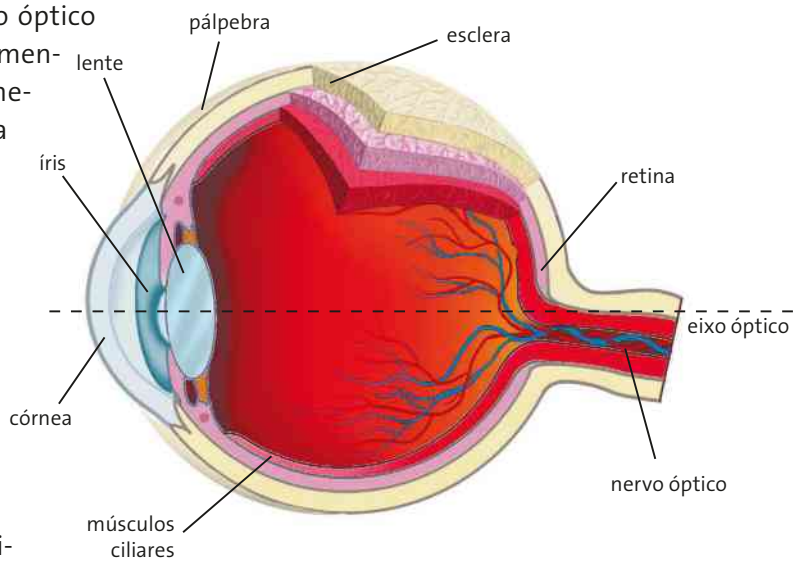
b) se o *slide* está a 5,0 cm da lente e a ampliação é igual a 10, determine a distância focal da lente. $f' = 4{,}5$ cm

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

7 Óptica do olho humano

O olho humano é um instrumento óptico altamente sofisticado. O seu funcionamento pode ser comparado ao de uma câmera fotográfica: o olho é a lente, a pupila é o diafragma e a retina é o filme fotográfico em cores.

A função da pupila, assim como a do diafragma da máquina fotográfica, é restringir a passagem dos raios luminosos na região próxima ao eixo óptico, para melhor nitidez. Se a quantidade de luz no ambiente é pequena, a pupila se dilata, permitindo a passagem de mais luminosidade, embora com algum sacrifício da nitidez. É por isso que temos dificuldade de ler em ambientes pouco iluminados.



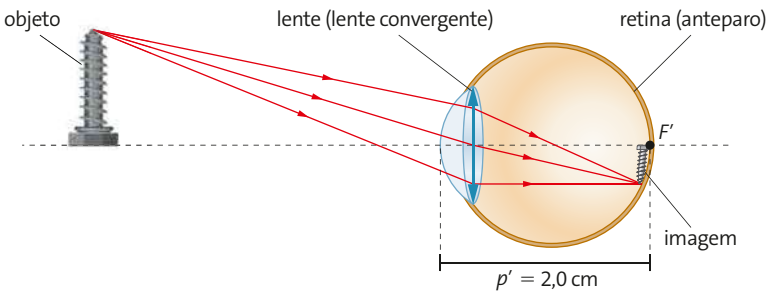
Osni de Oliveira/Arquivo da editora

Figura 9.51 Representação (sem escala e em cores fantasia) do olho humano em corte lateral.

Na **figura 9.51** vemos a representação do olho humano com suas principais estruturas.

Na retina, rica em células fotossensíveis, é conjugada a imagem final. Para que isso ocorra, os músculos ciliares enlaçam a lente, mudando sua convergência em função das diferentes posições dos objetos focalizados. Esse mecanismo chama-se **acomodação visual.** Na máquina fotográfica, fazemos isso avançando ou recuando a lente à medida que a distância do objeto se altera.

Para simplificar nosso estudo, utilizaremos um esquema que chamamos de **olho reduzido** (**figura 9.52**). Ele é constituído de uma lente convergente (de convergência variável) e de um anteparo posicionado a uma distância constante em relação à lente (aproximadamente 2 cm).



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.52 Representação esquemática da formação de imagem no olho reduzido.

Em um olho normal, o ponto mais distante de visão nítida, denominado **ponto remoto**, situa-se no infinito (em média, no ser humano, é de 7 metros). Nessa situação, a lente está completamente relaxada e a visão ocorre sem esforço de acomodação.

Ainda no olho normal, sob máximo esforço de acomodação, ou seja, com os músculos ciliares totalmente contraídos, o ponto mais próximo de visão nítida, chamado **ponto próximo**, fica a 25 cm da lente, aproximadamente.

A diferença entre a convergência máxima e a mínima do olho humano é conhecida como **amplitude de acomodação visual** e vale, para um olho normal, **4 di**.

O olho humano pode ser acometido de anomalias, também chamadas de **ametropias**.

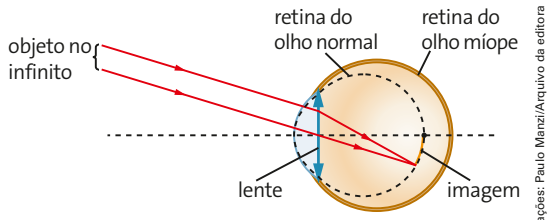
Ametropia – Erro da refração ocular que dificulta a nitidez da imagem na retina.

As anomalias mais comuns da visão são miopia, hipermetropia, presbiopia e astigmatismo. Vejamos cada uma delas.

Miopia

Geralmente a razão dessa anomalia, também conhecida como "vista curta", é um alongamento do globo ocular, de modo que, mesmo com a lente completamente relaxada, a imagem se forma antes da retina (**figura 9.53**). Por isso o míope não consegue acomodação visual para um objeto no infinito.

A lente fica completamente relaxada quando o míope está visualizando um objeto a uma distância finita. Para o míope, o ponto remoto é essa distância finita.



Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.53 No olho míope a imagem se forma antes da retina. Representação sem escala e em cores fantasia.

Para "corrigir" a miopia de um olho, utiliza-se uma lente. A função dela é conjugar, de um objeto finito, uma imagem no ponto remoto. A função das lentes "corretoras" não é corrigir uma ametropia, mas produzir as imagens em uma região onde o usuário tenha acomodação visual. No caso da miopia, essa tarefa é desempenhada por uma lente divergente, uma vez que o olho míope apresenta excesso de convergência (**figura 9.54**).

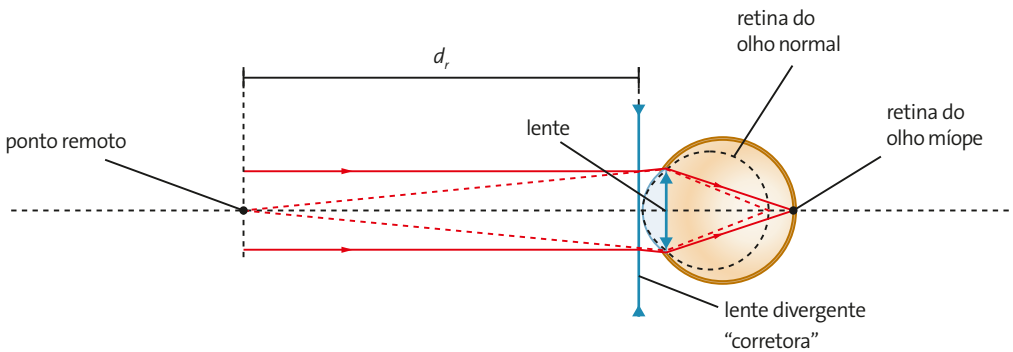


Figura 9.54 O olho míope precisa de uma lente divergente para focalizar a imagem. Representação sem escala e em cores fantasia.

A distância focal (f) da lente corretora da miopia é, em módulo, igual à distância máxima (d_r) de visão nítida, mas é negativa, já que a lente é divergente: $f = -d_r$.

A convergência da lente corretora é dada por:

$$C = \frac{1}{f} \Rightarrow C = -\frac{1}{d_r}$$

Pelo fato de o olho míope ser alongado, resta uma pequena compensação: o ponto próximo fica antes dos 25 cm. É por isso que o míope sem óculos coloca os objetos bem perto dos olhos, a fim de visualizá-los com mais detalhes. Uma pessoa de visão normal não conseguiria aproximar tanto o objeto sem perda de nitidez.

Hipermetropia

O olho hipermetrope é mais "curto" que o olho normal. Essa diferença, embora milimétrica, não permite que ele consiga acomodação visual para objetos muito próximos, pois lhe falta convergência. O ponto próximo do olho hipermetrope situa-se mais distante que os 25 cm usuais.

A **figura 9.55** ilustra o cristalino em sua contração máxima sem que o olho hipermetrope consiga acomodação visual. Como recurso, o hipermetrope tenta afastar os textos na hora de ler, mas isso acarreta perda de definição, já que as letras de um texto comum não são dimensionadas para observação além de certa distância.

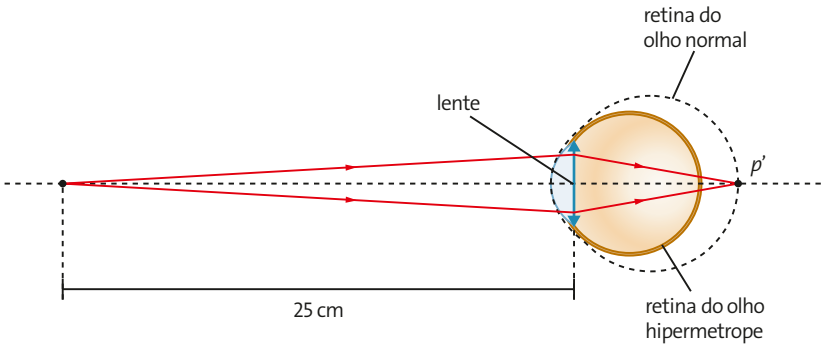
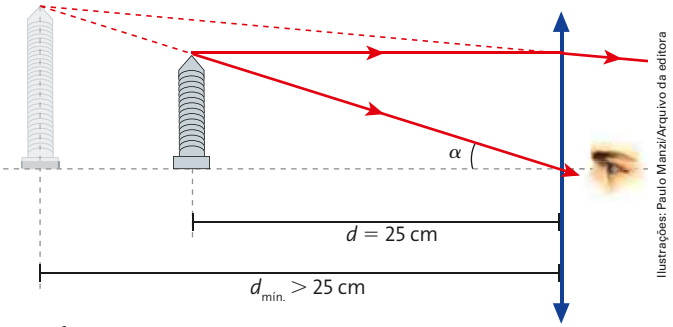


Figura 9.55 No olho hipermetrope, a imagem se forma depois da retina. Representação sem escala e em cores fantasia.

A solução para o hipermetrope é uma lente convergente que conjugue, para um objeto a 25 cm do olho, uma imagem no ponto mais próximo de visão nítida, como ilustra a **figura 9.56**.



Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 9.56 O olho hipermetrope precisa de uma lente convergente para focalizar a imagem. Representação sem escala e em cores fantasia.

Sendo assim, obtemos: $\begin{cases} p = 25\,\text{cm} = 0{,}25\,\text{m} \\ p' = d_{\text{mín.}} \end{cases}$

Como $C = \dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{p} + \dfrac{1}{p'}$, temos:

$$C = \frac{1}{0{,}25} - \frac{1}{d_{\text{mín.}}} \Rightarrow C = 4 - \frac{1}{d_{\text{mín.}}}$$

Essa expressão nos fornece a convergência (em dioptrias) de uma lente que corrige a hipermetropia, sendo $d_{\text{mín}}$. dado em metros e maior do que 0,25 m.

Vale a pena observar que, embora esteja a mais de 25 cm, a imagem é vista sob o mesmo ângulo visual e com a mesma definição que teria para uma pessoa de visão normal a essa mesma distância.

No entanto, ainda podemos nos perguntar: corrigimos o ponto próximo ($d_{\text{mín.}}$), mas o que acontece com o ponto remoto? Como consequência do globo ocular mais curto, ao visualizar objetos no infinito, o cristalino do hipermetrope não fica completamente relaxado; só o ficará com o uso da lente corretora. Esta desloca o intervalo de acomodação para aquele que teria um olho normal, tal como acontece na correção da miopia.

Um fato curioso ocorre quando o hipermetrope necessita de uma lente corretora com convergência maior que 4 di. Para $C > 4$ di, temos:

$$4 - \frac{1}{d_{\text{mín.}}} > 4 \Rightarrow d_{\text{mín.}} < 0$$

Nesse caso, o grau de hipermetropia é tão grande que o ponto mais próximo de visão nítida está "além do infinito", ou seja, é virtual. Isso significa que, sem o uso de óculos, essa pessoa não verá nitidamente nenhum objeto real, por mais afastado que esteja.

Presbiopia

Com o passar dos anos, o cristalino sofre um enrijecimento, perdendo sua amplitude de acomodação. É a chamada “vista cansada”.

É comum pessoas com mais de 40 anos de idade não conseguirem a necessária contração do cristalino para visualizar objetos a 25 cm de distância, mesmo que anteriormente não tenham tido anomalia visual nenhuma. Nesses casos, é preciso corrigir apenas o ponto próximo, visto que o problema está na lente e não na geometria do globo ocular.

O procedimento para corrigir a formação de imagem no olho com problema de presbiopia é idêntico ao usado para a correção da hipermetropia, com a ressalva de que a visão do ponto remoto não pode ser prejudicada. Uma solução é o presbita usar óculos somente para visão próxima, retirando-os para visão distante. Outra solução é o uso das lentes bifocais, que podem servir apenas para a correção da presbiopia ou para a correção simultânea da miopia e da presbiopia.

Astigmatismo

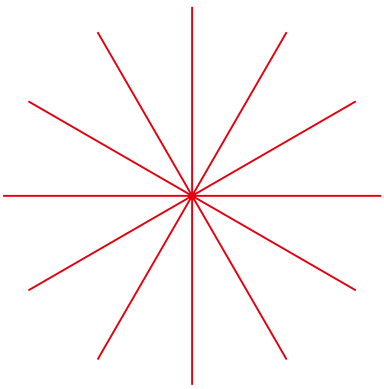
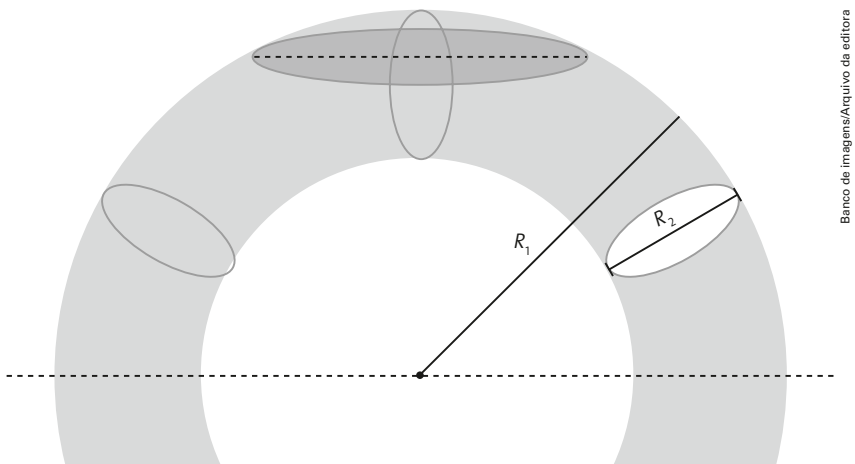


Figura 9.57 Uma ilustração que o astigmático tem dificuldade de enxergar.

Um sistema óptico é dito **estigmático** quando associa a um ponto objeto um único ponto imagem. Em outras palavras possui nitidez. O termo astigmatismo significa, portanto, ‘ausência de nitidez’. A imagem é borrada. Essa anomalia geralmente se deve à falta de simetria esférica na córnea. Em virtude dessa assimetria, a córnea não tem o mesmo raio em todas as direções. Se uma direção está focalizada, uma outra, que corresponde a um raio diferente, não está.

A **figura 9.57** ilustra várias retas com direções diferentes. O olho astigmático terá dificuldade em focalizar o ponto de encontro de todas elas, já que ele pertence a várias direções diferentes.

Para compensar a assimetria da córnea usa-se uma lente que também seja assimétrica, como a esquematizada na **figura 9.58**.



Banco de imagens/Arquivo de editora

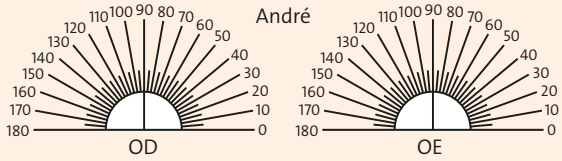
Figura 9.58 Representação de uma lente assimétrica.

Uma lente muito utilizada para corrigir o astigmatismo é a tórica, retirada do toro (câmara de ar), que não possui o mesmo raio em todas as direções. Os raios e o eixo dessa lente variam de acordo com o “grau” do astigmatismo. A direção do eixo é especificada na receita médica.

Exercício resolvido

4. Um oftalmologista, após um exame em uma pessoa de 25 anos, prescreveu a receita mostrada a seguir.

André



		Esférica	Cilíndrica	Eixo
Para longe	OD	– 4,00 di	– 1,25 di	90°
	OE	– 2,50 di	– 1,75 di	100°
Para perto	OD			
	OE			

a) Com base na receita prescrita pelo médico, qual(is) o(s) defeito(s) de visão que essa pessoa apresenta?
b) Calcule a distância focal das lentes esféricas receitadas.

Resolução:

a) Como a receita indica lentes esféricas com convergência negativa para ambos os olhos, essa pessoa apresenta miopia em ambas as vistas.
Por outro lado, a indicação de lentes cilíndricas implica a existência de astigmatismo.

b) Para o olho direito, a lente receitada apresenta uma convergência de $-4{,}00$ di.
Assim, a distância focal correspondente vale:

$$C = \frac{1}{f} \Rightarrow -4{,}00 = \frac{1}{f} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow f = -0{,}25\,\text{m} = -25\,\text{cm}$$

E, para o olho esquerdo, temos $-2{,}50$ di.
Assim:

$$C = \frac{1}{f} \Rightarrow -2{,}50 = \frac{1}{f} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow f = -0{,}40\,\text{m} = -40\,\text{cm}$$

Exercícios

27. a) Miopia. Deve usar lentes divergentes.

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

25. Em relação ao olho humano, indique certo ou errado para cada afirmativa.

I. Quando uma pessoa olha para um objeto distante, não há necessidade de nenhum esforço de acomodação visual. Certo.

II. O cristalino é uma lente biconvexa e flexível que projeta na retina uma imagem real e direita do objeto visualizado. Errado.

III. A função da pupila é controlar a entrada de luz, dilatando-se quando o ambiente externo tem pouca luz e contraindo-se na presença de muita luz. Certo.

26. No olho de uma pessoa, a distância da córnea à retina é aproximadamente 2,5 cm. Para que a focalização da vista passe do infinito para um ponto a 25 cm do olho dessa pessoa, a distância focal do cristalino deve aumentar, diminuir ou permanecer a mesma? Justifique.
Diminuir.

27. (UFTM-MG) Uma pessoa apresenta, nos dois olhos, determinada ametropia ou defeito de visão. Em uma consulta oftalmológica, o médico mostrou-lhe duas imagens. A imagem 1 representando como uma pessoa com o mesmo defeito de visão veria determinada cena. A imagem 2 mostrando como uma pessoa com visão normal enxergaria a mesma cena.

Reprodução/Vestibular UFTM 2013


imagem 1


imagem 2

(www.nei.nih.gov. Adaptado.)

Note que a pessoa com defeito de visão consegue ver nitidamente objetos próximos de si, como a bola laranja da figura, por exemplo. Porém, enxerga com dificuldade as faces dos garotos da cena, mais afastadas, bem como objetos distantes. Sabendo que esse problema pode ser corrigido utilizando uma lente esférica, responda:

a) Qual é o nome do defeito visual dessa pessoa e que comportamento óptico deve ter a lente esférica adequada para corrigi-lo?
b) Se essa pessoa só enxerga nitidamente, sem lentes corretivas, objetos até 40 cm de seus olhos, qual é a vergência, em dioptrias, das lentes corretivas de seu defeito visual? $C = -2{,}5$ di

28. Após examinar Rafael, um oftalmologista prescreveu a seguinte receita: **28 a)** Hipermetropia e astigmatismo.

		Esférica	Cilíndrica	Eixo
Para longe	OD			
	OE			
Para perto	OD	+5,50 di	−3,75 di	0°
	OE	+5,00 di	−2,75 di	0°

Supondo que Rafael não apresente presbiopia, responda:

a) Quais as anomalias que afetam os olhos de Rafael?
b) Qual das duas lentes esféricas, para o olho esquerdo ou para o direito, possui maior distância focal? Justifique. A lente do olho esquerdo. Veja complemento da resposta no Manual do Professor.

Em construção

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

Edmond Halley

Edmond Halley, matemático, físico e astrônomo inglês, nasceu em 1656 e faleceu em 1742. Filho de uma família rica, Halley iniciou seus estudos em Londres, na St. Paul's School, e em 1673 foi para o Queen's College, em Oxford.

Em 1675, foi construído o Observatório Real de Greenwich, patrocinado pelo rei Carlos II (1630-1685) da Inglaterra, e o astrônomo inglês John Flamsteed (1646-1719) foi seu primeiro diretor. O projeto de Flamsteed era o de catalogar com um telescópio os astros e as estrelas do hemisfério norte para auxiliar a navegação. Influenciado pelo projeto, Halley estudou Astronomia e, em 1676, sem terminar o curso, partiu para a ilha de Santa Helena, no Atlântico Sul, onde catalogou (latitude e longitude) 341 estrelas e observou o trânsito do planeta Mercúrio pelo disco solar.



Coleção particular/foto: Paul D.Stewart/Science Photo Library/Latinstock

Retrato de Edmond Halley (1656-1742).

Halley retornou à Inglaterra em 1678, publicou seu catálogo com as determinações telescópicas das estrelas do hemisfério sul e estabeleceu sua reputação como astrônomo. Nesse ano, foi eleito membro da Royal Society e formou-se na Universidade de Oxford.

Nos anos seguintes, Halley, com o físico Robert Hooke (1635-1703) e o matemático e arquiteto Sir Christopher Wren (1632-1723), ambos ingleses, dedicou-se a aplicar a lei do inverso do quadrado da distância à força que mantém os planetas em órbita em torno do Sol, com base nas leis do astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630). Em 1682, a observação de um cometa levou Halley à previsão de que o fenômeno se repetiria a cada 76 anos. Halley não viveu para ver o reaparecimento do cometa, que de fato ocorreu 76 anos depois, em 1758. Em sua homenagem, esse cometa passou a ser conhecido como **cometa de Halley**.

Em 1684, Halley fez sua primeira visita a Isaac Newton (1643-1727), em Cambridge, e tomou conhecimento da teoria da gravitação de Newton. Halley não só incentivou como ajudou financeiramente Newton a publicar a obra *Princípios matemáticos da filosofia natural*, que ocorreu em 1687.

Em 1704, Halley foi nomeado professor de Geometria em Oxford e deu prosseguimento a seu trabalho pioneiro de observações astronômicas. Em 1705, publicou o livro *Uma sinopse da Astronomia dos cometas*, no qual descreve as órbitas parabólicas de 24 cometas observados entre 1337 e 1698. Ele mostrou que os três históricos cometas de 1531, 1607 e 1682 eram, na realidade, o mesmo: o cometa de Halley. Em 1720, Halley sucedeu John Flamsteed como astrônomo real de Greenwich.

A contribuição de Halley à ciência não se restringe à observação de estrelas e cometas. É dele a primeira carta meteorológica, um mapa-múndi que mostra a distribuição dos ventos sobre os oceanos, publicada em 1686. Em 1701, publicou o primeiro mapa magnético das áreas do Atlântico e do Pacífico, que muito contribuiu para as navegações.

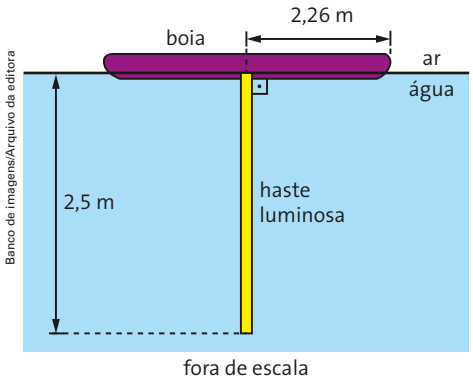
Halley é responsável, também, pelas primeiras descrições do ciclo de evaporação, formação de nuvens e precipitação. Data de 1716 o desenvolvimento do método para a determinação da distância da Terra ao Sol usando o movimento do planeta Vênus por meio do disco do Sol. Finalmente, devemos a Halley a fórmula conhecida como equação dos fabricantes de lentes, muito utilizada para a determinação da distância focal e da convergência de uma lente.

Em *O livro de ouro do Universo,* do físico e astrônomo Ronaldo Rogério de Freitas Mourão, publicado pela Ediouro, Rio de Janeiro (páginas 256 a 271), você encontrará um excelente material sobre Edmond Halley, sobre os cometas em geral e, em particular, sobre o cometa Halley e sua passagem pela Terra em 1910. A última aparição desse cometa foi em 1986, e a próxima será em 2061.

Retomando

Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resolução dos exercícios deste capítulo.

29. (Vunesp) Uma haste luminosa de 2,5 m de comprimento está presa verticalmente a uma boia opaca circular de 2,26 m de raio, que flutua nas águas paradas e transparentes de uma piscina, como mostra a figura. Devido à presença da boia e ao fenômeno da reflexão total da luz, apenas uma parte da haste pode ser vista por observadores que estejam fora da água.

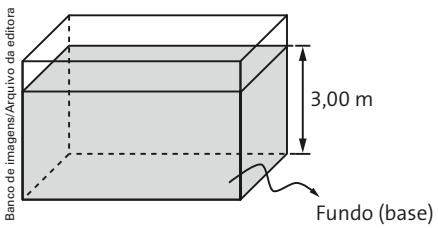


fora de escala

Considere que o índice de refração do ar seja 1,0, o da água da piscina $\frac{4}{3}$, sen 48,6° = 0,75 e tg 48,6° = 1,13. Um observador que esteja fora da água poderá ver, no máximo, uma porcentagem do comprimento da haste igual a:

a) 70%.
b) 60%.
c) 50%.
X d) 20%.
e) 40%.

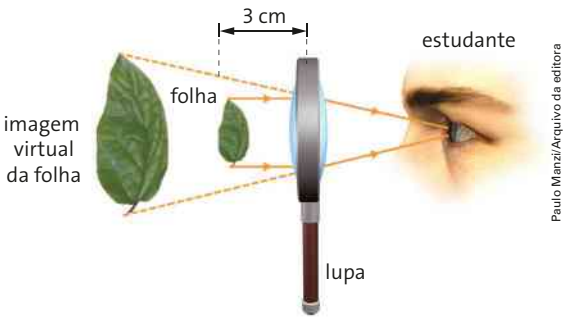
30. (Mack-SP) Certa piscina contém água, de índice de refração absoluto igual a $\frac{4}{3}$, e sua base se encontra 3,00 m abaixo da superfície livre.



Quando uma pessoa, na beira da piscina, olha perpendicularmente para seu fundo (base), terá a impressão de vê-lo: (Dado: Índice de refração absoluto do ar $n = 1$)

a) 2,25 m mais próximo, em relação à profundidade real.
b) 1,33 m mais próximo, em relação à profundidade real.
X c) 0,75 m mais próximo, em relação à profundidade real.
d) 1,33 m mais distante, em relação à profundidade real.
e) 0,75 m mais distante, em relação à profundidade real.

31. (Vunesp) Para observar uma pequena folha em detalhes, um estudante utiliza uma lente esférica convergente funcionando como lupa. Mantendo a lente na posição vertical e parada a 3 cm da folha, ele vê uma imagem virtual ampliada 2,5 vezes.



Considerando válidas as condições de nitidez de Gauss, a distância focal, em cm, da lente utilizada pelo estudante é igual a:

X a) 5.
b) 2.
c) 6.
d) 4.
e) 3.

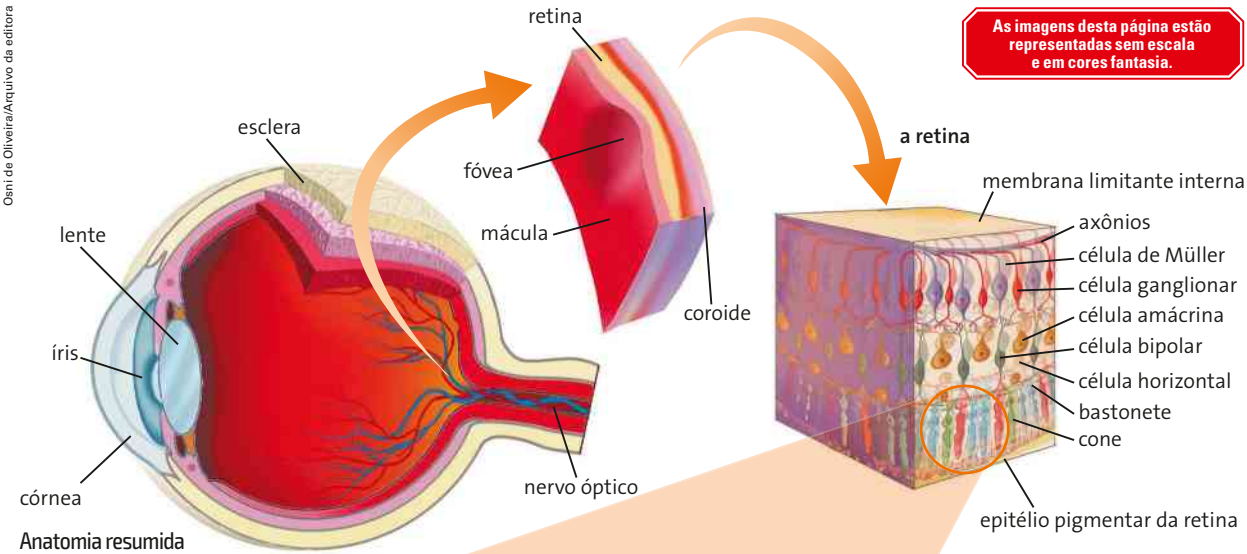
32. (Cesumar-PR) Um indivíduo hipermetrope tem seu ponto próximo situado a 0,5 m da vista. Admitindo como desprezíveis as distâncias entre as lentes e os olhos, determine a vergência, em dioptrias (di), e o tipo de lente que ele deve usar para que possa enxergar nitidamente objetos situados a 25 cm de distância.

a) 1,75 di, lente divergente.
X b) 2 di, lente convergente.
c) 0,75 di, lente divergente.
d) 1,75 di, lente convergente.
e) 2 di, lente divergente.

Reações químicas na visão

Para que tenhamos sensações visuais, os raios luminosos provenientes de uma fonte, que podem ou não ter sofrido reflexão em outros objetos, incidem na córnea, passando pelo cristalino, e são projetados na retina, onde há dois tipos de fotorreceptores, os **cones** e os **bastonetes**, que captam e convertem a luz recebida em impulsos nervosos, que são levados até o cérebro por meio do nervo óptico, para que se dê a percepção da imagem. Esses fotorreceptores, porém, só absorvem uma parte do espectro eletromagnético: comprimentos de onda que variam entre, aproximadamente, 380 nm e 780 nm.

Osni de Oliveira/Arquivo da editora



As imagens desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Anatomia resumida do olho humano.

Paulo Manzi/Arquivo da editora



Microfotografia de um microscópio eletrônico de varredura mostrando os cones e os bastonetes da retina em tonalidades diferentes.

Os cones são responsáveis por distinguir as cores primárias (vermelho, verde e azul), e os bastonetes por diferenciar os níveis de intensidade, sem separar comprimentos de ondas; além disso, eles possibilitam a percepção de tons (gradações) de cinza. Um olho humano contém cerca de $1{,}3 \cdot 10^8$ bastonetes e $7 \cdot 10^6$ cones.

O olho é um órgão fotoquímico que age como um transdutor, convertendo energia radiante em sinais elétricos que se deslocam ao longo dos neurônios.

A **rodopsina**, o único tipo de proteína que é receptor primário da luz em todo o reino animal, indica que a visão surgiu muito cedo na história evolutiva. É fácil entender isso, levando-se em conta o enorme valor da visão para a sobrevivência.

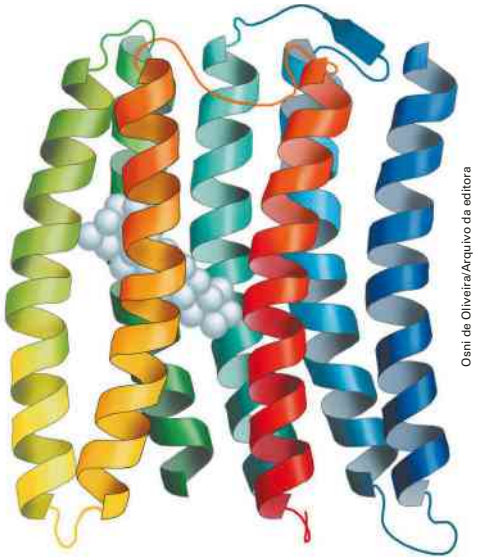
As moléculas de rodopsina estão situadas nas membranas de bastonetes e cones que cobrem a retina.

Uma molécula de rodopsina é constituída por outra proteína, a **opsina**, na qual se fixa uma molécula de 11-cis-retinal. Essa molécula quando livre absorve luz na região do ultravioleta, mas quando fixada na opsina desloca a absorção para a região do visível.

Imediatamente depois da absorção de um fóton, a molécula de 11-cis-retinal sofre fotoisomerização para trans-retinal, em aproximadamente 200 fs (1 fs 5 10^{-15} s). Aproximadamente 67 moléculas de pigmento se isomerizam para cada 100 fótons absorvidos.

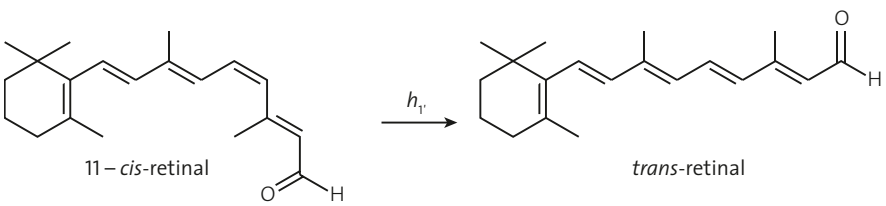
Em uma sucessão de eventos bioquímicos, conhecida como cascata bioquímica, outras proteínas são ativadas e o resultado é uma mudança considerável no potencial transmembrana. O pulso de potencial elétrico se desloca pelo nervo óptico para o córtex óptico, onde é interpretado como um sinal e incorporado na teia de eventos que chamamos de "visão".

Adaptado de: ATKINS, Peter; DE PAULA, Julio. *Físico-química*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. v. 1.



Osni de Oliveira/Arquivo da editora

Representação (sem escala e em cores fantasia) da proteína rodopsina.



A reação básica do processo da visão.

Trabalho com o texto

Veja respostas no Manual do Professor.

1. Como é chamada a faixa do espectro eletromagnético compreendida entre 380 nm e 780 nm?
2. Qual é a função dos cones e dos bastonetes?
3. Qual é a principal proteína responsável pela visão?
4. A exposição a uma iluminação muito intensa causa o fenômeno do ofuscamento. Leva certo tempo para a regeneração da rodopsina e nesse intervalo nossa visão fica prejudicada. Pesquise sobre esse intervalo de "deslumbramento".
5. Voltando à exposição prolongada, se você olhar intensamente durante algum tempo para determinada cor, estará usando o reagente relativo àquela cor e levará um pequeno intervalo de tempo até ele ser regenerado. Nesse intervalo, se você olhar para uma parede branca, a figura aparecerá com as cores complementares, isto é, reagirá só o que falta para compor o branco, pois sua retina usou demais o reagente relativo à cor complementar.
   Experimente olhar para a imagem ao lado, fixando-se no ponto vermelho central e conte até quinze lentamente. Logo em seguida, olhe para uma parede branca. O que você vê?



Banco de imagens/Arquivo da editora

CAPÍTULO 10

Sons, imagens e informação

Veja comentários, orientações e sugestões sobre este capítulo no Manual do Professor.

Monkey Business Images/Shutterstock



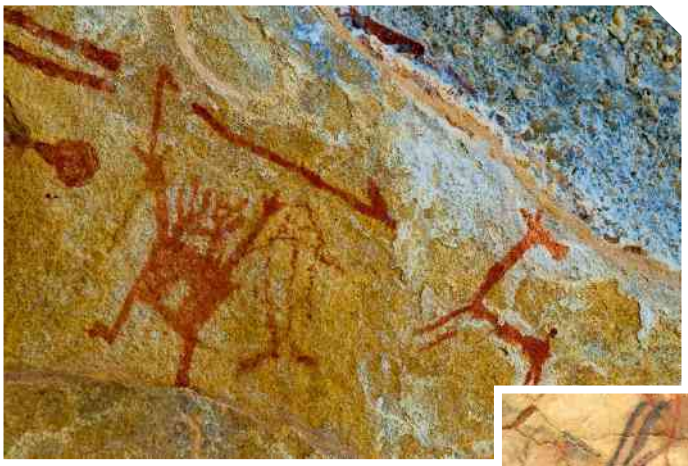
Garotos trocando mensagens por meio de um telefone celular.

Um bilhete, um desenho, um telefonema, um gesto ou mesmo um piscar de olhos são informações que dirigimos a outras pessoas. Muitas vezes, pela importância que atribuímos a uma informação, queremos guardá-la.

Desde quando os seres humanos têm esse desejo de guardar informações?

Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

No Brasil, há vários sítios arqueológicos que abrigam pinturas rupestres, algumas com idade estimada de mais de 12 mil anos. Na caverna de Altamira, na Espanha, as pinturas rupestres, com idade estimada em torno de 15 mil anos, impressionam pelo tamanho. As técnicas do claro-escuro e da policromia conferem a essas pinturas de Altamira uma profundidade que também impressiona. Existem, igualmente, algumas pinturas que chamam a atenção pelo realismo. Mas quais eram as intenções dos povos antigos em gravar imagens nas paredes de cavernas?



PaléZuppani/Pulsar Imagens

Pintura rupestre da Toca do Arapuá do Congo, Parque Nacional da Serra da Capivara, Piauí, PI.



Album/Bildarchiv Steffen/Akg-Images/Latinstock

Bisão na caverna de Altamira, na Espanha.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Para alguns historiadores, as pinturas faziam parte de uma crença destinada a garantir o êxito do caçador. Para outros estudiosos, elas expressavam apenas a vontade de produzir arte. Seja qual for o motivo, essas pinturas, preservadas por milênios, transformaram as grutas pré-históricas nos primeiros museus da humanidade.

As pinturas da Idade Média e do Renascimento também registram fatos, fenômenos e personagens importantes. Os manuscritos em pergaminho até a Idade Média e, depois, os primeiros livros impressos no começo do Renascimento continuaram preservando o acervo do conhecimento acumulado por nossa espécie.

A importância da preservação de informações se revela em todas as áreas da sociedade e também do conhecimento: nas artes, nas ciências e na Filosofia.

Hoje, vivemos a era da informática, na qual a capacidade de armazenamento e de transmissão de informações se torna cada dia maior.

1. Qual era o meio físico utilizado nos registros pré-históricos?
2. Estabeleça uma analogia entre as pinturas rupestres e a memória de um computador.
3. Estabeleça uma analogia entre o significado das pinturas rupestres e um programa de computador.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Registros analógicos

Registro analógico é uma representação de um objeto que procura ser análoga a ele. O bisão da caverna de Altamira é uma representação analógica, assim como a pintura *Mona Lisa* (figura 10.1), de Leonardo da Vinci.

Um inconveniente dos registros analógicos é a vulnerabilidade que eles têm aos "ruídos", sejam sonoros ou gráficos. Basta pensar na famosa pintura *Mona Lisa*. Cientistas que estudaram o quadro dizem que, com o passar do tempo, as cores tornaram-se desbotadas por surgirem pequenas ranhuras na tinta e no verniz ressecado. Resultado: a representação analógica feita originalmente já não é a mesma.

A seguir estudaremos outros exemplos de registros analógicos.



Reprodução/Museu do Louvre, Paris

Figura 10.1 *Mona Lisa*, de Leonardo da Vinci, encontra-se atualmente no Museu do Louvre, em Paris (França).

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Trabalho em equipe

Telefone de lata

Uma brincadeira muito antiga, e muito simples, é a do telefone de lata. Com um amigo, arrume cerca de 10 m de fio de pesca, ou outro fio bem fino e resistente, duas latas de refrigerante vazias e dois palitos de fósforo. Com muito cuidado, façam um pequeno furo no fundo das latas, bem no meio, de modo que seja possível passar um fio por ele. Em cada ponta do fio amarre um palito de fósforo pelo seu ponto médio. Após passar o fio pelo furo, puxe-o de forma que o palito sirva como trava.

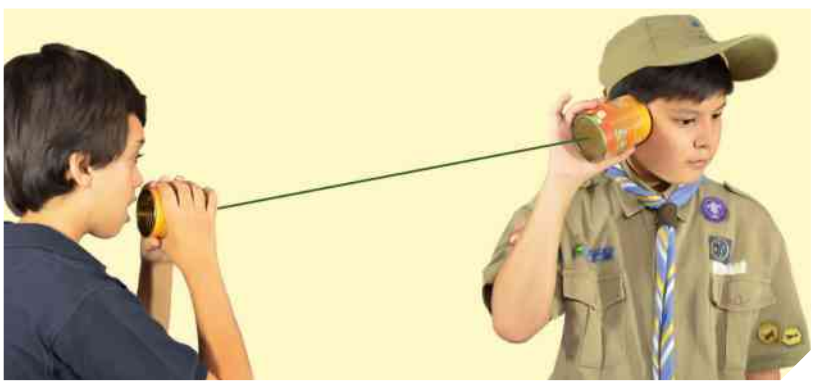


Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Na montagem do telefone de lata, o fio está preso a um palito, para fixação, na parte interna da lata.

Mantendo o fio bem esticado, fiquem a uns 10 m um do outro. Inicialmente, combine que você vai falar, e seu amigo vai ouvir. Fale baixinho na extremidade aberta de uma das latas, enquanto, com a orelha encostada na outra lata, ele ouve o que você diz. Depois será a vez de ele falar e de você ouvir. Pronto: vocês estabeleceram uma **conexão analógica**. A onda sonora é a informação transportada pelo fio.

A vibração sonora de sua voz faz o fundo da lata oscilar. No entanto, esse fundo não responde igualmente a todas as frequências que você emite. Será que a voz que seu amigo ouve do outro lado do telefone de lata é exatamente igual à sua? Justifique sua resposta.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Ao escutar o som transmitido pelo telefone de lata, uma conexão analógica é estabelecida.

Fonógrafo

O estadunidense Thomas Alva Edison (1847-1931) inventou o fonógrafo em 1877 (figura 10.2). O aparelho consistia em um cilindro coberto com uma fina folha de metal. Uma ponta aguda era pressionada contra o cilindro. Conectados à ponta, ficavam uma membrana, onde as vibrações eram convertidas em movimento de vaivém sulcando a folha, e um grande bocal, pelo qual as vibrações sonoras chegavam à membrana. O cilindro era girado manualmente à medida que o operador falava no bocal. A voz fazia o diafragma vibrar. Enquanto isso acontecia, a ponta aguda golpeava a folha de metal, gravando a voz. Quando a gravação se completava, a ponta era substituída por uma agulha; então, quando se girava o cilindro, a máquina reproduzia o som gravado.



Corbis/Latinstock

Figura 10.2 Fonógrafo de Edison, após aperfeiçoamentos, na versão de 1899.

Pelos mesmos motivos apontados no telefone de lata, a reprodução do som no fonógrafo era **análoga** ao som gravado, mas continha ruídos. Além disso, após poucas reproduções, a agulha acabava por deformar a trilha gravada na folha de metal, e a gravação praticamente se perdia. Edison reduziu esse efeito do desgaste usando a primeira gravação como matriz para transpô-la para um material com maior dureza.

Mais tarde, o cilindro deu lugar a um disco, com menor volume e maior facilidade de armazenamento, mas o princípio da gravação e reprodução continuou o mesmo. Na reprodução, a agulha deslizava sobre o disco até chegar próxima ao seu centro, percorrendo uma espiral (figura 10.3).

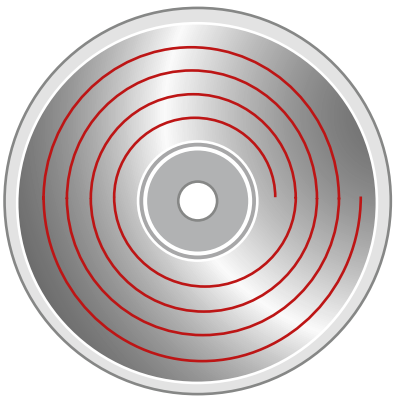
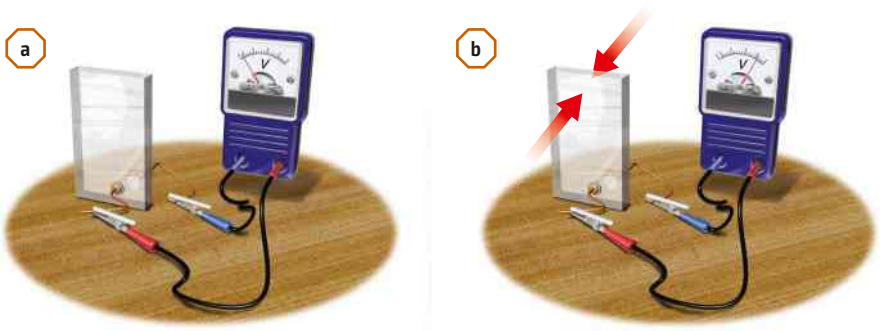

Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 10.3 Representação (sem escala e em cores fantasia) da espiral percorrida pela agulha de um fonógrafo durante a reprodução do som.

O uso de cristais piezelétricos permitiu um grande avanço na gravação e reprodução dos sons. Esses cristais, quando submetidos a uma tensão mecânica (pressão), produzem um efeito elétrico, que aparece como uma pequena tensão elétrica, como ilustra a figura 10.4. Um exemplo é o cristal de quartzo.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 10.4 Esquema de aparelho que utiliza cristal piezelétrico. O cristal não está comprimido, e a tensão entre as faces é nula (**a**). Pressionado, o cristal produz uma tensão elétrica entre as faces (**b**). Representação sem escala e em cores fantasia.

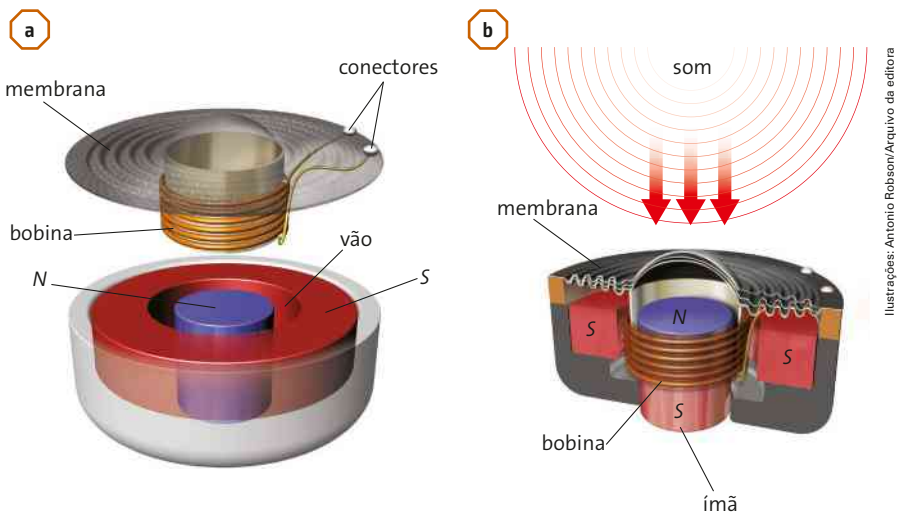
Prendendo-se o cristal à extremidade da agulha, à medida que ela percorria o disco, subindo e descendo, as tensões variavam e eram transmitidas para um circuito amplificador; depois os sinais eram enviados para um alto-falante. Esse processo é usado ainda hoje em pequenos microfones. O usuário, ao falar, faz vibrar uma pequena membrana que empurra o cristal com maior ou menor intensidade, induzindo as tensões, que são amplificadas e, como no caso do fonógrafo, enviadas para os alto-falantes.

O processo evoluiu um pouco mais quando se passou a aproveitar a trilha percorrida pela agulha para registrar, lateralmente, também um sinal de vaivém, além do sobe e desce, obtendo-se dois canais de som. Estava criado o som estereofônico. Por exemplo, gravava-se a orquestra em um canal e a voz do cantor em outro. Ao reproduzir essa gravação com dois alto-falantes bem separados, o ouvinte percebia os sons provindos de pontos diferentes, o que dava a sensação espacial.

Graças à sensibilidade dos cristais piezelétricos e à produção de resinas resistentes, os discos de vinil foram o principal modo de reprodução musical até o final da década de 1980. No entanto, apesar de ser pequena a ação de desgaste da agulha sobre a trilha, permaneceu o inconveniente de, após muitas reproduções, o som começar a ficar distorcido. Além disso, um risco acidental no disco podia comprometer toda a reprodução. Mesmo assim, os discos de vinil contam com muitos fãs até hoje.

Microfone

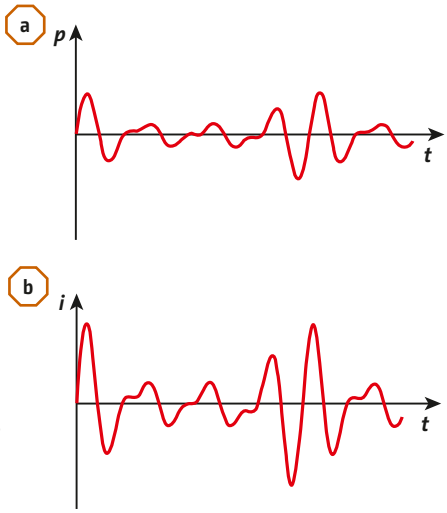
A transformação de um sinal sonoro em corrente elétrica é um processo muito utilizado para gravação e transmissão do som. Para compreender melhor o funcionamento do microfone eletromagnético observe a **figura 10.5**.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 10.5 Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) de microfone eletromagnético. Visão expandida (**a**). Corte lateral do dispositivo (**b**).

Diagramas de pressão e de corrente elétrica



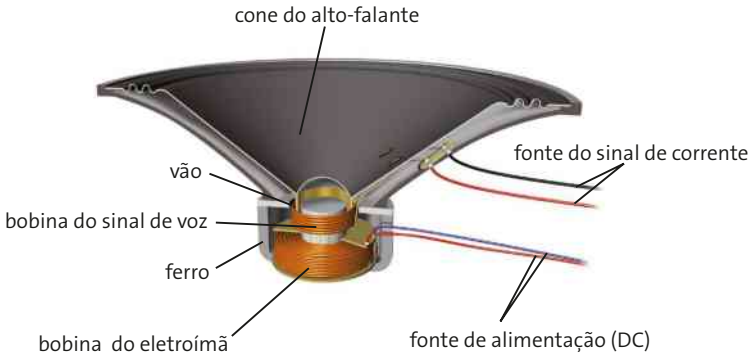
Banco de imagens/Arquivo da editora

A onda sonora pressiona de maneira variável a membrana que, por estar acoplada a uma bobina, faz esta última se mover em relação ao ímã, induzindo uma tensão entre os conectores (terminais) (**figura 10.6.a**). O pequeno vão entre a bobina e o ímã garante a liberdade do movimento. Dessa forma, o movimento da membrana provocado pelas ondas sonoras é transformado em variações de tensão nos terminais da bobina. Se os terminais forem ligados a um circuito, teremos, neste, uma corrente elétrica variável, que poderá ser amplificada e enviada para alto-falantes (**figura 10.6.b**). De forma simplificada, esse é o esquema de funcionamento de muitos sistemas de amplificação de som e dos telefones elétricos com fio.

Figura 10.6 Diagrama da pressão efetiva (acima ou abaixo da pressão ambiente) exercida na membrana pela onda sonora ao longo do tempo (**a**).
Corrente elétrica obtida nos terminais do microfone e amplificada (**b**).

Alto-falante

No alto-falante acontece o processo inverso do que ocorre no microfone. A corrente elétrica variável que chega à bobina receptora, envolta por um ímã permanente, provoca a vibração do cone (membrana), com a consequente produção de som. Eventualmente, o ímã permanente pode ser substituído por um eletroímã, alimentado por uma fonte DC, conforme ilustra a figura 10.7.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 10.7 Esquema lateral de um tipo de alto-falante eletromagnético. Representação sem escala e em cores fantasia.

O antigo telefone

A existência dos microfones e dos alto-falantes eletromagnéticos propiciou a invenção do telefone. O sinal recebido pelo microfone era transformado em sinal elétrico, amplificado e transmitido. Em cada aparelho são necessários dois fios: um para transmissão e outro para recepção.

No início da implantação do sistema telefônico não havia um disco com números no aparelho. O usuário ligava para uma central e dizia com quem gostaria de falar. Depois, a telefonista da central conectava o usuário com o telefone da pessoa chamada. Com os avanços tecnológicos, a ação da telefonista foi substituída por dispositivos eletromecânicos (hoje eletrônicos) que funcionavam de acordo com o número discado pelo usuário.

Muitos foram os cientistas que colaboraram na invenção do telefone, mas durante muito tempo ela foi atribuída ao escocês Alexander Graham Bell (1847-1922), que patenteou o invento em 1876. Em 2002, porém, o congresso norte-americano reconheceu oficialmente o italiano Antonio Santi Giuseppe Meucci (1808-1889) como o real inventor, em razão dos experimentos que fez em Havana, em 1849.

Gravação magnética do som

Já vimos como funciona o cristal piezelétrico. Aproveitando a tensão do cristal piezelétrico, amplificada, para alimentar uma bobina, pode-se obter um eletroímã com magnetização variável. Essa magnetização pode ser transferida para uma fita banhada com material ferromagnético (dióxido de cromo) e fazer-se então uma gravação do som. O uso de duas trilhas na fita provê o som estéreo. Na reprodução ocorre o fenômeno inverso da gravação: a passagem da fita com magnetização variável por uma bobina receptora – chamada cabeça de leitura – induz tensões variáveis, que são amplificadas e enviadas aos alto-falantes. Em 1963, uma empresa holandesa lançou uma versão miniaturizada desse tipo de sistema, criando então o minicassete (figura 10.8), aparelho que passou a ser amplamente utilizado.

O aparelho possibilitava ao usuário gravar o conteúdo dos discos de vinil em uma pequena fita, para ouvi-lo depois em um aparelho portátil de reprodução.

A produção dos discos de vinil necessitava de um sofisticado aparato industrial, mas as fitas cassete podiam ser copiadas em equipamentos caseiros. Com isso, as empresas do mercado fonográfico passaram a enfrentar um problema: as cópias ilegais.



Fotos: Prapass/Shutterstock/Glow Images

Figura 10.8 Fita minicassete.

Gravação de imagens

Para projetar uma imagem sobre uma película utiliza-se o esquema da câmara escura, como vimos em Óptica. Mas, em vez de um pequeno orifício, coloca-se uma lente, com a intenção de captar mais luz e dar mais nitidez à imagem que será projetada sobre a película receptora (**figura 10.9**).



Antonio Robson/Arquivo da editora

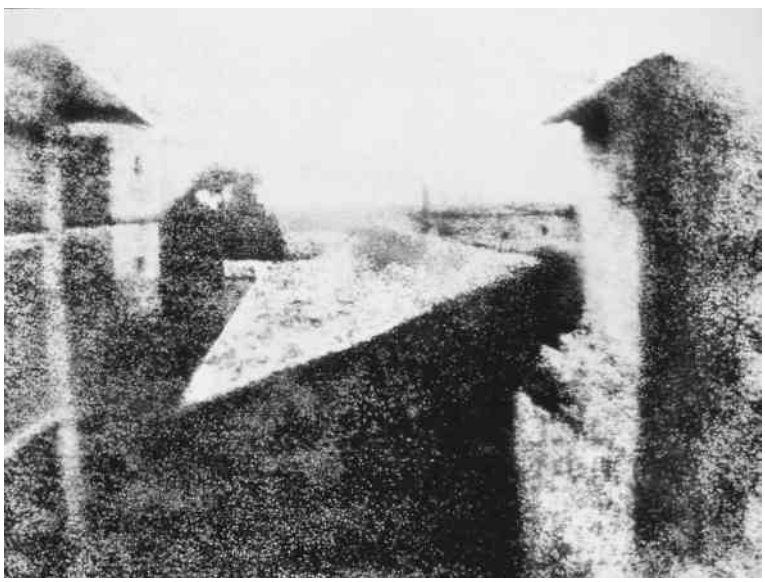
Figura 10.9 Esquema simplificado da formação da imagem em uma máquina fotográfica. Representação sem escala e em cores fantasia.

A gravação da imagem pelas primeiras máquinas fotográficas baseava-se nas propriedades dos sais de prata. Quando expostos à luz, os sais de prata, como o brometo de prata, por exemplo, têm a propriedade de reagir quimicamente e escurecer.

Nesse processo de gravação em uma câmara escura, a película é recoberta com uma solução de sal de prata e depois exposta a quantidades diferentes de iluminação em pontos diversos. Desse modo, as regiões que receberem mais luz ficarão mais escuras e as que receberem menos luz, mais claras.

Em seguida, antes de expor a película à luz ambiente, é preciso fixar a imagem obtida, ou seja, estancar a reação dos sais de prata. De outra forma, a película acabaria ficando escura por inteiro. Ao final dessa etapa, obtém-se uma fotografia ao contrário – o negativo –, pois as regiões mais escuras correspondem aos locais mais iluminados.

Faz-se então o negativo do negativo, isto é, põe-se a película obtida sobre outra e sob luz intensa. Nos locais em que a primeira película está mais escura, passa menos luz; onde ela está mais clara, passa mais luz. Após essa etapa, a imagem obtida também precisa ser fixada.



Reprodução/Coleção Gernsheim, Austin

Essa imagem é um registro analógico, em claros e escuros, da região fotografada. Geralmente é em preto e branco, mas pode ser em diferentes tons de amarelo, do mais claro para o mais escuro, como mostra a **figura 10.10**.

Os filmes coloridos funcionam de maneira semelhante, mas possuem sais com sensibilidades diversas para diferentes cores (regiões do espectro visível).

Figura 10.10 A primeira fotografia conhecida foi obtida em 1825 pelo inventor francês Joseph Nicéphore Niépce (1765-1833).

Cinema

Se você estiver olhando um quadro e rapidamente fechar os olhos, a percepção da imagem permanecerá em sua mente ainda por uma pequena fração de segundo. Se ao abrir os olhos, uma fração de segundo depois, você estiver diante de outro quadro, praticamente igual, mas com alguns objetos ligeiramente deslocados, sua mente terá a sensação de que eles se moveram. Até o começo do século XX esse fenômeno era conhecido como persistência retiniana (por simplicidade e brevidade, aqui vamos chamá-lo de **movimento aparente**).

Em 1912 o psicólogo tcheco Max Wertheimer (1880-1943) publicou um artigo, "Experimental Studies on the Seeing of Motion" [Estudos experimentais sobre a percepção visual do movimento], a respeito dos resultados de uma série de estudos, tentando demonstrar, basicamente, que a interpolação de estágios intermediários entre uma imagem e outra era feita pelo cérebro, e não era resultado da persistência da retina. Ao longo do século XX, o tema foi amplamente reestudado. Joseph e Barbara Anderson, no clássico artigo "The Myth of Persistence of Vision Revisited" [O mito da persistência da visão revisitado], publicado em 1993 no *Journal of Film and Video* (Spring, v. 45, n. 1, p. 3-12), aprofundaram os estudos de Wertheimer e os deles próprios, expostos em um artigo anterior. O casal Anderson justificou a necessidade de reestudar o fenômeno, enfatizando que ainda permanecia a ilusão de que o movimento era decorrente do fenômeno da persistência.

O cinema é uma invenção totalmente multidisciplinar. Os conhecimentos adquiridos na Neurobiologia (persistência retiniana), na Química (reações dos sais de prata) e na Física (sistemas ópticos), além do interesse da sociedade em desfrutar desse tipo de apresentação, contribuíram para sua criação.

Ao longo do século XIX surgiram vários aparatos que utilizavam imagens que davam ao espectador a sensação de vê-las em movimento. Um deles, por exemplo, era o chamado fenacistoscópio (que significa 'espectador ilusório' em grego), inventado em 1829 pelo físico belga Joseph-Antoine Ferdinand Plateau (1801-1833).

Para expor o espectador a uma sequência de imagens, com diferenças mínimas de posição, Plateau propôs colocá-las em um disco com pequenas ranhuras, o qual, segurado por um eixo em seu centro, deveria ser girado diante de um espelho. A **figura 10.11** ilustra um disco desse aparato, utilizado no fim do século XIX.



Historic Collection/Alamy/Latinstock

Figura 10.11 Disco de fenacistoscópio por Eadweard Muybridge (1893). Ao usá-lo, o espectador teria a percepção de um casal dançando.

Antonio Robson/Arquivo da editora

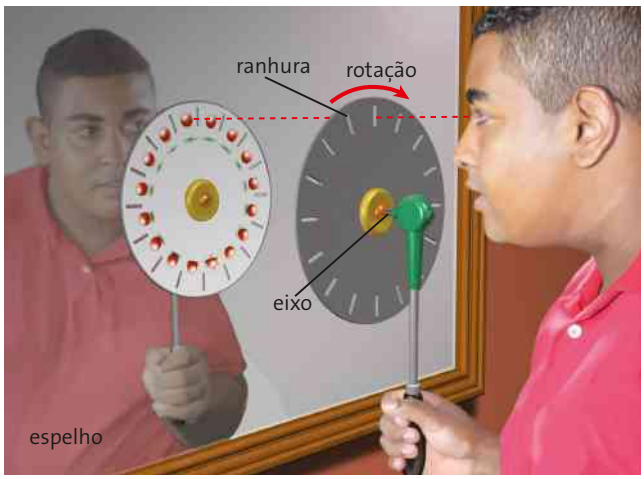


Figura 10.12 Representação (sem escala e em cores fantasia) de um observador tendo a percepção de movimento ao girar o disco de Plateau. A parte do disco em que estão as imagens está voltada para o espelho.

Flas100/Shutterstock



Figura 10.13 Sequência de fotogramas em um filme.

O espectador deveria observar as imagens no espelho, fixando um dos olhos na posição em que passavam as ranhuras, conforme ilustra a **figura 10.12**. Com a invenção da fotografia, em vez de desenhos sucessivos passou-se a colocar fotogramas sucessivos semitransparentes, ordenados ao longo de uma fita enrolada (**figura 10.13**).

Esses fotogramas sucessivos eram iluminados por trás e projetados em uma tela. Inicialmente, dispunha-se apenas de imagens em preto e branco, e a projeção era acompanhada por um pianista ou uma orquestra. Mais tarde, o som foi incorporado à própria fita. Com o desenvolvimento da fotografia colorida, as cores chegaram ao cinema na década de 1930.

O número de fotogramas por segundo é um elemento importante para que a percepção de movimento não seja prejudicada. Nos primeiros filmes, em decorrência de limitações da tecnologia da época, usavam-se 16 fotogramas por segundo. Como eles eram projetados a essa mesma velocidade, a sensação de movimento não tinha fluidez, e os personagens pareciam se mover em pequenos trancos quando os movimentos eram rápidos. Charles Chaplin (1889-1977), diretor inglês, ainda no cinema mudo, explorava artisticamente essa limitação, filmando com 16 quadros por segundo, mas projetando com 24. Com esse recurso, as cenas tornavam-se particularmente engraçadas pela rapidez de alguns eventos, como a troca de roupas, por exemplo.

Quantos quadros por segundo são necessários para produzir a sensação de perfeita fluidez na projeção de um filme? Depende do que se filma. Se a cena focaliza uma parede estática, um quadro por segundo basta, mas se focaliza uma corrida de cavalos, necessita-se de muito mais.

Hoje em dia, há vários padrões, desde 24 quadros por segundo até 60. Gravações acima deste último valor parecem ser um desperdício, pois estão além da capacidade da percepção humana, a não ser que sejam projetadas em "câmera lenta".

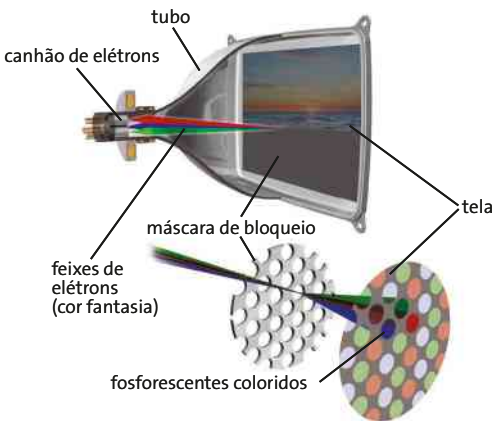
Televisão

Nas primeiras fotografias, a gravação da imagem era feita com o uso de substâncias químicas fotossensíveis, ou seja, baseava-se em reações fotoquímicas. Esse processo, com muitos aperfeiçoamentos, manteve-se por todo o século XX, e ainda hoje há câmeras desse tipo em funcionamento.

TV em cores

É possível obter todas as cores a partir da composição das três cores primárias: vermelho, verde e azul. Esse é o princípio de funcionamento da TV em cores. No caso da TV com tubos de raios catódicos, utilizam-se três "canhões" de elétrons independentes para compor cada *pixel*. Isso quer dizer que cada *pixel* é formado por três pequenos círculos, nas cores vermelho (***red***), verde (***g**reen*) e azul (***b**lue*) – o padrão RGB. Cada pequeno círculo é constituído por uma substância fosforescente diferente, conforme a cor.

Os elétrons acelerados provenientes do canhão verde não podem atingir as regiões do vermelho e do azul e, analogamente, os feixes destinados ao vermelho e ao azul não podem atingir as regiões das outras cores. Para conseguir essa condição, antes da tela fluorescente com os pontos regularmente distribuídos das cores, coloca-se uma máscara com várias microperfurações adequadas, de forma que os feixes relativos a cada cor só possam atingir os seus respectivos pontos, como ilustra a **figura 10.14**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 10.14 Representação (sem escala e em cores fantasia) de TV com tubo de raios catódicos no padrão RGB.

No início da implantação da TV em cores surgiu um problema: grande parte dos consumidores possuía TVs em preto e branco. As novas TVs em cores seriam muito mais caras, e o sinal transmitido para elas não seria captado pelas TVs em preto e branco. A solução adotada foi adicionar à transmissão da TV em cores um quarto canhão: o canhão da TV em preto e branco. Dessa forma, a imagem em preto branco era pintada pelos sinais coloridos, se a TV dispusesse desses canhões; caso contrário, o espectador assistiria à programação em preto e branco normalmente (**figura 10.15**).



Reprodução/TvHistory.TV/Arquivo da editora

Figura 10.15 Folheto promocional de um fabricante de TV em cores estadunidense, de 1955, mostrando a composição da imagem.

a



MishAl/Shutterstock/Glow Images

b



Pakhnyushcha/Shutterstock/Glow Images

Figura 10.16 Televisores de plasma (**a**) e de LCD (**b**).

TVs de plasma e de LCD

Entre outras vantagens, as TVs de plasma e de LCD (tela de cristal líquido) (**figura 10.16**) são bem finas e mais leves que as TVs de tubo, a ponto de poderem ser dependuradas na parede. Além disso, consomem menos energia. A desvantagem, por enquanto, é o preço. Mas o aumento na demanda e na escala de produção vem reduzindo esse custo drasticamente nos últimos anos.

Tanto na TV de plasma quanto na de LCD, o sinal elétrico recebido determina a composição das linhas e das colunas, como ocorre na TV de tubo; mas como isso não é feito por um feixe de elétrons, cada *frame* pode ser apresentado por inteiro a cada exposição. A imagem exibida por esses aparelhos é digital, mas o sinal recebido pode ser analógico, já que essas TVs possuem um conversor que transforma os sinais analógicos em digitais antes de comandar a construção dos *frames*.

Tela de cristal líquido (LCD)

Muitas substâncias puras, na fase sólida, apresentam longas cadeias de moléculas, ou íons, arranjadas em uma rede cristalina, interligadas. Por outro lado, algumas substâncias são formadas por moléculas muito longas, quase como um cristal, mas não interligadas. A fina película de sabão que sobra em uma saboneteira é um exemplo de substância desse tipo – o chamado cristal líquido –, um composto orgânico.

O que faz o cristal líquido diferente dos líquidos comuns é a forma alongada e extensa de suas moléculas, que tendem a ficar alinhadas, como mostra a **figura 10.17**.

Em seu estado natural, as moléculas do cristal líquido produzem arranjos em forma de hélices. Por exemplo, depois de atravessar um cristal líquido, uma luz polarizada horizontalmente tem seu plano de polarização alterado para vertical, conforme ilustra a **figura 10.18**.

Se não houvesse o cristal líquido entre as lâminas de vidro e as películas polarizadoras, praticamente nenhuma luz emergiria da segunda placa, pelo fato de os planos de polarização serem cruzados, ou seja, a lâmina polarizadora de saída funcionaria como um **analisador** da polarização. Quanto mais próximo do plano vertical estiver o plano da polarização, maior será a intensidade da luz que emerge.

As moléculas do cristal líquido são polares. Sob a ação de um campo elétrico, elas tendem a se alinhar com as linhas de campo, deixando de agir sobre o plano de polarização da luz.

Veja comentários no Manual do Professor.

Para refletir

Pesquise sobre as diferenças entre as tecnologias comentadas e as de LED e OLED.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 10.17 Representação (sem escala e em cores fantasia) de um grupo de moléculas de um cristal líquido.

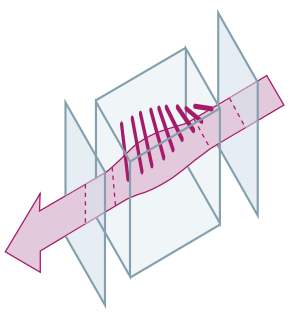


Figura 10.18 Representação (sem escala e em cores fantasia) da alteração no plano de polarização da luz ao atravessar um cristal líquido. A placa de entrada da luz é uma lâmina de vidro polarizador horizontal, e a de saída, vertical.

Na figura 10.19 está representado um pequeno trecho da fatia de uma tela de cristal líquido. Na região entre os retângulos verdes, a ação do campo elétrico horizontal fez as moléculas se alinharem nessa direção. Nas outras regiões, elas são vistas como se tivessem tamanhos diferentes em virtude das diversas inclinações que têm em relação à nossa linha de observação.

Se a luz incidisse nessa fatia da tela, e os dois polarizadores estivessem cruzados na região em que age o campo elétrico, a luz não emergiria na outra face, isto é, seria uma região escura do visor.

Nos visores das calculadoras eletrônicas pequenas, atrás do segundo polarizador há uma camada refletiva, e aproveita-se a própria luz ambiente como fonte de iluminação. Nas regiões em que o campo elétrico está ativo, a luz não atinge a camada refletiva. Por isso, essas regiões ficam escuras. Combinando diferentes regiões, podemos formar os numerais, conforme ilustra a figura 10.20.

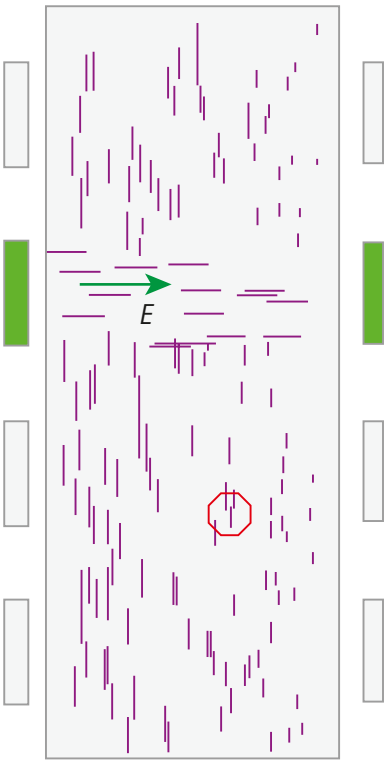


Figura 10.19 Representação da ação do campo elétrico alinhando as moléculas do cristal líquido.

Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

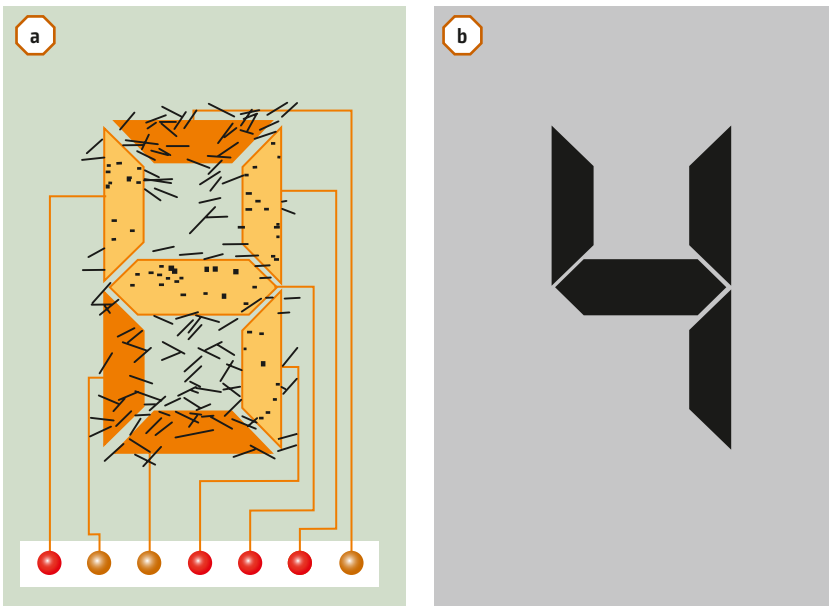


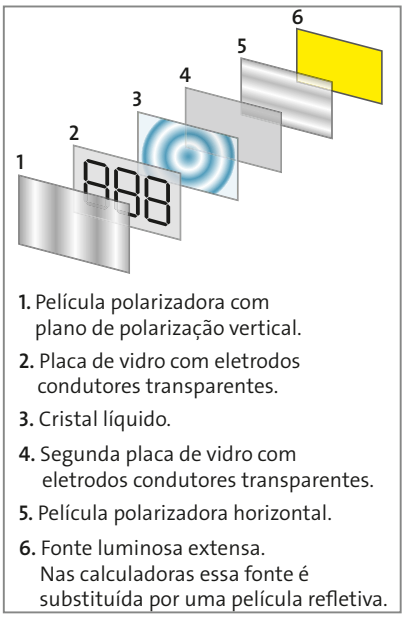
Figura 10.20 Representação do que ocorre internamente no visor de uma calculadora (**a**). Quando ligado, o campo é perpendicular à folha. O que aparece no visor (**b**).

As imagens desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

No visor da calculadora só temos duas possibilidades – claro e escuro –, mas combinando diferentes intensidades do campo elétrico, em diferentes regiões (figura 10.21), podemos obter uma grande variedade de intensidades luminosas, ou seja, vários tons de cinza. Assim eram os primeiros monitores de cristal líquido, usados em computadores portáteis.

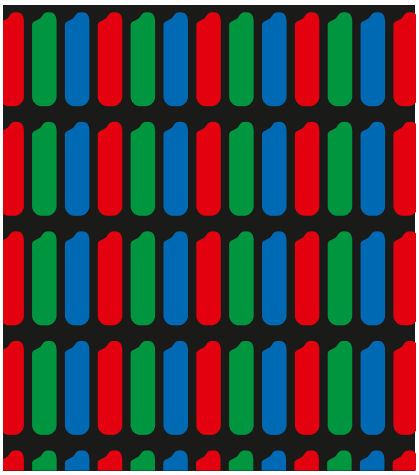
Com a miniaturização eletrônica, foi possível ter em cada pequena região da tela (*pixel*) as três cores primárias (RGB), lado a lado, em três *subpixels*. Com diferentes combinações da participação de cada uma dessas cores primárias, obtêm-se todas as outras, assim como no visor da TV em cores de raios catódicos.

A TV de cristal líquido tem atrás da tela a fonte luminosa necessária para atravessar os cristais, mas antes disso a luz branca passa por filtros com máscaras para a separação adequada em *subpixels* de RGB.



1. Película polarizadora com plano de polarização vertical.
2. Placa de vidro com eletrodos condutores transparentes.
3. Cristal líquido.
4. Segunda placa de vidro com eletrodos condutores transparentes.
5. Película polarizadora horizontal.
6. Fonte luminosa extensa. Nas calculadoras essa fonte é substituída por uma película refletiva.

Figura 10.21 Representação das várias camadas de um dispositivo de cristal líquido.



Formato/Arquivo da editora

Figura 10.22 Ampliação de uma pequena região da imagem (1 mm × 1 mm). Observe os *subpixels* nas cores primárias (RGB).

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

TV de plasma

O processo de composição da imagem na TV de plasma é bastante semelhante ao da TV de LCD; a diferença é que os *subpixels* são células que correspondem a microscópicas lâmpadas fluorescentes.

Cada célula é revestida em sua base interna por uma substância fosforescente adequada para emitir cada uma das cores primárias (RGB) ao receber a radiação do gás, constituindo-se em um *subpixel*. Cada três células perfazem um *pixel*.

As células são arranjadas em uma matriz, cuja quantidade de elementos depende da resolução da TV. Por exemplo, em uma TV com resolução *full-HD*, a matriz contém 6 220 800 células (1 920 colunas × 1 080 linhas × 3 células por *pixel*).

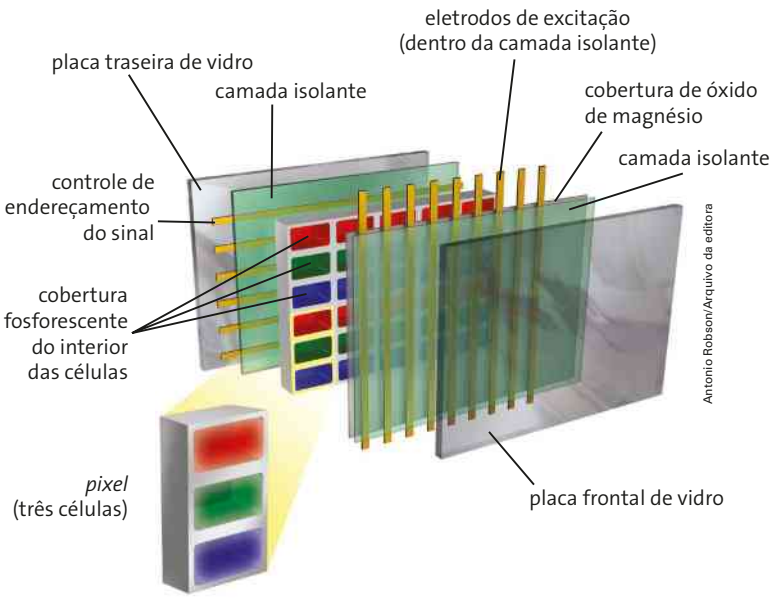
Variando a intensidade do campo elétrico aplicado, controla-se a intensidade luminosa de cada célula. Portanto, a cada *frame* corresponde uma matriz com três vezes o número de linhas vezes o número de colunas da resolução (**figura 10.22**). Os valores de cada elemento variam de acordo com a intensidade que ele tem na respectiva imagem, determinando a composição RGB de cada *pixel*. Isso é feito por um processo chamado de controle de endereçamento (**figura 10.23**), ou seja, para cada endereço (número da linha, número da coluna e *subpixel*) há um valor de intensidade que será enviado. O mesmo processo ocorre também na TV de LCD (**figura 10.24**).



Alex Segre/Alamy/Other Images



Shizuo Kambayashi/Associated Press/Glow Images



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 10.23 Esquema mostrando 10 *pixels* (30 células) de uma tela de TV de plasma.

Figura 10.24 Uma típica TV de plasma (**a**). TV de LCD com 1 cm de espessura (**b**). Observe a qualidade da imagem. Graças a sua espessura reduzida, esses aparelhos podem ser dependurados na parede, praticamente como um quadro.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

1. Um estudante resolve fazer um telefone de lata com quatro latas e dois fios. Duas latas interligadas são azuis e as outras duas, vermelhas. Cada usuário fica com uma lata para falar e outra para ouvir. Se um usuário usa a lata azul para falar, qual lata o outro deve colocar próxima à orelha para ouvir? A lata azul.

Antonio Robson/ Arquivo da editora



Representação de um menino comunicando-se com telefone de lata.

2. O cristal de quartzo, além de ser piezelétrico, tem a propriedade de vibrar em intervalos extremamente regulares; por isso, é um elemento fundamental nos relógios modernos. Considerando o efeito piezelétrico, como podem ser captadas as vibrações desse cristal para, depois de amplificadas, ser transmitidas ao mecanismo do relógio?

As vibrações acarretam variações de eletrização que podem ser o sinal a ser captado por circuito elétrico e amplificado.

Fabio Colombini/Acervo do fotógrafo



Cristal de quartzo. Além de piezelétrico, vibra em intervalos regulares.

3. Alto-falantes com cones muito grandes respondem melhor aos sons mais graves, pois estes têm maior comprimento de onda. Como devem ser as dimensões de alto-falantes que apresentem melhor resposta para os sons agudos? Os alto-falantes devem ter cones pequenos.

4. Em telecomunicações há duas designações importantes a respeito dos sinais: a fidelidade e a inteligibilidade. Os telefones comuns são praticamente insensíveis a frequências superiores a 3 kHz, mas conseguimos conversar muito bem com eles.

a) Como seria a fidelidade de transmissão de sinal (boa ou ruim) se você estivesse tentando fazer um amigo ouvir, pelo telefone, determinada música orquestral que estaria tocando em seu aparelho de som? Ruim.

b) Você classificaria em boa ou ruim a inteligibilidade da informação trocada, por telefone, entre você e seu amigo para definir um ponto de encontro para irem ao cinema? Boa.

5. As faixas de frequência de ondas eletromagnéticas para transmissão de sinais são regulamentadas e controladas por órgãos governamentais, como a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), entre outros. Por exemplo, há faixas exclusivas para comunicação entre os aviões e os aeroportos, faixas para comunicação por rádio entre autoridades policiais, e assim por diante. Hoje em dia, com os conhecimentos sobre radiodifusão existentes, é relativamente simples criar uma emissora de rádio clandestina. Quais os riscos que isso acarreta?

O risco é o de esses sinais interferirem em comunicações importantes, às vezes, imprescindíveis, como o exemplo do avião se comunicando com o aeroporto.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

2 Registros digitais

Atualmente, dizer que um determinado equipamento é digital tornou-se praticamente um indício de que ele é de melhor qualidade, mas isso nem sempre é verdadeiro.

Por exemplo, as primeiras máquinas fotográficas digitais produziam imagens de qualidade muito inferior às tradicionais que trabalhavam com filmes de sais de prata.

Na verdade, demorou algum tempo para que as máquinas fotográficas digitais atingissem qualidade suficiente para entrar no mundo da fotografia profissional.

Um grande trunfo dos registros digitais é que eles são praticamente imunes a ruídos estranhos à informação que se queira registrar, enviar ou reproduzir.

Essa informação pode ser um número, uma música, um desenho, uma foto, um livro ou mesmo um filme inteiro.

Na teoria da informação, adota-se como unidade o ***bit***. O *bit* é um ponto de decisão.

Para cada *bit* só há dois estados possíveis, que podem ser, conforme a informação analisada, 0 ou 1, verdadeiro ou falso, ligado ou desligado, preto ou branco, dia ou noite, e assim por diante.

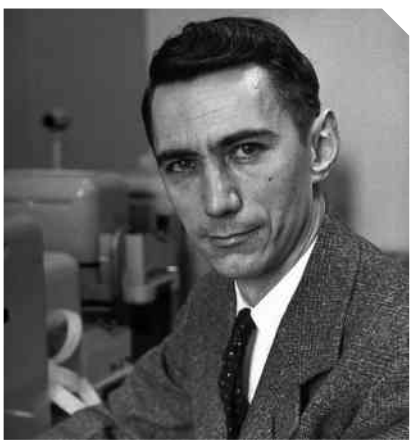
Além da sequência de *bits* que corresponde a uma informação, é necessário também um **código**.

O código dirá como aquela sequência de *bits* será usada para recuperar a informação original, seja ela qual for.

Trabalho em equipe

Durante a década de 1940, o engenheiro estadunidense Claude Elwood Shannon concebeu a chamada teoria da informação, que pode ser resumida pela frase: "Informação é a resolução da incerteza".

Faça uma pesquisa, em equipe e sob orientação do professor, sobre a vida de Claude Elwood Shannon e sobre o conceito de medida de informação. Em seguida, responda às questões:



Alfred Eisenstaedt/Pix Inc./Time & Life Pictures/Getty Images

Retrato de Claude Elwood Shannon. (1916-2001).

1. Qual foi a participação de Claude Elwood Shannon durante a Segunda Guerra Mundial?
2. Proponha um exemplo que mostre que o conhecimento de fatos pouco provavéis contém grande quantidade de informação.

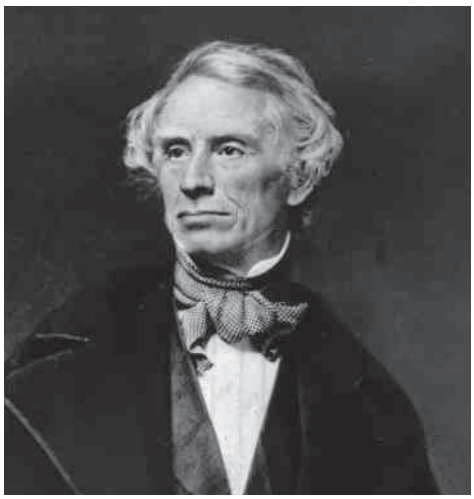
Telégrafo

Cronologicamente falando, o telégrafo elétrico apareceu bem antes do rádio e do telefone. Então, por que só agora vamos falar do telégrafo? A razão é surpreendentemente simples: a transmissão telegráfica era totalmente **digital**.

Em 1831, o físico alemão Carl Friedrich Gauss (1777-1855) desenvolveu um aparato para transmitir sinais elétricos, por fio, a 1 km de distância. Ele também desenvolveu seu próprio alfabeto, que era baseado em 4 níveis de sinal, ou seja, não era binário.

Muitos cientistas e inventores contribuíram para a criação do telégrafo, entre eles o norte-americano Samuel F. B. Morse (figura 10.25).

Inicialmente, os sinais elétricos eram transmitidos por fio, mas não demorou muito para que essa transmissão se fizesse por ondas eletromagnéticas.



Coleção particular/foto: Encyclopaedia Britannica/UIG/Getty Images

Figura 10.25 Retrato de Samuel F. B. Morse (1791-1872).

Sinais sonoros transmitidos eletricamente ficam sujeitos a ruídos das flutuações elétricas ambientes, chiados que os radioamadores chamam de "estática". Normalmente, são flutuações eletromagnéticas em nossa atmosfera, fortemente afetadas pelas oscilações das "tempestades solares". Os sinais emitidos pelo telégrafo, por serem muito fortes, longos e curtos, ficam praticamente imunes a essa interferência. Esse é um grande mérito desse aparato.

Em 1835, Morse desenvolveu um código para emissão e recepção dos sinais: o **código Morse**. Nele, as transmissões são feitas com sinais longos (traço) e curtos (ponto), sendo, portanto, um código binário. A tabela 10.1 mostra parte da correspondência do código adotada internacionalmente.

Tanto o transmissor quanto o receptor devem conhecer a tabela de correspondência do código, assim como a cadência. (figura 10.26)

O tempo do sinal curto é a cadência da transmissão. Chamando de ***u*** o tempo de um sinal curto (ponto), o tempo de um sinal longo (traço) é 3 *u*. O intervalo entre dois sinais referentes à mesma letra é ***u***. O intervalo entre duas letras de uma mesma palavra é 3 *u* e o intervalo entre duas palavras é 7 *u*.

Essa página de código criada por Morse pode ser usada com uma fonte luminosa que liga e desliga, com tempos de emissão diferentes (longos e curtos), permitindo a comunicação entre dois navios em alto-mar em uma noite escura, por exemplo.

Tabela 10.1 Correspondência do código Morse com as letras, números e mais alguns símbolos da escrita.

A	.–	M	––	Y	–.––	6	–....
B	–...	N	–.	Z	––..	7	––...
C	–.–.	O	–––	Ä	.–.–	8	–––..
D	–..	P	.––.	Ö	–––.	9	––––.
E	.	Q	––.–	Ü	..––	.	.–.–.–
F	..–.	R	.–.	Ch	––––	,	––..––
G	––.	S	...	0	–––––	?	..––..
H	....	T	–	1	.––––	!	..––.
I	..	U	..–	2	..–––	:	–––...
J	.–––	V	...–	3	...––	“	.–..–.
K	–.–	W	.––	4	....–	‘	.––––.
L	.–..	X	–..–	5	.....	=	–...–



Coleção particular/foto: Universal History Archive/UIG/The Bridgeman Art Library/Keystone

Figura 10.26 Marinheiros durante transmissão em código Morse. Imagem de cerca de 1942.

João Prudente/Pulsar Imagens



Figura 10.27 Torres de telefonia móvel. Campinas (SP), 2015.

Telefone celular

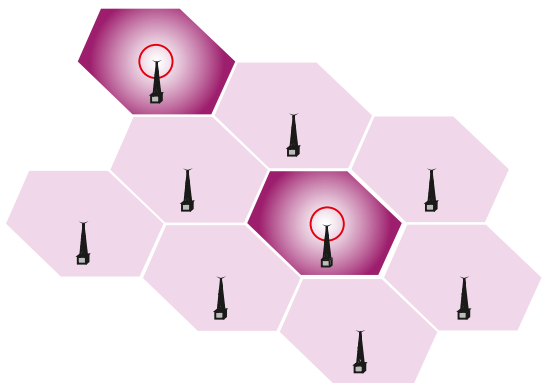
Um estudante está pesquisando as frequências de emissoras de FM e descobre que sua emissora preferida, em sua cidade, emite na mesma frequência que uma emissora de Berlim. Ele então faz a seguinte pergunta: se eu sintonizar o rádio nessa frequência, qual emissora vou ouvir? Depende de onde ele estiver. Se estiver em Berlim, ouvirá a emissora de lá; se estiver em sua cidade, ouvirá sua emissora preferida.

O alcance das ondas eletromagnéticas é limitado. A telefonia celular, no entanto, transforma essa limitação em um trunfo que lhe possibilita usar uma estrita faixa de frequências para milhares de comunicações simultâneas. Cada aparelho de telefone celular possui um número, além do código da área à qual ele pertence.

Suponhamos um aparelho de telefone celular que esteja em sua própria área. Espalhadas por essa área, há uma grande quantidade de torres de transmissão-recepção de alcance limitado. A torre mais próxima detecta e registra a presença desse aparelho. Se alguém fizer uma ligação para ele, o sistema vai procurar, dentre todas as torres que tem, em qual delas ele está registrado. Então, o sinal é direcionado para essa torre e se estabelece a comunicação, por um dos canais de que ela dispõe. A faixa de frequências de transmissão é próxima de 1 GHz.

Como a frequência de transmissão é muito alta, pode ser dividida em várias faixas, cada uma constituindo um canal aberto para conversação. Cerca de 400 canais são disponíveis por torre.

As torres "conversam" entre si em outra faixa de frequência (figura 10.28), muito mais alta, a qual permite a transmissão de grandes quantidades de informação.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 10.28 Várias células contíguas cobertas por torres de transmissão. Em razão do alcance relativamente curto, as duas células mais escuras podem estar trabalhando na mesma frequência. Representação sem escala e em cores fantasia.

Se não houver nenhuma torre próxima do aparelho, ele indicará a falta de sinal. Se mais de 400 usuários tentarem usar a mesma torre simultaneamente, como acontece em *shows* e jogos de futebol, ocasiões em que há grande concentração de pessoas, o aparelho entrará em uma fila de espera ou receberá a mensagem de comunicação indisponível. Normalmente, nesses locais, as operadoras tratam de ampliar o número de canais.

A quantidade de torres de que cada operadora dispõe ao longo das regiões é a chamada "capacidade de cobertura". Algumas operadoras têm boa cobertura em determinadas regiões, mas podem ter cobertura fraca em outras. Cobertura, preço das ligações e qualidade são fatores que o consumidor deve pesar na hora da compra de uma "linha" de celular.

Bytes e números hexadecimais

Transmissões, gravações, recepções e reproduções das informações digitais trabalham com o 0 e o 1, ou seja, na base 2, o que aumenta sobremaneira a quantidade de *bits* quando se quer transmitir um número muito grande, como $1\,001\,954_{10}$, por exemplo.

Por que não usar então a base 10, que é aquela na qual estamos acostumados a fazer todas as operações aritméticas? O número 10 não é uma potência inteira de 2; logo, o número de *bits* a ser usado para representá-lo não seria inteiro (observe que, considerando a base 10, tem-se: $10 = 2^{3,32}$). Uma vez que não há como trabalhar com frações de *bit*, já que ele é a menor unidade de informação digital, escolheu-se a base 16, que corresponde a 24; por isso o nome **hexadecimal**.

Para trabalhar com a base 2, precisamos de dois algarismos, o 0 e o 1. Para escrever um número na base 10, precisamos de 10 algarismos, nossos conhecidos 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9. Para escrever um número qualquer na base 16, precisamos, então, de 16 algarismos. Dez algarismos nós já temos, faltam seis. Para representar esses seis restantes foram escolhidas as letras do alfabeto latino, escritas em maiúsculas, de acordo com a convenção: $A = 10$, $B = 11$, $C = 12$, $D = 13$, $E = 14$ e $F = 15$, em que, para maior clareza, os valores dos números referentes a cada letra foram apresentados na base 10.

Qual seria a representação na base 10 do número representado na base 16 por $x = 1EA2_{16}$?

$$x = 1 \cdot 16^3 + 14 \cdot 16^2 + 10 \cdot 16^1 + 2 \cdot 16^0$$

Convertendo para a base 10, temos: $x = 4\,096 + 3\,584 + 160 + 2 = 7\,842_{10}$.

Não se preocupe se esse cálculo parece trabalhoso, pois essas operações costumam ser feitas apenas por especialistas em computação.

Byte

Um *byte* corresponde a um pacote de dados usualmente de oito *bits* e foi durante algum tempo a célula básica de processos digitais. Mais tarde passou-se para células de 16 *bits*, depois 32 e, atualmente, há vários processos digitais cujas células básicas de processamento são de 64 *bits*.

É comum a confusão entre os dois termos: *bit* e *byte*. Para evitar essa confusão, o *bit* é usualmente abreviado por *b* e o *byte* por *B*.

Os múltiplos desses elementos foram construídos de forma que respeitassem a base 2. Assim, o termo *quilobit* corresponde à potência, de expoente inteiro, mais próxima de mil, isto é, $1\,024 = 2^{10}$.

Observe alguns exemplos:

$1\text{ kb} = 2^{10}$ *bits* $= 128$ *bytes*

$1\text{ MB} = 1$ *megabyte* $= 2^{10} \cdot 2^{10}$ *bytes* $= 1\,048\,576$ *bytes*

$1\text{ GB} = 1\text{ kMB} = 1$ *gigabyte* $= 2^{10} \cdot 2^{10} \cdot 2^{10}$ *bytes* $= 2^{33}$ *bits*

Às vezes, aproveitando a confusão entre os termos *byte* e *bit*, a velocidade de conexões com a internet é divulgada erradamente, como um truque comercial para o usuário imaginar que adquirirá uma conexão mais rápida. No entanto, se lhe oferecerem, por exemplo, uma conexão de 256 kbps, significa uma transmissão com velocidade máxima de 256 *quilobits* por segundo, mas em *bytes* seria de apenas 32 kB.

Conversão de uma informação analógica em digital



Figura 10.29 Representação do sinal elétrico recebido pelo conversor de sinal analógico em digital.

A figura 10.29 representa a intensidade de determinado sinal elétrico recebido por um aparelho em um dado intervalo de tempo. Esse sinal pode representar a linha de uma imagem, um segundo do som de uma orquestra, ou ainda as oscilações de temperatura ao longo de determinado período, ou outra grandeza qualquer ao longo do tempo.

Veja a seguir alguns exemplos de como o aumento no número de *bits* aprimora a fidelidade do registro digital em relação ao analógico.

Suponha que você dispõe somente de 8 *bits* (256 valores diferentes para a intensidade) para representar o valor da grandeza em cada amostra, e que sua gravação dispõe de 20 intervalos, ou seja, no total você tem 160 *bits* para tentar gravar o sinal elétrico inteiro. Isso quer dizer que seu conversor digital é ainda bastante pobre para preservar toda a informação que o sinal carrega.

A figura 10.30 mostra o sinal digitalizado na condição descrita acima. A figura 10.31 apresenta um gráfico que compara o som digitalizado com o analógico.

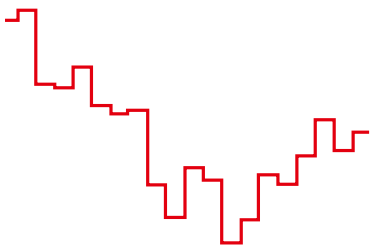


Figura 10.30 Representação do sinal digitalizado em 20 subintervalos com 8 *bits* em cada registro.

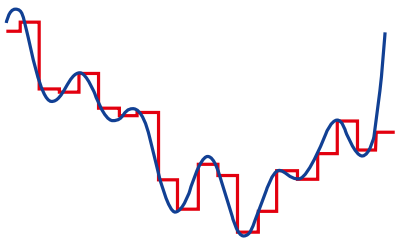


Figura 10.31 Comparação entre o sinal digitalizado (vermelho) e o analógico (azul).

Agora, vamos supor que você dispõe de 16 *bits* (2 *bytes*) para cada amostra. Como a velocidade de leitura e a quantidade de *bits* foi aumentada, você pode dividir o intervalo em 40 partes, 80 ou 220 (640, 1280 ou 3520 *bits*). As figuras 10.32, 10.33 e 10.34 mostram a comparação entre o sinal digitalizado (vermelho) e o analógico (azul), nessas três divisões. O registro apresentado na figura 10.34 é equivalente ao de um centésimo de segundo de música, em um dos canais do som estéreo.

Quanto maior o número de *bits* para cada intervalo, maior é a variedade de intensidades que podemos representar. Quanto maior o número de subintervalos, mais a representação digital é fiel ao sinal original.

Ilustrações desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

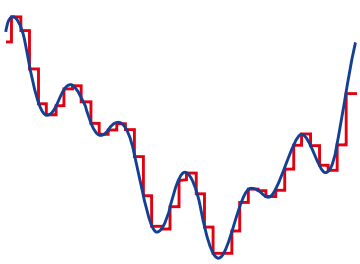


Figura 10.32 Comparação do registro digital (vermelho) com o analógico (azul) com 40 subintervalos de 16 *bits*.

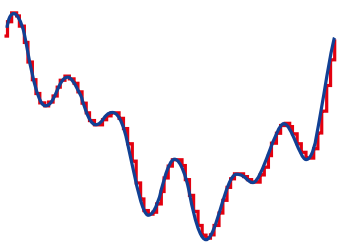


Figura 10.33 Comparação do registro digital (vermelho) com o analógico (azul) com 80 subintervalos e 16 *bits* para cada dado.



Figura 10.34 Comparação do registro digital (vermelho) com o analógico (azul) com 441 subintervalos e 16 *bits* em cada dado. Perceba que os sinais são praticamente indistinguíveis.

Exercícios

ATENÇÃO! Não escreva no seu livro!

6. Teodoro e Tiago decidiram trocar mensagens sobre o resultado do jogo de futebol entre seus times. Eles combinaram que 0 representa o time de Teodoro e 1, o de Tiago. Além disso, eles concordaram, conforme as estatísticas, que o número de gols que cada time faria no jogo nunca seria superior a 7. O código combinado por eles tem um total de oito *bits*: o primeiro *bit* representa o time do emissor da mensagem; três *bits* subsequentes representam o número de gols; o próximo *bit* representa o time do receptor; e os três últimos *bits* representam o número de gols desse time. No intervalo das aulas, foi recebida a seguinte mensagem: 00101000.

a) Quem foi o emissor da mensagem? Teodoro.

b) Qual foi o resultado do jogo? Teodoro 2 × 0 Tiago.

7. Na aula de Geografia, a professora apresenta uma lista de 60 capitais de países do mundo. Cada capital vai receber um número, entre 0 e 59.

a) Quantos *bits* são necessários para identificar cada capital? 6 *bits*.

b) Com 7 *bits* quantas capitais podem ser numeradas? 128 capitais.

c) Efetue a soma dos números: 101 com 111 representados na base 2. 12.

8. Pela facilidade e pela rapidez de transmissão, o pedido de socorro foi padronizado com a sigla SOS, que, em código Morse, é: ...- - -...

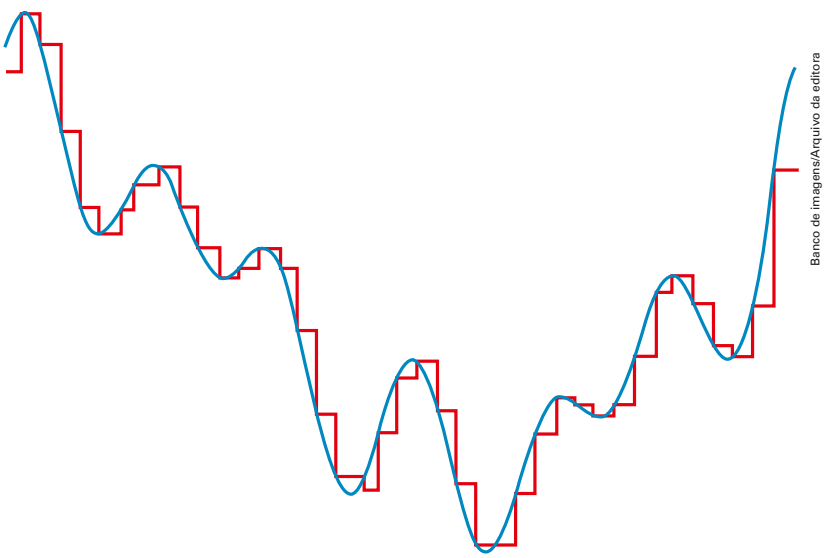
a) Escreva a palavra Física no código Morse. Veja resposta no Manual do Professor.

b) Considerando seis *bits*, quantos símbolos diferentes (letras, pontuação, espaço, etc.) podem ser construídos? 64 símbolos diferentes.

9. A digitalização de uma obra musical para o formato de CD comum é feita com determinados números de amostras por segundo.

O teorema de Shannon assegura que o número de amostras por segundo deve ser o dobro da frequência máxima audível, para garantir a fidelidade da gravação. Se a frequência máxima audível pelo ser humano é 20 kHz, quantas amostras por segundo deve conter a gravação digital em CD, por canal? 40 000 amostras por segundo.

10. A figura a seguir mostra uma comparação do registro digital (vermelho) com o analógico (azul) com 40 subintervalos de 16 *bits*.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Comparando as curvas entre os sistemas digital e analógico, houve perda de fidelidade? Sim.

b) Qual seria a solução para que a perda de fidelidade se tornasse imperceptível? Aumentar o número de amostras no intervalo de tempo considerado.

Em construção

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

Guglielmo Marconi

Marconi foi um pioneiro do rádio, considerado seu inventor oficial, e um empresário de sucesso. Tinha apenas 23 anos de idade quando patenteou um sistema de telegrafia sem fios que lhe assegurou o monopólio das radiocomunicações e, mais tarde, o Prêmio Nobel de Física (1909).

Suas tentativas de utilizar aparelhos transmissores de ondas curtas, a partir de 1916, levaram à realização, nos anos 1920, da primeira rede intercontinental de comunicação por rádio.

Apesar de seu nome ser o mais conhecido em todo o mundo quando se fala da invenção do rádio, um cientista brasileiro expôs suas descobertas em São Paulo muito antes de Marconi e de outros: o pioneirismo do padre Roberto Landell de Moura no rádio só não foi reconhecido porque ele não fazia parte da comunidade científica internacional, sediada na Europa e nos Estados Unidos.



Friedrich/Interfoto/Latinstock

Retrato de Guglielmo Marconi (1874-1937)



Reprodução/Memorial Landell de Moura, Rio Grande do Sul

Retrato de Roberto Landell de Moura (1861-1928)

Quando Marconi começou suas experiências com transmissões, as ondas de rádio eram conhecidas como ondas hertzianas, por causa de Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), professor alemão de Física que descobriu a existência das ondas eletromagnéticas (de rádio), em 1888. A conquista de Marconi foi conseguir produzir e detectar essas ondas em longas distâncias.

O garoto Guglielmo nasceu em família rica na próspera cidade de Bolonha (na Itália), de pai italiano e mãe irlandesa. Estudou nas melhores escolas e desde menino demonstrou interesse pela ciência nos ramos da Física e da Eletricidade. Rapaz ainda, começou seus experimentos em laboratório com seu pai – foi quando conseguiu enviar sinais pelo telégrafo sem fio, a uma distância de cerca de 4 km.

Demonstrou seu sistema na Inglaterra e logo fundou sua própria empresa, Marconi's Wireless Telegraph Company Limited. Faltavam dois anos para o começo do século XX quando ele conseguiu estabelecer as comunicações sem fio entre França e Inglaterra. Patenteou seu sistema e, num dia histórico, em 1901, provou que as ondas sem fio não eram afetadas pela curvatura da Terra, como se acreditava: transmitiu sinais através do oceano Atlântico, entre a Grã-Bretanha e o Canadá.

Na Primeira Guerra Mundial (1914-1918), ocupou o cargo de tenente no Exército italiano, e depois passou para a Marinha, como comandante, em 1916. No fim do conflito, representou a Itália na Conferência de Paz de Paris.

O inventor aderiu publicamente ao regime fascista de Benito Mussolini (1883-1945), na Itália, em 1923. Dessa forma, ocupou importantes cargos no governo e em órgãos públicos. Foi nomeado senador, marquês e presidente da Real Academia Italiana, função que desempenhou até sua morte.

Em 1931, transmitiu de Roma, por rádio, o sinal que ligou o sistema de iluminação do Cristo Redentor, no Rio de Janeiro.

Numa ocasião, ao desembarcar com a mãe na Inglaterra, Marconi levava um transmissor na bagagem. Os funcionários da alfândega apreenderam o aparelho. Quando este foi devolvido, os inspetores disseram que haviam pensado se tratar de uma bomba. Ao ouvir a explicação, a mãe de Marconi respondeu: "E é mesmo. Não do tipo que explode o mundo, mas ela vai derrubar todas as paredes".

Quando Marconi morreu, as estações de rádio em todo o mundo fizeram dois minutos de silêncio.

UOL Educação. *Biografias*. Disponível em: <http://educacao.uol.com.br/biografias/guglielmo-marconi.jhtm>. Acesso em: nov. 2015.

Experimento

Veja comentários e sugestões sobre este experimento e Respostas das atividades no Manual do Professor.

Montando um rádio galena

Nesta atividade vamos montar um dos mais simples receptores de ondas de rádio. Ele não precisa ser ligado a nenhuma fonte de energia elétrica nem usar pilhas. Utiliza a energia da própria onda eletromagnética que transporta o sinal.

Galena é o nome popular de um cristal encontrado na natureza, o sulfeto de chumbo (PbS). Uma propriedade importante desse cristal é que ele permite a passagem da corrente elétrica somente em um sentido, ou seja, ele é uma espécie de diodo.

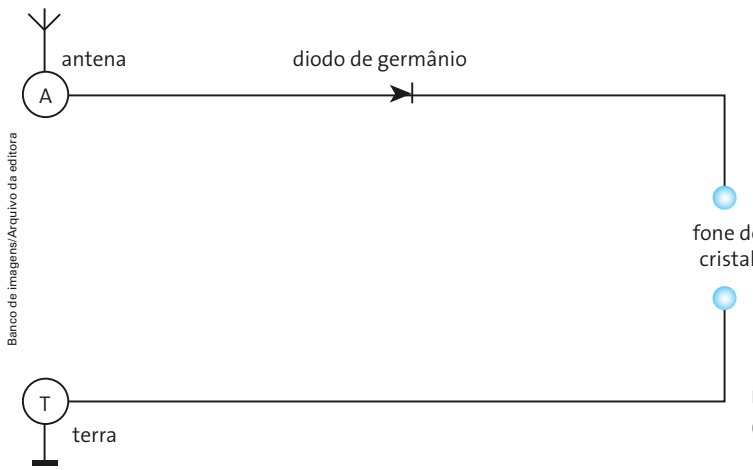


Fábio Colombini/Acervo do fotógrafo

Galena, um minério de chumbo.
Amostra do Museu de Geociências da USP.

Atualmente, os diodos são muito baratos, fáceis de encontrar e com desempenho melhor que um cristal galena. Em nossa montagem vamos utilizar um diodo de germânio. A seguir fornecemos os códigos comerciais de alguns modelos que podem ser utilizados nessa montagem: 1N34, OA79 e AA117.

Para ouvir o sinal do rádio vamos precisar de um alto-falante de cristal. Entre os mais adequados estão os fones de telefones comuns, que você pode encontrar em lojas de sucata. Os fones de ouvido comuns não servem, a não ser que você os utilize com outros componentes para adaptação.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Esquema das ligações do receptor de rádio.

Utilize um fio de cobre comum como antena. Em geral, cerca de 3 m de antena (vertical) são suficientes para captar o sinal.

Ligue a antena a um dos polos do diodo. Em seguida, ligue o outro polo do diodo a um dos polos do alto-falante. Finalmente, ligue o outro polo do alto-falante à terra. Muitas vezes, segurar esse outro polo com a mão já dá um aterramento satisfatório. No entanto, o melhor a fazer é espetar em chão molhado o fio ligado a esse segundo polo, conforme ilustra a figura.

Esse é o esquema do rádio galena mais simples. Adicionando outros componentes, como bobina de indutância variável e um capacitor, obtemos melhorias na recepção, além de podermos controlar a emissora que queremos sintonizar. Mas isso já é outra história.

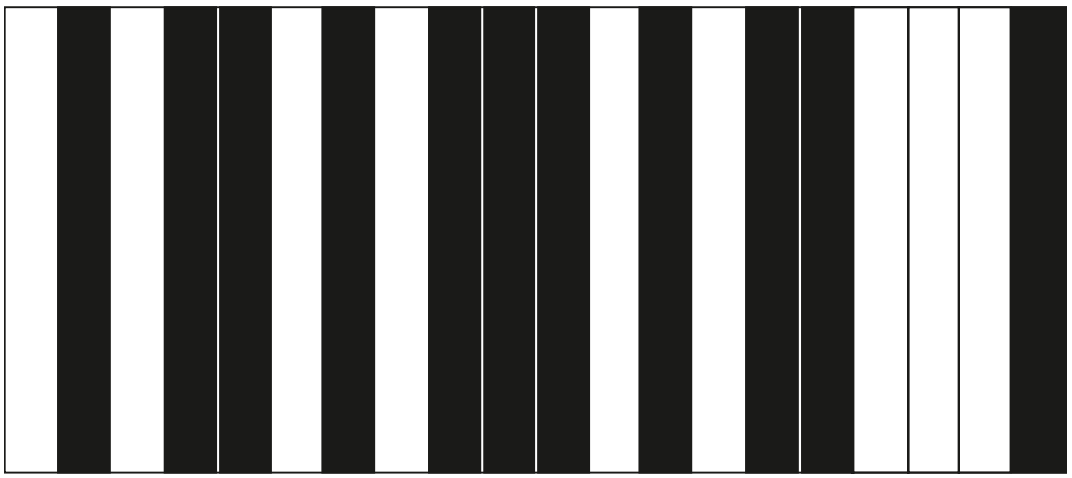
O que está acontecendo? Por que conseguimos ouvir determinada emissora, e não outra?

1. Inverta a ligação do diodo e tente ouvir no alto-falante. O que você observa?
2. Tente variar o comprimento da antena enquanto ouve no alto-falante. O que acontece?

Retomando

Veja, no Manual do Professor, Atividades complementares e Resolução dos exercícios deste capítulo.

11. (Enem) O código de barras, contido na maior parte dos produtos industrializados, consiste num conjunto de várias barras que podem estar preenchidas com cor escura ou não. Quando um leitor óptico passa sobre essas barras, a leitura de uma barra clara é convertida no número 0 e a de uma barra escura, no número 1. Observe abaixo um exemplo simplificado de um código em um sistema de código com 20 barras.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Se o leitor óptico for passado da esquerda para a direita irá ler: 01011010111010110001

Se o leitor óptico for passado da direita para a esquerda irá ler: 10001101011101011010

No sistema de código de barras, para se organizar o processo de leitura óptica de cada código, deve-se levar em consideração que alguns códigos podem ter leitura da esquerda para a direita igual à da direita para a esquerda, como o código 00000000111100000000, no sistema descrito acima. Em um sistema de códigos que utilize apenas cinco barras, a quantidade de códigos com leitura da esquerda para a direita igual à da direita para a esquerda, desconsiderando-se todas as barras claras ou todas as escuras, é:

a) 14.
b) 12.
c) 8.
X d) 6.
e) 4.

12. (UFPB) No atual mundo globalizado, a comunicação pela internet, utilizando voz e imagem, vem se tornando relevante para atividades tanto de lazer quanto de negócios. Para garantir a boa qualidade de comunicação, os projetistas de rede precisam dar especial atenção ao fator atraso na transmissão dos dados via fibras ópticas. Considere que três conferencistas, *A*, *B* e *C*, participam de uma teleconferência, em que ondas eletromagnéticas (luz) são usadas para a transmissão de dados. Considere ainda que os dados do conferencista *A* percorrem uma distância *L*, via satélite, até o conferencista *B* à velocidade da luz no vácuo $c = 3 \times 10^8$ m/s. Esses mesmos dados são enviados do conferencista *A* ao conferencista *C*, percorrendo a mesma distância *L*, por meio de uma fibra óptica de índice de refração $n = 1{,}5$.

Sabendo que a distância *L* é de 6 000 km, conclui-se que o módulo da diferença de tempo, em milissegundos (ms $= 10^{-3}$ s), entre os sinais recebidos pelos conferencistas *B* e *C*, é:

a) 5.
X b) 10.
c) 15.
d) 20.
e) 25.

Respostas

Unidade 1 · O calor e suas consequências

Capítulo 1 · Temperatura e calor

1. **I**. Errado; **II**. Certo; **III**. Errado; **IV**. Errado; **V**. Certo.

2. Alternativa **d**.

3. a) $\Delta\theta = 20\ °C$
b) $\Delta\theta = 30\ °C$

4. A temperatura externa era de 5 °C, portanto o traje escolhido pelo passageiro não foi adequado.

5. $\theta_{guia} = 19\ °C$; $\theta_{correto} = 20\ °C$. **6.** Produz variação de 36 °F

7. a) $T = -4\ °F$
b) $F = 104\ °F$
c) $50\ °F = 10\ °C$
d) Funciona bem entre −20 °C e 40 °C, logo, é uma boa aproximação.

8. 491

9. a) 673 K; 73 K b) 600 K

10. I. Verdadeira. II. Falsa. III. Verdadeira.

11. a) Permanece constante, pois no gráfico temos retas paralelas.
b) $\frac{4}{3}$

12. A barra menor.

13. 405 °C

14. $\alpha = 8{,}3 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$

15. 9 800 litros

16. a) $\gamma_{ap} = 2{,}5 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$
b) Maior.

17. a) Sim.
b) Principalmente na condução. A lã é isolante térmica e diminui o ganho que passa do ar para o gelo, retardando o processo de fusão.

18. O recipiente *A* está mais quente: $\theta_A = 70\ °C$; $\theta_B = 20\ °C$

19. a) Do sol para as pessoas. Irradiação.
b) Do ferro para a roupa. Condução.
c) Do aparelho para o alimento. Irradiação.
d) Dos alimentos para o ar (condução), que sobe por convecção. Condução e convecção.
e) Da pessoa para o ambiente, cedendo calor. Condução.
f) Da fogueira para a pessoa. Irradiação.

20. Alternativa **d**.

21. Alternativa **d**.

22. Alternativa **d**.

23. Alternativa **e**.

Capítulo 2 · Calorimetria

1. a) Capacidades térmicas são iguais.
b) Água na fase líquida.

2. a) Ambas receberam a mesma quantidade.
b) A barra de ferro.
c) A barra de cobre.

4. a) $C = 100\ cal/°C$ b) $C = 0{,}5\ cal/(g \cdot °C)$

5. $Q = 700$

6. a) O homem, pois durante a ebulição a temperatura não se altera.
b) Aumento da taxa de vaporização.

7. a) $m = 20\ g$ b) $m = 600\ g$

8. a) $P = 68 \cdot 10^3\ W$ b) $A = 1{,}1\ m^2$

9. a) Sim, pois $T_{ebul.} = 100\ °C < 232\ °C = T_{fulgor}$
b) Não.
c) Redução da condutividade e consequente aumento da temperatura na base da caixa.

10. a) A pressão de vapor do sólido é maior do que a atmosférica.
b) $Q = 4\,200\ cal$

11. 3 L de água fria e 1 L de água quente.

12. $\theta = 13{,}1\ °C$

13. a) $1{,}9 \cdot 10^4\ L$
b) 1%

14. a) *A* e *D*: sólida; *B*: líquida; *C*: vapor; *E*: gasosa.
b) *AB*: fusão; *DC*: sublimação.
c) Não, pois está além da temperatura crítica.
d) Reduzir bastante a pressão ou aumentar bastante a temperatura.

15. Diminui a temperatura de fusão.

16. $T = 98{,}3\ °C$

17. a) Aumentará.
b) Diminuirá.

18. $p = -742\ mmHg$

19. a) $h = 70\%$
b) $h = 100\%$

20. $h = 37{,}5\%$

21. Alternativa **e**.

22. Alternativa **d**.

23. Alternativa **a**.

24. Alternativa **b**.

25. Alternativa **c**.

26. Alternativa **b**.

27. Alternativa **a**.

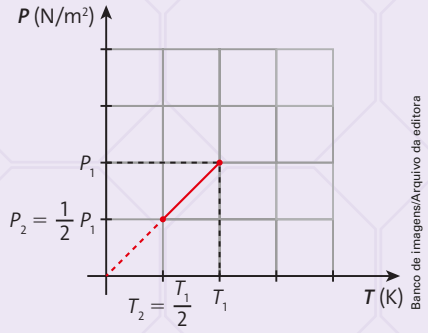
Unidade 2 · Energia e meio ambiente

Capítulo 3 · Primeira lei da Termodinâmica

1. $T = 627\ °C$

2. $p = 0{,}75\ atm$

3. a) $p_2 = \frac{1}{2}\ p_1$

b) 

Banco de imagens/Arquivo da editora

5. a) Isobárica. b) $\tau = 70$ J

6. a) $\tau_{AB} = 4\,800$ J; $\tau_{BC} = 0$; $\tau_{CA} = -2\,400$ J.
b) $\tau_{ciclo} = 2\,400$ J.

7. $\Delta U = -100$ J

8. a) Diminui. b) Aumenta.

9. a) Energia cinética dobra.
b) Energia interna dobra.
c) Energia interna reduz-se à metade.

10. $Q = +200$ J

11. a) $\tau = 0$; $\Delta U = 747$ J b) Aumenta.

12. a) Compressão
b) $\tau = -1{,}8 \cdot 10^5$ J
c) Negativa, pois diminuiu o produto $p \cdot V$.

13. Menor, pois sofre uma expansão adiabática.

14. a) $\tau = +1{,}2 \cdot 10^5$ J b) $\Delta U = 0$ c) $Q = +1{,}2 \cdot 10^5$ J

15. a) $Q = -3 \cdot 10^4$ J
b) No ponto *C*.
c) Na transformação *AB* (expansão).

16. Não. **18.** Alternativa **d**. **20.** Alternativa **d**.

17. Alternativa **b**. **19.** Alternativa **d**.

Capítulo 4 · Segunda lei da Termodinâmica

1. I. A energia térmica adquirida pelas mãos não pode ser convertida em mecânica, provocando movimento das mãos.
II. Não é possível que a tinta se separe da água espontaneamente, uma vez dissolvida. Essa ação requer energia mecânica adicional para filtragem.
III. Não é possível "devolver" a energia térmica trocada pelos corpos durante o processo.

2. Motor térmico. A máquina está recebendo calor (solar) e gerando energia mecânica (a energia potencial das águas nas hidrelétricas).

3. a) O interior do cômodo seria aquecido e a refrigeração passaria ao ambiente externo.
b) Bomba de calor.

4. Não, pois é necessário energia para comprimir o ar, ou seja, realizar trabalho mecânico. Parte dessa energia é liberada à medida que o ar se expande.

5. Alternativa **c**.

6. a) 450 J
b) $1{,}5 \cdot 10^3$ N
c) Diminuiria a intensidade das forças resistivas, em cada velocidade, reduzindo o consumo e proporcionando um valor de velocidade máxima maior. Com a redução das perdas, o rendimento seria melhorado.

7. a) $2{,}0 \cdot 10^5$ W $\simeq 270$ hp c) $\frac{\Delta E}{\Delta S} = 6{,}7 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{km}}$
b) $6{,}7 \cdot 10^5$ W

8. a) 200 J b) 2 000 W c) 25%

9. a) 600 J c) 136 kW
b) 189 kW d) 71 hp

10. Alternativa **b**.

11. Não. O conjunto libera calor.

12. a) 3 500 W b) 4 667 W c) 400%

13. Alternativa **d**.

14. Falsa, pois a suposta máquina renderia mais do que a máquina de Carnot, o que é impossível.

15. a) 1 600 J b) 9 200 J c) 17% d) 83%

16. a) 16,7% b) 360 MW

17. a) Aproximadamente 55 cv, a 5 500 rpm.
b) Aproximadamente 13 m · kgf, a 2 200 rpm.

18. a) Aproximadamente 670 N · m, a 2 000 rpm.
b) Cerca de 530 N · m.

19. b) 4 500 rpm.
c) Porque a perda relativa de torque foi maior que o ganho com o aumento de rotação.

20. Alternativa **c**.

21. Inviável, pois o rendimento alegado é impossível.

22. Alternativa **c**.

23. Alternativa **c**.

24. Soma: 30 (02 + 04 + 08 + 16).

Capítulo 5 · Fontes de energia e impactos ambientais

1. Alternativa **d**.

2. Alternativa **e**.

3. a) $E = 3{,}3 \cdot 10^7$ J b) $V = 1{,}39$ L

4. Alternativa **b**.

5. Alternativa **a**.

6. Alternativa **e**.

7. Alternativa **b**.

8. Alternativa **a**.

9. Alternativa **e**.

10. Proteção contra radiações eletromagnéticas nocivas à vida, principalmente a UV–B.

11. O aumento de CO_2 contribui para o aquecimento global.

12. Os principais são: CO, CO_2, óxidos nitrosos e sulforosos e material particulado (fuligem de carbono).

13. Misturas com mais O_2 e combustões mais lentas.

14. Por dificultar a dispersão dos poluentes.

15. Queima de combustíveis fósseis e gases vulcânicos.

16. Alternativa **a**.

17. Não. A combustão gera o CO_2, embora ele seja reabsorvido no crescimento da cana.

18. Alternativa **a**. **19.** Alternativa **d**.

20. Reciclagem do papel, que reduz a quantidade de árvores derrubadas para sua produção. Reciclagem de alumínio, vidros e baterias. Aproveitamento do lixo orgânico na produção de gás.

21. Alternativa **e**. **22.** Alternativa **a**. **23.** Alternativa **a**.

Unidade 3 • Ondulatória

Capítulo 6 • Ondas mecânicas

1. a) Diminuirá.
b) Não se alterará.
c) Diminuirá.

2. Aumento no comprimento do pêndulo pela dilatação térmica.

3. I. Certo. II. Errado. III. Errado.

4. a) $m = 2{,}0$ kg b) Sim.

5. É menor do que a da Terra.

6. Alternativa **d**.

7. a) $A = 10$ cm e $\lambda = 40$ cm.
b) $f = 2{,}0$ Hz e $v = 0{,}80$ m/s.

8. a) $f = 10$ Hz b) $T = 0{,}1$ s

9. $f = 75$ bpm

10. a) $h = 148$ m b) $\lambda = 5{,}7$ m

11. a) Região 2 b) A frequência é a mesma.

12. Difração.

13. I. Errado. II. Certo. III. Errado.

14. Construtiva. **15.** Afirmativa **III**.

16. a) $\lambda = 24$ cm
b) $v = 24$ m/s

17. a) Os vórtices da turbulência do vento produziram vibrações ressonantes com as vibrações da ponte.
b) Ressonância do circuito de recepção.

18. Alternativa **a**.

19. $v = 10$ m/s; $A_f = 4{,}5$ m

20. Alternativa **c**.

21. Alternativa **a**.

Capítulo 7 • Acústica

1. I. Correta. III. Errada.
II. Correta. IV. Correta.

2. O som chega antes e com mais intensidade.

3. Alternativa **d**.

4. $c = 5$ mm

5. O tempo de propagação da luz é desprezível e a distância está relacionada com a velocidade do som no ar.

6. $h = 70$ m

7. a) Não. b) $d = 340$ m

8. a) $\beta = 20$ dB
b) Não, pois a escala não é linear.

9. a) $f \simeq 1\,000$ Hz b) Maior. c) $I = 10^0$ W/m²

10. 10 000 vezes, ou seja, 10^4 vezes.

11. Altura; intensidade.

12. I. Timbre III. Altura V. Timbre
II. Intensidade IV. Altura

13. a) Forte e ruidoso grave. c) Fraco e grave.
b) Forte e ruidoso agudo. d) Forte e agudo.

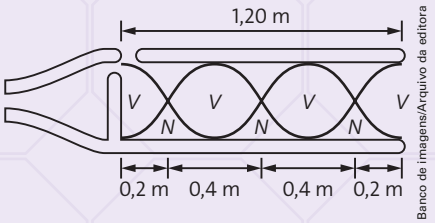
14. $\lambda_2 = 1{,}0$ m; $\lambda_3 = 0{,}67$ m e $\lambda_4 = 0{,}5$ m

15. $f = 395$ Hz

16. Pressionando o centro da porção vibrante.

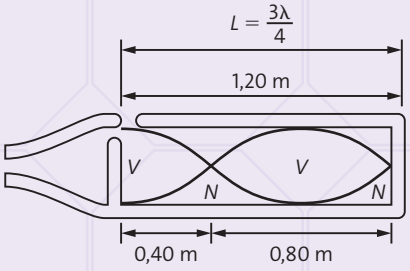
17. Timbres diferentes de acordo com os pontos que se tangem às cordas.

18. a)



Banco de imagens/Arquivo da editora

b)



19. $f = 3\,542$ Hz; $\lambda = 9{,}6$ cm. É audível.

20. $f_1 = 500$ Hz, $f_2 = 1500$ Hz e $f_3 = 2500$ Hz.

21. Para afinar os instrumentos.

22. Alternativa **a**. **23.** Menor. **24.** $f = 765$ Hz

25. a) **V**; c) **V**; e) **V**; g) **V**;
b) **V**; d) **V**; f) **F**; h) **V**.

26. Alternativa **b**. **28.** Alternativa **d**.

27. Alternativa **d**. **29.** Alternativa **a**.

Unidade 4 • Óptica e informação

Capítulo 8 • Luz e reflexão luminosa

1. Alternativa **c**.

2. A de Luciana

3. I: Certa; II: Errada; III: Certa.

4. a) É refletida difusamente.
b) Reflexão difusa.

5. *A*: branca, *B*: azul, *C*: verde e *D*: vermelha.

6. Alternativa **b**.

7. Não, mas na parte da penumbra ele pode ver uma parte da fonte.

8. Lua nova, pois é a única fase na qual a Lua pode se interpor entre a Terra e o Sol.

9. a) Solar. b) Total.

10. a) $d = 6{,}0$ m b) Permanece o mesmo.

11. a) $x = 1{,}0$ m b) $y = 0{,}8$ m c) Não.

12. Alternativa **c**.

13. Direita.

14. b) Igual.

15. $\theta = 60°$

16. a) Seis.
b) Três se cumprimentam com a mão esquerda..

17. a) Côncavo b) No foco principal.

18. **I** e **II**.

19. 12 cm e 36 cm.

20. a) Menor, real e invertida.
b) À medida que o objeto se aproxima do foco, a imagem vai aumentando, mas continua real e invertida. Com o objeto exatamente no foco, a imagem é imprópria. Para o objeto na região entre o foco e o vértice a imagem é maior, virtual e direita.

21. a) Côncavo. b) Ligeiramente menor que 40 cm.

22. $R = 100$ m

23. a) No foco de E_1.
b) No centro de curvatura do espelho E_2.

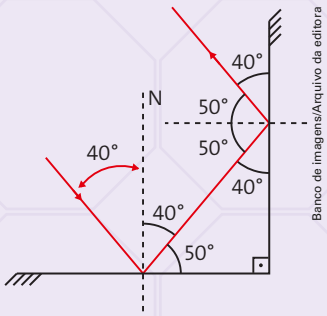
24. A imagem virtual e direita estará a 1,0 m e terá 0,85 m de altura.

25. a) 50 cm b) 20 cm

26. Alternativa **a**.

27. Alternativa **e**.

28. a)



Banco de imagens/Arquivo da editora

b) Como o raio incidente e o emergente são ambos inclinados 40° em relação à vertical, eles são paralelos (ângulos correspondentes).

29. Alternativa **a**.

Capítulo 9 · Refração luminosa

1. a) Mais refringente: *A*; menos refringente: *C*.
b) $n_A > n_B > n_C$

2. a) 0,8 e 0,6. b) $n = 1{,}33$

3. a) Reflexão total e refração.
b) Maior.

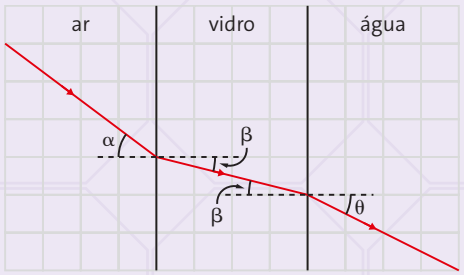
4. a) Ponto *A*. b) Ponto *B*.

5. $h = 2{,}0$ m e $h_{aparente} = 1{,}5$ m

6. $h = 1{,}6$ m

7. a) Virtual. b) Mais próxima.

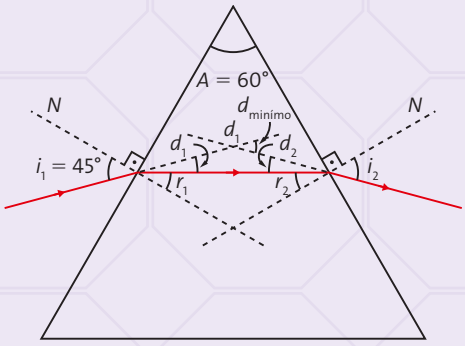
8. a)



Banco de imagens/Arquivo da editora

b) Não.

9. a)



Banco de imagens/Arquivo da editora

b) $n = \sqrt{2}$

10. a) Refração na primeira face, reflexão total na segunda e refração na base.
b) $n = \sqrt{2}$

11. $d = 5{,}0$ cm **12.** Verdadeira.

13. I. Certo. II. Certo. III. Certo.

14. Alternativa **d**.

15. I. Errada. II. Certa. III. Certa.

16. a) Convergente. b) No foco.

17. a) A lente de $f = 40$ cm
b) Também a lente de $f = 40$ cm

18. a) Real e invertida. b) $f = 15$ cm

19. a) Real e invertida.
b) $p' = 12$ cm e $y' = -4{,}0$ cm

20. $C = 40$ di

21. a) Convergentes.
b) L_1 é ocular, L_2 é objetiva.

22. a) Objetiva: lente 1; ocular: lente 2.
b) I_2.

23. $p' = 52{,}6$ mm

24. a) Maior. b) $f' = 4{,}5$ cm

25. I. Certo II. Errado III. Certo

26. Diminuir.

27. a) Miopia. Deve usar lentes divergentes.
b) $C = -2{,}5$ di

28. a) Hipermetropia e astigmatismo.
b) A lente do olho esquerdo.

29. Alternativa **d**. **30.** Alternativa **c**.

31. Alternativa **a**. **32.** Alternativa **b**.

Capítulo 10 · Sons, imagens e informação

1. A lata azul.

2. As vibrações acarretam variações de eletrização que podem ser o sinal a ser captado por circuito elétrico e amplificado.

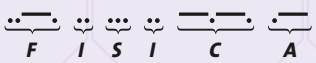
3. Os alto-falantes devem ter cones pequenos.

4. a) Ruim.
b) Boa.

5. O risco é o de esses sinais interferirem em comunicações importantes, às vezes, imprescindíveis, como o exemplo do avião se comunicando com o aeroporto.

6. a) Teodoro b) Teodoro 2×0 Tiago

7. a) 6 *bits* b) 128 capitais c) 12

8. a) 

b) 64 símbolos diferentes.

9. a) 40 000 amostras por segundo

10. a) Sim.
b) Aumentar o número de amostras no intervalo de tempo considerado.

11. Alternativa **d**.

12. Alternativa **b**.

Siglas de vestibulares

Acafe-SC: Associação Catarinense das Fundações Educacionais (Santa Catarina)

Cesumar-PR: Centro de Ensino Superior Universitário de Maringá (Paraná)

Enem: Exame Nacional do Ensino Médio

Etec-SP: Escola Técnica Estadual (São Paulo)

Fuvest-SP: Fundação Universitária para o Vestibular (São Paulo)

Mack-SP: Universidade Presbiteriana Mackenzie (São Paulo) [atual **UPM-SP**]

Pisa-Inep: *Programme for International Student Assessment* (Programa Internacional de Avaliação de Estudantes) – Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira

UEA-AM: Universidade do Estado do Amazonas

UEFS-BA: Universidade Estadual de Feira de Santana (Bahia)

UEM-PR: Universidade Estadual de Maringá (Paraná)

Uepa: Universidade do Estado do Pará

UEPB: Universidade Estadual da Paraíba

Ufam: Universidade Federal do Amazonas

UFBA: Universidade Federal da Bahia

Ufla/PAS-MG: Universidade Federal de Lavras/Processo de Avaliação Seriada (Minas Gerais)

UFPB: Universidade Federal da Paraíba

UFPR: Universidade Federal do Paraná

UFTM-MG: Universidade Federal do Triângulo Mineiro (Minas Gerais) [antiga **FMTM-MG**]

Unicamp-SP: Universidade Estadual de Campinas (São Paulo)

Unicastelo-SP: Universidade Camilo Castelo Branco de São Paulo

Vunesp-SP: Fundação para o Vestibular da Unesp (São Paulo)

Sugestões de leitura e *sites*

A lista apresentada a seguir é sugerida para tentar ampliar seus conhecimentos e incentivá-lo a fazer outras leituras além do livro didático.
Boa leitura!

- ACZEL, A. D. *O pêndulo*: Léon Foucault e o triunfo da ciência. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

  O livro apresenta a vida do físico francês Léon Foucault, que, em 1851, demonstrou a rotação da Terra por meio da oscilação de um pêndulo.

- Aquecimento global. *Scientific American Brasil*. Edição especial n. 19.

  Como deter o aquecimento global: o que os governos, empresas e cidadãos podem fazer.

- BAEYER, H. C. V. *Arco-íris, flocos de neve*, quarks: a Física e o mundo que nos rodeia. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

  Um físico expõe com elegância a forma pela qual fenômenos corriqueiros revelam a complexa e profunda beleza do mundo natural.

- BARRETO, P. S. *Laboratório do mundo*: ideias e saberes do século XVIII. São Paulo: Pinacoteca – Imprensa Oficial do Estado, 2004.

  Trata-se de um catálogo ilustrado e explicado de uma exposição realizada na Pinacoteca do Estado de São Paulo, em 2004, contendo peças do acervo dos principais polos de ciência de Portugal, no século XVIII. As grandes realizações científicas da época, sementes do desenvolvimento tecnológico e científico atual, estão explicadas e contextualizadas historicamente.

- BRANCO, S. M.; MURGEL, E. *Poluição do ar*. São Paulo: Moderna, 1995.

  O livro discute a poluição do ar: fontes de poluição, os efeitos, os padrões de qualidade do ar, os poluentes, o efeito estufa, as indústrias e os veículos, o controle da poluição, o papel da natureza e o papel de cada um de nós.

- GLEISER, M. *Retalhos cósmicos*. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.

  O livro apresenta cinquenta textos, publicados originalmente no jornal *Folha de S.Paulo* e reelaborados para edição em livro, que refletem uma convicção forte do autor: a livre circulação das informações é condição para o exercício da cidadania.

- *Meio Ambiente no século 21*: 21 especialistas falam da questão ambiental nas suas áreas de conhecimento. André Trigueiro (Coord.). Rio de Janeiro: Sextante, 2003.

  Entre as 21 áreas de conhecimento apresentadas neste livro, encontramos: Educação, Opinião Pública, Negócios, Ciência e Tecnologia, Energia, Agricultura, Poderes Executivo, Legislativo e Judiciário e Agenda 21.

- RIVAL, M. *Os Grandes experimentos científicos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

  O autor apresenta 41 experimentos científicos; entre eles, a medição do raio da Terra por Eratóstenes, no século III a.C., a medida da velocidade da luz, em 1676, e a caça às ondas gravitacionais, em 1958.

- Rooney, Anne. *A história da Física*. São Paulo: M. Books do Brasil, 2013.

  O livro traça a trajetória das tentativas da humanidade em ler o livro do universo, aprendendo e usando a linguagem da matemática. Revela, também, como nosso conhecimento é ínfimo – a física trata de apenas 4% do universo, os outros 96% são um mistério a ser revelado.

- SAGAN, C. *Bilhões e bilhões*: reflexões sobre a vida e a morte na virada do milênio. São Paulo: Schwarcz, 2002.

  O autor descreve, de maneira muito atraente, a necessidade de se utilizar números para entender o mundo. Além disso, trata de questões relativas à vida no planeta de maneira responsável e mostrando como estudá-las mediante argumentação científica.

- SOBEL, D. *Longitude*. 2. ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

  O livro descreve a história de John Harrison na sua luta para resolver o maior problema das explorações marítimas do século XVIII: a determinação da longitude.

- TOLENTINO, M.; ROCHA-FILHO, R. C.; SILVA, R. R. da *O Azul do planeta* – Um retrato da atmosfera terrestre. São Paulo: Moderna, 1995.

  O livro apresenta um retrato da atmosfera terrestre: estrutura, composição, importância, alterações e sua participação a serviço do homem.

Páginas indicadas para pesquisa e consulta

- A Física na Escola: <www.sbfisica.org.br/fne/>.
- Associação Brasileira de Energia Nuclear: <www.aben.com.br/>.
- Caderno Brasileiro de Ensino de Física: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica>.
- Ciência Hoje: <http://cienciahoje.uol.com.br/>.
- Comissão Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq): <www.cnpq.br>.
- Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN): <www.cnen.gov.br>.
- Estação Ciência: <www.eciencia.usp.br>. Acesso em: 18 mar. 2016.
- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen): <www.ipen.br>.
- Ministério da Educação (MEC): <www.mec.gov.br>.
- Revista Brasileira de Ensino de Física: <www.scielo.br/rbef>.
- Scientific American Brasil: <www.sciam.com.br>.
- Sociedade Brasileira de Física: <www.sbfisica.org.br>.
- Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência: <www.sbpcnet.org.br>.

  Acesso em: 18 mar. 2016.

Bibliografia

BASSALO, J. M. F. *Nascimentos da Física*. I: 3500 a.C. – 1900 a.D (1996); II: 1901-1950 (2000); III: 1951-1970 (2005). Belém: Ed. da UFPA. 3v.

CHESMAN, C.; ANDRÉ, C.; MACÊDO, A. *Física Moderna*: *experimental e aplicada*. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. *Evolução da Física*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1998.

FEYNMANN, R.; LEIGHTON, R.; SANDS, M. *Lições de Física de Feynman*. São Paulo: Artmed, 2008. 3 v.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentos de Física*. 3. ed. I. Mecânica; II. Gravitação, ondas e Termodinâmica; III. Eletromagnetismo; IV. Ótica e Física moderna. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1994. 4 v.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. *Energia e meio ambiente*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

KAPLAN, I. *Física Nuclear*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.

MARTINS, J. B. *A História do Átomo:* de Demócrito aos *quarks*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2001.

MARTINS, R. A. *Universo*: Teorias sobre sua origem e evolução. São Paulo: Moderna, 1994.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1988. 3 v.

OKUNO, E. et al. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1982.

OREAR, J. *Física*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975.

PIRES, A. S. T. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2008.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. *Física*. Parte I: Mecânica, acústica e calor. Parte II: Eletricidade, Magnetismo e Óptica. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1971.

ROCHA, J. F. M. (Org.). *Origens e evolução das ideias da Física*. Salvador: Ed. da UFBA, 2002.

RONAN, C. A. *História ilustrada da ciência da Universidade de Cambridge*. Volume I. Das origens à Grécia. Volume II. Oriente, Roma e Idade Média. Volume III. Da Renascença à Revolução Científica. Volume IV. A ciência nos séculos XIX e XX. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

SALMERON, R. A. *Introdução à Eletricidade e ao Magnetismo*. São Paulo: Nobel, 1963.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. *Princípios de Física*. 3. ed. I. Mecânica Clássica; II. Movimento Ondulatório e Termodinâmica; III. Eletromagnetismo; IV. Óptica e Física Moderna. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 4 v.

TIPLER, P. A. *Física*. 4. ed. I. Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica; II. Eletricidade e Magnetismo, Ótica; III. Física Moderna: Mecânica Quântica, Relatividade e a Estrutura da Matéria. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 3 v.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física*. 12. ed. I. Mecânica; II. Termodinâmica e Ondas; III. Eletromagnetismo; IV. Ótica e Física Moderna. São Paulo: Addison Wesley, 2008. 4 v.

Índice remissivo

A
aceleração da gravidade, **133**
amplitude, **138**

B
Bethe, Hans, **128**
Boyle, Robert, **77**

C
calor, **11**
  específico, **42**
calórico, **29**
calorímetro, **52**
capacidade térmica, **41**
Carnot, Sadi Nicolas Léonard, **72, 88, 96**
Celsius, Anders, **15**
coeficiente de dilatação, **21**
comprimento de onda, **139**
condução, **30**
convecção, **32**

D
difração, **144**
dilatação,
  aparente, **26**
  linear, **21**
  superficial, **24**
  térmica, **20**
  volumétrica, **25**

E
eclipse,
  da Lua, **194**
  do Sol, **194**
efeito Doppler, **174**
energia,
  cinética, **18, 46, 50**
  elétrica, **98**
  mecânica, **12, 80**
  térmica, **29**
equilíbrio térmico, **12**
espectro da luz visível, **190**

F
Fahrenheit, Daniel, **15**
fibra óptica, **222**
Foucault, Léon, **134**
Fourier, Jean-Baptiste Joseph, **59**
frequência, **138**

G
Galilei, Galileu, **29, 133**
Gauss, Carl Friedrich, **213**

H
Halley, Edmond, **246**
Hertz, Heinrich, **270**
Huygens, Christiaan, **151**

I
imagem,
  real, **234**
  virtual, **223**
índice de refração, **217**
intensidade, **12**
irradiação, **34**

J
Joule, James, **37**

K
Kelvin, lorde, **37**

L
lei,
  da Termodinâmica, primeira, **71**
  da Termodinâmica, segunda, **79**
  de Boyle, **77**
  de Snell, **218**
lupa, **236**

M
máquina térmica, **80**
Marconi, Guglielmo, **270**
microscópio, **238**
mol, **66**
mola, **134**
movimento,
  de rotação, **94**
  oscilatório, **132**
  vibratório, **46**

O
ondas,
  de rádio, **137, 270, 271**
  sonoras, **137**
órbita, **195**

P
partícula, **12**
período, **139**
Pitágoras, **179**
prisma, **225**

R
radiação térmica, **34**
refrigerador, **85**
rendimento, **82**

T
telefone, **266**
termômetro, **13**
timbre, **163**
trabalho, **68**

V
velocidade,
  constante, **69**
  da luz, **217**
  do som, **156**

Manual do Professor

Física

VOLUME 2

Sumário

1 Conversa com o professor 283
2 Os PCNEM e a história do ensino de Física 283
3 Aprender e ensinar Física para quê? 286
4 O Novo Enem 291
5 Sugestões de aprofundamento 294
6 Linha pedagógica da Coleção e estrutura da obra 297
7 Discussão sobre avaliação 300
8 Estratégias didáticas e o conteúdo digital na prática pedagógica 305
9 Temas transversais 310
10 Sugestões de abordagem e resoluções 313
Capítulo 1 313
Capítulo 2 319
Capítulo 3 324
Capítulo 4 329
Capítulo 5 334
Capítulo 6 344
Capítulo 7 349
Capítulo 8 357
Capítulo 9 366
Capítulo 10 373

1 Conversa com o professor

Caro Professor,

Construímos este **Manual do Professor** com o objetivo de auxiliá-lo na prática docente. Por isso iniciamos retomando as concepções do Ministério da Educação (MEC) a respeito do Ensino Médio, as propostas dos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) e para o ensino da Física, uma vez que no nosso trabalho procuramos dialogar com essas orientações. Com o mesmo foco apresentamos reflexões sobre o Enem e sugestões de aprofundamento.

Em seguida, e de forma geral, apresentamos a proposta pedagógica escolhida e a estrutura da obra; nesse tópico discutimos os caminhos que levaram à construção deste material e os objetivos de cada elemento que o constitui.

Procuramos fornecer ferramentas práticas para o cotidiano escolar; assim, falamos sobre avaliação, práticas didáticas, recursos digitais e temas transversais, com uma postura que contribui para o entendimento de cada item e o auxilia na construção de estratégias didáticas coerentes com a sua realidade.

Sintetizamos os objetivos de cada uma das seções que compõem os capítulos do livro do aluno, tendo em mente que o trabalho desenvolvido pelo professor em sala de aula deve estar em sintonia com tais objetivos. A partir daí seguem-se sugestões para o desenvolvimento dos conteúdos trabalhados – procedimentos e estratégias pedagógicas para cada uma das seções propostas, resoluções comentadas das atividades e exercícios.

Bom trabalho.

Os autores

2 Os PCNEM e a história do ensino de Física

O novo paradgima

Sem nos posicionarmos a favor ou contra a legitimidade do vínculo, não há como negar a conexão existente entre os interesses econômicos e políticos e as decisões que guiam a trajetória da educação de uma nação. Publicados no momento em que as mudanças sociais e econômicas estavam sendo introduzidas pela era da informação, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) estão alinhados com as novas necessidades mundiais e podem ser explicados, em grande parte, por meio dessa conexão.

De acordo com a psicóloga e professora da Universidade Federal do Rio de Janeiro Mônica Pereira dos Santos, a luta pela "escola para todos" teria tido sua origem na época da publicação da Declaração Universal dos Direitos Humanos, pela Organização das Nações Unidas (ONU), em 1948. Na década de 1960, no Brasil, essa luta se ramificou no movimento de "massificação do ensino", que se estende até hoje e tem beneficiado boa parcela da população carente. Precisamos dizer que, apesar do marco simbólico para a qualidade do ensino nacional, em meados do século passado, a "educação para todos" ainda era elitista no Brasil, já que as classes desfavorecidas procuravam o ensino técnico profissionalizante para garantir capacitação e um espaço no mercado de trabalho, ocasionando a impossibilidade de ingresso no nível superior. A oferta de um ensino técnico profissionalizante atendia bem às necessidades de recursos humanos para o desenvolvimento econômico do país, em uma época em que o setor industrial se estabelecia como alicerce econômico para o desenvolvimento.

Nesse contexto, as primeiras duas LDBs (Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional), de 1961 e de 1971, propunham como objetivo preparar o indivíduo para sua futura integração profissional à sociedade. Entendemos como um dos papéis esperados para a escola nesse momento a formação de cidadãos preparados para enfrentar as dificuldades do mundo profissional e que fossem capazes de contribuir para o crescimento econômico do país. As funções associadas à produção e ao desenvolvimento industrial nessa época não demandavam um profissional que tivesse desenvolvido a fundo as funções cognitivas de criação e pensamento crítico, mas apenas alguém que soubesse realizar tarefas preestabelecidas. Um ensino que valorizava a memorização e a reprodução como resultados esperados para a aprendizagem não era recriminado, uma vez que tais operações cognitivas se mostravam suficientes para muitos desses cargos técnicos.

No entanto, na década de 1980 o cenário econômico mundial começou a mudar e, no Brasil, a década de 1990 foi marcada por uma revolução na maneira como a economia e as relações sociais começaram a se estabelecer. A era da tecnologia e da informação, que já havia dado seus primeiros passos e chegava ao Brasil criando novas necessidades, as quais o ensino tradicional, concebido para preparar para exames de vestibulares ou formar profissionais da indústria, não poderia suprir. O que se espera nessa nova era não é mais o que se esperava na era industrial. A quantidade de informação que passou a ser produzida e disseminada exige profissionais que saibam pesquisar, selecionar, analisar e que tenham autonomia para procurar e aprender o que for necessário. A memorização e a especialização técnica que atendiam bem à demanda da década anterior tiveram de dar espaço à apropriação de habilidades e competências diferenciadas. A escola tradicional devia ser repensada, e o olhar da população estava atento a essa necessidade. Essa atenção pública começa a se concretizar na LDB de 1996. Ao compararmos o primeiro artigo das três LDBs, de 1961, 1971 e 1996, que iniciam o capítulo sobre objetivos e organização do ensino para o nível do Ensino Médio, vemos que essa preocupação se torna evidente somente na última das três (LDB/1996):

Lei n. 4 024, de 20 de dezembro de 1961

Art. 33. A educação de grau médio, em prosseguimento à ministrada na escola primária, destina-se à formação do adolescente.

Lei n. 5 692, de 11 de agosto de 1971

Art. 21. O ensino de 2º grau destina-se à formação integral do adolescente.

Parágrafo único. Para ingresso no ensino de 2º grau, exigir-se-á a conclusão do ensino de 1º grau ou de estudos equivalentes.

Lei n. 9 394, de 20 de dezembro de 1996

Art. 35. O Ensino Médio, etapa final da Educação Básica, com duração mínima de três anos, terá como finalidades:

I. a consolidação e o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no Ensino Fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos;

II. a preparação básica para o trabalho e a cidadania do educando, para continuar aprendendo, de modo a ser capaz de se adaptar com flexibilidade a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores;

III. o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico.

Notamos que as duas primeiras LDBs fazem menção apenas a uma formação integral do adolescente, sem determinar o que seria ou o que envolveria tal formação. O primeiro artigo da LDB de 1996, no entanto, ressalta de forma clara as preocupações com o tipo de formação que se espera nesse nível, possivelmente reflexo de uma mudança de perfil do profissional que a nação precisa no momento.

Foi nesse contexto que, no final da década de 1990, os PCNEM são publicados, como a forma pública de realçar as novas expectativas de aprendizagem e para orientar professores e pesquisadores da área a fim de atender aos requisitos da LDB/1996.

O texto dos PCNEM está permeado pela ideia de que o ensino tradicional, pautado em memorização, reprodução e automação de procedimentos, se mostrava obsoleto perante a nova realidade. Se antes bastava ao profissional desenvolver tais funções cognitivas, agora elas se mostravam incapazes de embasá-lo cognitivamente de forma a garantir-lhe adequação profissional e social. Com as mudanças que surgiram por meio das novas tecnologias dinâmicas, o conhecimento aprendido na escola poderia se tornar insuficiente em poucos anos. O que fazer? A aposta dos educadores foi usar o conteúdo como matéria-prima para desenvolver habilidades e construir competências. Esses seriam os novos requesitos para a futura profissão, o prosseguimento nos estudos e a adequação social à nova realidade que se modificava pela maneira de compartilhar a informação. Em outras palavras, o conteúdo, pouco a pouco, foi perdendo *status* e dando lugar para as **habilidades e competências**, que começaram a se edificar como as novas bases de uma educação contemporânea. Um equívoco comum é pensar que o conteúdo deve ser abandonado por completo; não é esse o caso nem é o que consta nos textos da didática francesa, que possui uma escola de pensadores que defendem, estudam e pesquisam seriamente sobre o ensino por habilidades e competências. Conforme argumenta Perrenoud, sociólogo de referência nas pesquisas em educação e ensino:

[...] Para entender o mundo e agir sobre ele, não se deve, ao mesmo tempo, apropriar-se de conhecimentos profundos e construir competências suscetíveis de mobilizá-los corretamente?

[...] São múltiplos os significados da noção de competência. Eu a definirei aqui como sendo uma capacidade de agir eficazmente em um determinado tipo de situação, apoiada em conhecimentos, mas sem limitar-se a eles.

PERRENOUD, Philippe. *Construir as competências desde a escola*. Porto Alegre: Artmed, 1999.

Podemos usar como exemplo o ensino da cinemática. De acordo com a nova escola pedagógica, esse conteúdo não deve necessariamente ser deixado de lado, mas utilizado para propiciar aos estudantes uma oportunidade de desenvolver habilidades relacionadas à leitura de gráficos e tabelas. Comparar gráficos de movimento uniforme com movimento uniformemente variado, extrair valores de gráficos, como velocidade, deslocamento, aceleração, compreender o significado da inclinação e vértices, etc., são operações que, unidas, poderão ajudar o aluno a desenvolver a habilidade de trabalhar com gráficos. É muito provável que no futuro ele não se recorde dos conceitos, contudo as habilidades desenvolvidas e as competências construídas sobreviverão aos tempos posteriores à escola. Se esse for o caso, ao deparar com uma situação em que precise utilizar a habilidade de trabalhar com gráficos, ele será capaz de mobilizá-la e utilizá-la para a resolução do problema.

Assim, a educação tem como objetivo mudar a postura do indivíduo diante das situações, mesmo que corriqueiras. Habilidades e competências pressupõem autonomia e proatividade diante dos obstáculos. Essas características não são esperadas apenas no contexto profissional, mas também na convivência social. Se educação é de fato o que sobrevive no futuro quando o conteúdo ensinado já foi esquecido, ainda que o **o quê** tenha ficado no meio do caminho ao longo dos anos, o **como** deverá sobreviver e aumentar as chances de uma integração mais harmoniosa tanto no campo profissional como no campo social.

Como já enfatizamos, não devemos pensar que ensino por construção de competências se opõe à apropriação de conteúdos. A solução de problemas complexos indica a necessidade de um conhecimento profundo, sem o qual o profissional limita suas possibilidades de atuação. Todavia, esse conhecimento, de acordo com as ideias desse pensador, é um conhecimento adquirido não apenas durante os anos escolares, mas também ao longo da vida, por experiência, estudo e reflexão. A junção de conhecimentos e competências forma o perfil de um indivíduo **especialista competente**, aquele que possui um profundo conhecimento de seu campo de atuação, mas que, além disso, apresenta as competências requeridas para atuar, agir sobre a situação imposta e buscar novos conhecimentos quando necessário. No outro extremo estariam os eruditos puros, que compilaram, pela memorização, uma infinidade de saberes e são capazes de falar sobre esses conhecimentos e convencer os mais incrédulos, porém incapazes de colocá-los em prática de forma criativa e efetiva.

O ensino de Física no Brasil

Não há como saber com precisão o que ocorria nas salas de aula de Física do Ensino Médio brasileiro nas últimas décadas. O que pode ser feito é uma análise a partir de elementos que o influenciava. Entre eles, destacamos os livros didáticos e os grandes projetos. O que faremos a seguir é tentar, de forma sucinta, entender de que maneira as características dos livros e os projetos favoreciam ou não um ambiente para o desenvolvimento de habilidades e a construção de competências.

Os livros didáticos

Segundo a Teoria da Transposição Didática do pensador francês Yves Chevallard, o saber trabalhado pelo professor em sala de aula, denominado **saber ensinado**, é retirado quase integralmente de manuais escolares e livros didáticos, daí a importância de entender um pouco sobre a evolução histórica dos materiais de ensino.

Durante o século passado, até a década de 1960, os livros didáticos de Física destinados ao ensino secundário eram muito semelhantes aos compêndios usados para o ensino de Física em nível superior. Muitas vezes, eram resumos dessas obras que traziam apenas as noções gerais, sem o aprofundamento teórico e matemático mais avançado que os compêndios costumavam trazer. Os saberes presentes em seus capítulos eram dispostos de forma sequencial, linear e descritiva, propunham poucos exercícios aos alunos e as atividades experimentais eram descritas por meio de desenhos e esquemas de acordo com o experimento real, e não como uma atividade a ser realizada pelo aluno ou demonstrada pelo professor.

O livro didático para o Ensino Médio trazia tópicos cobertos pelos compêndios, ainda que de maneira superficial, em quantidade muito superior à encontrada nos livros didáticos contemporâneos. A lista de tópicos passava por toda a Física clássica, aplicações tecnológicas e Física moderna, tanto Física quântica como relatividade, todos expostos da mesma forma linear e sequencial. Não havia seções que propusessem atividades experimentais, pesquisas, trabalhos em grupo ou exercícios com enfoques diferenciados, não contemplando atividades favoráveis ao desenvolvimento de habilidades distintas. Com estrutura literária descritiva, não tinha um cuidado didático que considerasse as representações implícitas dos alunos, tampouco uma tentativa de adequação de linguagem que ponderasse o repertório de palavras e símbolos do aluno. Comparados aos livros atuais, era muito mais difícil para o professor a tarefa de selecionar conteúdos, não apenas pela quantidade de tópicos, mas também pela forma como o livro se organizava, sendo a leitura de um tópico pré-requisito para o seguinte, em uma sequência linear tanto de pré-requisitos como de grau de dificuldade. Além disso, a grande quantidade de conteúdos aliada ao baixo número de exercícios e a falta de propostas de atividades direcionadas aos alunos praticamente inviabilizava a concessão de tempo para o treinamento e a análise de que o aluno carece para desenvolver habilidades. Dessa forma, parece que a valorização da memorização de fórmulas e da reprodução de conceitos seriam um caminho "natural" para o professor de Física que se visse na obrigação de seguir a lista completa de assuntos oferecida por esses livros. Dada a limitação temporal imposta para ensinar a vasta gama de temas abordados, é pouco provável que o professor se dispusesse a refletir sobre alternativas de situações que favorecessem a transferência de habilidades, uma vez que isso poderia romper a sequência lógica predeterminada pelo livro. O encaminhamento de atividades experimentais não era sequer considerado, com a justificativa de que os experimentos já estavam descritos nos livros. Vale sublinhar que o valor didático de atividades experimentais destinadas ao ensino começou a ser reconhecido e se tornou popular apenas com o surgimento dos grandes projetos, conforme veremos a seguir.

Os grandes projetos

Na década de 1950 os Estados Unidos iniciaram uma reformulação radical no ensino de Ciências, migrando de uma abordagem embasada em livros didáticos para um projeto revolucionário que abalou as crenças mundiais sobre o ensino de Física. O projeto estadunidense, intitulado Physical Science Study Committee (PSSC), teve tamanha força didática que acabou por desencadear o investimento e a produção de projetos similares por todo o mundo, até mesmo no Brasil. Aliás, pode-se dizer que seu impacto gerou um estímulo enorme à investigação e à pesquisa em ensino de Ciências, incentivando jovens a ingressar em cursos de licenciatura, além de especializações e pós-graduações voltados ao ensino. Engessados pelo sistema educacional tradicional, os professores de Física rapidamente vislumbraram nesse projeto uma saída para a melhoria do ensino, pois reconheceram de pronto seu valor pedagógico. Em nível nacional houve tentativas da adoção completa do projeto norte-americano traduzido para o português no Ensino Médio, mas elas fracassaram pela falta de preparo dos professores e infraestrutura física e tecnológica precária das escolas da época. No final da década de 1960 e início da década de 1970 surgiram os primeiros projetos nacionais, como o Projeto Brasileiro de Ensino de Física (PBEF), o Física Autoinstrutiva (FAI), o Projeto de Ensino de Física (PEF) e o Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (Gref), como uma tentativa de adaptar os ideais originais do PSSC às necessidades e à realidade brasileira.

Pode-se dizer que os elementos didáticos que diferenciaram esses grandes projetos internacionais e nacionais da metodologia até então utilizada, além da óbvia busca por melhores resultados de aprendizagem, foram:

- a renovação da escolha dos conteúdos, que já esboçava uma preocupação em levar em consideração a realidade do alunado a que se destinava;
- a quantidade de problemas propostos aos alunos, que aumentou muito se comparada àquela presente nos antigos livros didáticos;
- o papel da atividade experimental no ensino, totalmente inovadora para a época, que coloca o aluno como protagonista do processo e o professor como mediador;
- a presença de vídeos que ajudavam a ilustrar fenômenos e conceitos;
- uma linguagem mais acessível ao aluno;
- a instrução explícita no texto para que a classe fosse levada ao debate direcionado de algum tópico.

Quando comparamos o ensino ancorado no antigo livro didático com as propostas trazidas pelos grandes projetos, os ganhos didáticos são claros e contemplam de forma mais satisfatória as características necessárias para o ensino por habilidades e competências.

Por que então os projetos não continuaram a ser utilizados?

Os idealizadores e formuladores dos projetos nacionais estudavam a fundo as teorias de ensino e aprendizagem, o que os capacitava a inovar, criar e identificar as vantagens desta ou daquela metodologia. No entanto, quando levados à escola, a realidade se impunha, revelando seus imprevistos estruturais, culturais e sociais. O professor, sozinho em sua prática de sala

de aula, reconhecia o ideal dos projetos, mas não se sentia capaz de implantá-los na realidade heterogênea e complexa que a ele se apresentava. Pode-se supor, portanto, que uma das razões do abandono dos projetos tenha sido a falta de preparo do professor em entender como adequá-los à realidade com a qual ele se defrontava. Além disso, a escola pedagógica, por habilidades e competências, ainda não havia se consolidado, e suas ideias ainda não haviam se difundido como hoje. Vale observar que a própria demanda profissional da época dos projetos nacionais ainda era a do profissional técnico, e não a do especialista competente. No entanto, é importante frisar que atualmente existe certo grau de pessimismo em relação à adequação pedagógica dos grandes projetos, tanto dos nacionais quanto dos internacionais. As falas chamam a atenção ao fato de que o cientista se prepara a vida toda para levar a cabo experimentos e que isso faz parte do dia a dia de sua profissão. Por isso, a simples transferência desse papel para o aprendiz é, no mínimo, questionável. No caso de não haver um preparo sólido do professor para que se torne capaz de ser mediador do processo, a inversão de papéis poderia cumprir um desserviço à educação.

Finalizando esta breve revisão sobre as influências dos antigos livros didáticos e dos grandes projetos para o ensino de Física e voltando o olhar para os dias atuais, é curioso notar que as tendências educacionais contemporâneas agregam muitos dos elementos históricos que passaram pelo ensino de Física nas últimas décadas. Entre elas, podemos citar: a volta da Física moderna e contemporânea, agora ressurgindo com força nos manuais escolares; a vasta gama de propostas de atividades experimentais, tanto com o caráter de demonstração por parte do professor como de investigação por parte do aluno; a indicação de vídeos, animações e simulações que auxiliam na visualização de fenômenos e conceitos físicos; a grande quantidade de exercícios propostos para os momentos de estudo dos alunos; a contextualização histórica e tecnológica da ciência, enfim, uma miríade de alternativas que busca no pluralismo metodológico uma saída para um ensino de qualidade.

A visão do ensino de Física

O estudo dos três textos publicados pelo MEC (PCN, PCN+ e as Orientações Curriculares para o Ensino Médio) revela pontos comuns entre eles e mostra claramente a escolha pela pedagogia do ensino por habilidades e competências. Esses pontos parecem sinalizar as características que seriam essenciais a uma nova concepção de ensino; além disso, apresentam sugestões sobre a maneira como o ensino de Física pode contribuir para que essa nova metodologia seja concretizada. São eles:

- a determinação de que se supere o ensino tradicional, profissionalizante ou propedêutico, e que se caminhe para um ensino que forme o indivíduo para a vida;
- a necessidade de um ensino que favoreça o desenvolvimento de habilidades, a construção de competências e a transferência de conhecimentos e habilidades para contextos não escolares;
- a seleção de conteúdos e sua contextualização usando o mundo vivencial dos alunos;
- ênfase na importância do ensino interdisciplinar;
- recomendação de um ensino que destaca o conhecimento gerado pela Física como sendo fruto de um processo histórico.

Os PCN podem ser encontrados em:

<http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=12598%3Apublicacoes&Itemid=1152>. Acesso em: abr. 2016.

Indicamos sempre uma leitura para atualização dos propósitos da sua prática.

3 Aprender e ensinar Física para quê?

Para os filósofos da ciência, a busca pelo conhecimento sobre o mundo costuma ter duas raízes: as tradições árabe e grega. A primeira teria um viés pragmático, associando a corrida pelo saber com necessidades sociais e econômicas, como a concepção e a elaboração de ferramentas, utensílios, produtos e tecnologias, sempre com o intuito de tornar a vida e a convivência social mais frutíferas e proveitosas. A segunda estaria relacionada a um prazer genuíno do ato de conhecer. De acordo com essa corrente de pensamento, o conhecimento do mundo que nos rodeia, assim como o autoconhecimento, ao proporcionar a contemplação da natureza exterior e interior, serviria de fonte de prazer, o que nos motivaria a querer saber sempre mais.

Seja pela tradição árabe, seja pela simples busca de prazer da antiga Grécia, o fato é que a humanidade não cessa sua ânsia pelo saber. Vidas inteiras dedicadas a pesquisas, investimentos gigantescos, esforços individuais e coletivos trouxeram um acúmulo de conhecimento que exerce uma enorme influência no estilo de vida e na estrutura da sociedade moderna. É difícil precisar a contribuição das Ciências da Natureza em todo esse patrimônio cultural, mas é evidente que desempenharam um papel importante nessa conquista.

Sondar razões para ensinar ou aprender Física demanda uma análise de características próprias da ciência. A seguir exploramos o mecanismo de funcionamento das Ciências Naturais e o utilizaremos na elaboração de argumentos que justifiquem o ensino e a aprendizagem de Física.

O senso comum e o método científico

As Ciências da Natureza, Física, Química, Biologia e suas ramificações mais recentes, como a Geologia e a Meteorologia, têm todas elas uma maneira particular de construir seu conhecimento e de ter acesso à natureza.

A origem da Física está geralmente atrelada à filosofia natural da Grécia antiga e frequentemente atribui-se o seu nascimento à vida e à obra de Aristóteles de Estágira (384 a.C.-322 a.C.). No entanto, a Física aristotélica, muito embora já exprimisse uma procura pelo conhecimento do mundo, ainda não era uma ciência tal qual entendida nos moldes modernos. A ciência moderna tem suas raízes bem depois dos tempos de Aristóteles, já no século XIII, com o frade e filósofo Roger Bacon (1214-1294), que concebeu uma metodologia inédita de obtenção e construção do conhecimento, o chamado método científico. Essa metodologia ganhou corpo e vida séculos depois nas mãos de Galileu Galilei (1564-1642), mostrando ser uma ferramenta poderosa em desvendar os mistérios e a lógica da natureza. Antes desse período, não havia uma compreensão clara sobre a necessidade da utilização de um método para a construção do conhecimento sobre o mundo. O método científico expôs a fragilidade do uso dos cinco sentidos, do senso comum e da lógica teórica como ferramentas de acesso às leis que regem nosso mundo. O método científico de Galileu era fundamentado na observação e na medição precisa dos fenômenos naturais, na ela-

boração de hipóteses seguida de testes experimentais controlados que pudessem validar ou rejeitar tais hipóteses, ou seja, tratava-se de um método que construía a ciência a partir da experimentação, do empirismo. Galileu, ao propor o famoso experimento de abandonar objetos de massas diferentes do alto da Torre de Pisa, pôde refutar, de maneira histórica, a ideia até então aceita de que a velocidade de queda dos objetos dependia de suas massas. Ainda que a hipótese anterior fosse mais compatível com o senso comum e tivesse a credibilidade de seu autor, Aristóteles, ela não sobreviveu à peneira experimental de Galileu. A partir de então, a necessidade de equipamentos que pudessem "observar" os fenômenos de forma mais precisa do que os cinco sentidos, assim como uma lógica fundamentada no empirismo, se tornaram essenciais para que a ciência pudesse progredir. O modelo corpuscular da luz, sugerido por um dos maiores nomes da ciência, Isaac Newton (1643-1727), que supunha a luz formada por minúsculas partículas, também sucumbiu a uma simples demonstração em fenda dupla realizada anos depois pelo físico experimental Thomas Young (1773-1829), demonstrando que a luz poderia ser entendida como uma onda.

Será que existe um método científico?

A exposição anterior pode passar a ideia da existência de um método científico sólido, fundamentado em receitas preestabelecidas, como observação, coleta de dados, formulação de hipóteses, teste experimental e reprodução de resultados. No entanto, a epistemologia já mostrou que essa visão conservadora do método científico, como aquele composto de passos bem definidos, está longe de ser o fator determinante para o avanço da ciência. O filósofo da ciência Alan Francis Chalmers (1931-), em seu livro – *O que é ciência afinal?* – aponta como um dos maiores fatores da credibilidade atual da ciência o equívoco comum de que seus conhecimentos sejam construídos seguindo-se os passos dessa metodologia de forma sistemática e mecânica. Ele menciona o fato de progressos importantes, como as inovações de Charles Robert Darwin (1809-1822), Albert Einstein (1879-1955) e do próprio Galileu, não terem sido realizados por meio nada semelhante ao método tipicamente descrito como sendo o científico. O filósofo francês Gaston Bachelard (1884-1962), no século passado, já chamava a atenção da comunidade científica ao afirmar que o avanço da ciência não se dá pelo simples acúmulo do conhecimento em conformidade com um método científico rígido, mas principalmente por rupturas com conceitos anteriores e reconstruções de ideias e concepções. Para ele: "[...] aceder à ciência é rejuvenescer espiritualmente, é aceitar uma brusca mutação que contradiz o passado".

De qualquer forma, quer se entenda o método científico como uma sequência de passos bem definidos, quer como uma evolução cheia de avanços, rupturas e aparentes retrocessos, o fato é que a ciência, e a Física em particular, realiza seu serviço de acesso à natureza com beleza e esmero.

As ideias de hipótese e modelo

A Física é a ciência natural que examina padrões na natureza e procura conhecê-la da forma mais precisa possível, além de contribuir de forma única para a produção e o desenvolvimento de tecnologias. Ela usa a sistematização da imaginação e do raciocínio lógico para elaborar e testar modelos.

A ideia de modelo em Física é de fundamental importância. Trata-se de uma invenção humana, fundamentada na criatividade, no conhecimento anterior, na intuição e no empirismo. Os modelos físicos estão em constante evolução e sujeitos a reformulações e refutações por meio de testes experimentais controlados. Eles, de forma geral, utilizam o poder de síntese e generalização da linguagem da Matemática e, por meio dela, a Física condensa seu conhecimento e elimina possíveis ambiguidades da escrita.

Um modelo físico está sempre apoiado em hipóteses científicas. Estas, para que se tornem fatos científicos, também deverão sobreviver aos testes experimentais. Ao se encontrarem evidências experimentais que as contradigam, as hipóteses devem ser abandonadas, independentemente da autoridade das pessoas que as defendem, tal como exemplificamos no caso da "disputa" entre Galileu e Aristóteles.

O progresso da ciência e a ideia de paradigma

As hipóteses, os modelos e a própria criatividade do pesquisador se assentam sobre o paradigma do seu tempo. Paradigmas são pressupostos e representações do pensamento que, por estarem enraizados na mente humana, são persistentes e difíceis de ser detectados. Acabam por conduzir a erros e falsas concepções de toda uma geração de cientistas. Por outro lado, por mais estranho que possa parecer, são justamente esses falsos paradigmas que fazem a ciência progredir durante um determinado período da História. No entanto, chegará um ponto em que a evolução da ciência deverá acontecer pela ruptura com essa crença, quando então um novo paradigma será instaurado, que deverá novamente abrigar o progresso da ciência até seu futuro abandono. Essa dialética é considerada fundamental para a evolução da ciência. Com isso em mente, constata-se que as teorias físicas, pelo menos suas partes explicativas, estão fadadas ao abandono no futuro, como deveria ser, uma vez que essas teorias, apesar da utilidade a que se prestam quando desenvolvem tecnologias e fornecem explicações do mundo, são, em última análise, invenções humanas. Sendo assim, as explicações que elas fornecem contêm as imperfeições e os preconceitos inerentes ao ser humano. A natureza, por sua vez, não está preocupada em como o homem tenta entendê-la, e é muito pouco provável que os modelos idealizados pelo ser humano um dia se tornem páreo para os mecanismos da realidade. O modelo atômico, por exemplo, evoluiu enormemente ao longo dos séculos, desde Demócrito de Abdera (460 a.C.-370 a.C.) e Leucipo de Mileto (480 a.C.-420 a.C.) até o modelo quântico moderno, passando a incluir e prever resultados que os modelos passados não previam. Mas é pouco provável que o modelo de átomo, tal como foi concebido pelo homem, um dia se iguale àquilo que poderia ser chamado de átomo real. Aliás, na natureza, o que existe não é o átomo inventado pelo homem, mas algo cujo comportamento se assemelha ao comportamento do átomo que inventamos. Portanto, está sempre aberta a possibilidade de surgir um novo fenômeno ou resultado que o modelo atômico atual não dê conta de explicar. Em outras palavras, usando os métodos da ciência, não temos como ter acesso direto à realidade. O que a ciência faz, e a Física em especial se mostra impecável nesta tarefa, é inventar modelos embasados em medidas precisas, porém indiretas, e, a partir daí, tentar predizer resultados e construir tecnologias. Uma teoria científica, por mais completa que possa ser considerada, nunca pode ser comprovada, apenas rejeitada. Um experimento não prova uma teoria, ele simplesmente diz que ela funciona naquele contexto e, assim, o resultado do experimento serve de indício

de que aquela teoria faz sentido. Contudo, uma vez que a possibilidade de surgir um resultado que a teoria não contemple está em aberto, sua comprovação definitiva nunca será alcançada. Mesmo teorias que se tornaram famosas e deram prestígio aos seus idealizadores, tal como ocorreu com a teoria da relatividade de Einstein, está sujeita a refutação por meio do teste experimental. Não deveria causar surpresa a notícia de que um neutrino ultrapassou a velocidade da luz, mesmo que essa seja motivada por um erro no cronômetro do satélite. A natureza não está preocupada com a fama da teoria da relatividade, ela se comporta da maneira como deve se comportar; nós é que estamos sempre correndo atrás de seus mistérios e à procura da lei final, que nunca deverá chegar.

Quais são os objetos de investigação da Física?

A Física é a ciência que se ocupa em investigar os fenômenos naturais, que são, de uma maneira simplificada, tudo aquilo que ocorre na natureza e que é passível de observação e reprodução controlada em laboratório. O simples cair de um objeto é um fenômeno natural, assim como a formação do arco-íris ou o decaimento radioativo de um átomo. A ocorrência do fenômeno natural pode ou não ter sofrido intervenção humana. A claridade do dia é um fenômeno natural, mas a claridade de uma sala iluminada por lâmpadas elétricas também é um fenômeno natural. Como se percebe, é muito vasto o campo de exemplificação de fenômenos naturais. Talvez seja esclarecedora a separação didática entre fenômenos físicos, biológicos e químicos. Fenômenos químicos estão mais ligados às combinações atômicas e às mudanças de composições da matéria, como, por exemplo, a combustão de uma folha de papel. Fenômenos biológicos dizem respeito à vida, tal como a reprodução, a respiração ou a fotossíntese.

Com o intuito de aumentar o número de objetos e fenômenos estudados pela Física, compilamos a seguir alguns exemplos, mas a lista é praticamente inesgotável, e uma das maiores ansiedades de cientistas e estudiosos contemporâneos nasce justamente da impossibilidade de conhecer todos os saberes construídos pela ciência.

- Existe um grupo de cientistas da Universidade de Chicago, nos Estados Unidos, que já estudou a espessura do fio de mel e a velocidade que ele escorre de uma colher, assim como a forma geométrica que toma quando vai sendo depositado na torrada.
- Na Universidade de Harvard, nos Estados Unidos, existe um grupo que estuda quão pequena uma gota de água pode chegar a ser, a relação de seu formato com as características da superfície na qual ela se apoia e as condições para que as gotas se aglutinem.
- Alguns cientistas, também da Universidade de Chicago, nos Estados Unidos, usando sensores e supercâmeras, mediram o tempo e a velocidade com que uma folha de papel vai sendo deformada por um peso colocado sobre ela. Por mais espantoso que possa parecer, a folha de papel pode ser comprimida por semanas ininterruptas antes de atingir sua espessura final. Esse mesmo grupo estudou e caracterizou as manchas esbranquiçadas comumente encontradas sobre a superfície do café quente.
- Outro grupo internacional de pesquisadores, com colaboradores brasileiros, desenvolveu a câmera mais potente do mundo com a finalidade de detectar a famosa energia escura, que compõe impressionantes 70% do conteúdo do Universo, mas que ainda é um mistério que intriga físicos e astrônomos de todo o mundo.

As declarações da ciência e a verdade absoluta

O termo **cientificamente comprovado** soa, para muitos, como algo impecável, sem falhas e de qualidade inquestionável. Para os cientistas, por outro lado, esse termo é desprovido de sentido, pois eles estão cientes da efemeridade das teorias científicas. É bem verdade que o conhecimento oriundo da ciência não se baseia no senso comum nem no achismo, mas daí a considerá-lo infalível está fora de cogitação. Ceder legitimidade e credibilidade não é o papel da ciência, mas sim buscar melhorias na qualidade de vida por meio da sistematização do saber conquistado e da criação de tecnologias. Recorremos ao humor aguçado de Alan Chalmers em uma declaração sobre essa banalização da ciência: "A ciência deve parte de sua alta estima ao fato de ser vista como a 'religião moderna', desempenhando hoje papel similar ao do cristianismo da Europa, em séculos passados.".

Quais são os produtos das Ciências Naturais?

Como vimos, a ciência é o mecanismo pelo qual a humanidade tem adquirido e organizado conhecimento sobre o mundo natural. Assim, o primeiro produto concreto da ciência é o próprio conhecimento. Este, por sua vez, pode contribuir para o desenvolvimento da própria ciência ou ser usado para desenvolver e criar tecnologias. A tecnologia, de seu lado, ajuda a prover ferramentas para que os cientistas façam mais ciência, ou pode se voltar à sociedade, suprindo necessidades de convivência, profissionais ou lúdicas. Nas linhas que se seguem exemplificaremos muitos dos produtos da ciência, tanto aqueles nativos de pesquisas científicas como outros relacionados a avanços tecnológicos.

Algumas tecnologias tiveram a capacidade de mudar a forma com que o homem lida com o mundo, alterando hábitos e costumes da sociedade. Um exemplo é a eletricidade e seus produtos, tais como o rádio, o telefone, a televisão, o computador, entre outros.

Na saúde e no bem-estar, as pesquisas da ciência e as produções tecnológicas também renderam desenvolvimento, possibilitando que muitos males e sofrimentos causados por enfermidades de toda ordem pudessem ser atenuados ou eliminados. Pesquisa em mapeamento genético, em composição de novos medicamentos ou novas formas de diagnósticos e tratamentos contribuíram para que o homem levasse uma vida mais saudável e aumentasse sua expectativa de vida.

Um subproduto tecnológico em particular merece destaque por ter colaborado de forma direta para a mudança de era da sociedade moderna. A internet, que conecta milhões de computadores e seus usuários em todo o planeta, tem um papel tão marcante que, por vezes, é citada como uma das principais causas da mudança de postura do homem atual, tanto nas situações profissionais como nas relações sociais. Factível graças aos avanços obtidos no campo de telecomunicação e processamento de dados, a internet dispõe de um aglomerado de informações sem precedentes na história da civilização. A disponibilidade de informação em *sites* sociais, comerciais, educacionais, políticos, entre outros, mudam de forma dinâmica a maneira como o cidadão procura soluções, entretenimento, produtos, além de alterar de forma radical o modo pelo qual se comunica com seus semelhantes.

Sendo a tecnologia o assunto em pauta, não podemos deixar de mencionar um dos representantes que melhor exprime o alcance da tecnologia atual. A Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (Cern), maior laboratório de Física de partículas do mundo, localizado em Genebra, na Suíça, ficou mundialmente conhecido por abrigar um dos produtos tecnológicos mais extraordinários já produzidos pelo ser humano: o LHC (Grande Colisor de Hádrons). O LHC ganhou fama por ser a máquina mais cara e de maior extensão já construída. Seus 27 quilômetros em forma de circunferência estão encobertos em um túnel a mais de 100 metros abaixo do solo terrestre. O Cern, com mais de 2 400 funcionários, possui inúmeros projetos de pesquisa em andamento, os quais envolvem mais de 10 mil pesquisadores, incluindo cientistas brasileiros. Assim, em 1990, Tim Berners-Lee, motivado pela necessidade de estabelecer comunicação entre departamentos do Cern e assim conseguir um compartilhamento mais rápido e eficiente de documentos de pesquisa, idealizou a WWW, sigla para World Wide Web, o sistema de redes da internet mais usado. Dessa forma, pode-se afirmar que o Cern produziu a maior máquina do mundo, o LHC, e o sistema de redes mais usado. Muitos se espantam quando se dão conta dos propósitos da construção do LHC. Tamanho investimento para detectar destroços de colisões entre partículas que nem ao menos conseguimos ver a olho nu! Qual é o sentido de tudo isso? Uma vez mais devemos recordar as razões que impulsionam a busca pelo saber: fins práticos, de ordem social e econômica, expressos pela tradição árabe ou a busca pelo conhecimento como fonte de prazer, conhecida como tradição grega. Muito provavelmente são essas razões que impulsionaram a humanidade em realizar um feito tecnológico desse porte. Seja como for, é simplesmente incrível, mesmo na visão dos cientistas, conceber que o ser humano tenha conseguido, em tão poucos anos, do início da sistematização da ciência com Galileu, construir a vasta gama de conhecimentos que viabilizou a concretização de tantos produtos tecnológicos.

Finalizando essa passagem sobre os produtos da ciência, vale citar algumas previsões feitas por cientistas com respeitada reputação na comunidade acadêmica, como é o caso do físico teórico norte-americano Michio Kaku (1947-). Em suas publicações, ele reúne tecnologias já em uso nos mais avançados laboratórios e centros de pesquisa com o intuito de vislumbrar o que será possível realizar no futuro. Suas previsões agregam façanhas tecnológicas inimagináveis ao homem moderno. Um escudo, muito similar a qualquer um utilizado nas séries de ficção, invisível e ultrarresistente, será possível graças às malhas de nanotubos que lhe conferem transparência, ao mesmo tempo que o tornam milhões de vezes mais resistente do que o aço. O escudo poderá contar com uma janela de plasma que evitaria o ingresso de ar e incineraria instantaneamente qualquer objeto que tentasse atravessá-lo. O escudo contará ainda com as propriedades das moléculas fotocromáticas, tornando-se opaco quando o *laser* do inimigo tenta atravessá-lo. Além do escudo, a levitação magnética é outro futuro real nas previsões de Kaku; os supercondutores feitos de cerâmica tornariam a levitação de objetos imantados um elemento comum do cotidiano. Na China, o trem Maglev, que usa a tecnologia de levitação magnética para fazer com que o trem literalmente flutue sobre os trilhos, já é uma realidade; ele atinge velocidades altíssimas graças à ausência de atrito cinético e já transportou, desde sua inauguração em 2003, mais de 2 milhões de pessoas. Mas Kaku preconiza o barateamento dessa tecnologia e seu uso também em carros e ônibus. A levitação magnética já é feita, no ambiente de laboratório, com seres vivos. Sapos e rãs ficaram suspensos no ar pela força magnética invisível que contrabalanceava o peso deles. De acordo com Kaku, o último feito da levitação magnética foi suspender no ar um lutador de sumô de mais de 100 quilos! Mas para quem acha o escudo e a levitação surpreendentes, a invisibilidade, viável graças ao desenvolvimento dos metamateriais, levaria a ficção científica ao mundo real e faria a imaginação voar nas possibilidades, éticas e não éticas, de seu uso. O metamaterial, por possuir índice de refração negativo, direciona a trajetória da onda eletromagnética de tal modo que ela contorna o objeto e sai do outro lado, na mesma direção que teria caso o objeto não estivesse lá. Assim, um observador na frente do objeto poderia ver tudo o que está atrás dele, o que faz com que o objeto em si desapareça! Porém, toda essa tecnologia, que mais parece magia, torna-se insignificante quando Kaku prevê o que ele nomeia como replicador. Uma máquina que possuiria cartuchos de átomos de todos os elementos químicos, os quais poderiam ser manipulados por nanorrobôs, e seria capaz de construir qualquer coisa feita de átomos. Se você quisesse um relógio, por exemplo, bastaria selecioná-lo no *display* e, em poucos minutos, o replicador o construiria para você! Literalmente qualquer coisa que seja feita de átomos, ou seja, todos os objetos físicos que conhecemos.

O que se pode conseguir quando se sabe Física?

Os benefícios de quem sabe Física podem ser agrupados em duas categorias. A primeira trata da interação do indivíduo com o meio em que vive, representada pela alfabetização tecnocientífica, e a segunda está ligada ao seu desenvolvimento cognitivo.

Alfabetização tecnocientífica

O mundo está repleto de tecnologias, na forma de processos ou produtos tecnológicos. Os conceitos da Física estão presentes em praticamente todos esses processos e produtos, portanto uma interação mais harmoniosa com a tecnologia moderna passa necessariamente pela aprendizagem dessa ciência.

Por exemplo, saber Física facilita a leitura de manuais de aparelhos elétricos e eletrônicos, assim como a de contas de consumo, uma vez que a linguagem de manuais e contas de consumo utiliza os mesmos elementos da linguagem da Física, como tabelas, gráficos e unidades de medida.

O princípio de funcionamento dos motores a combustão, dos geradores e motores elétricos, dos aparelhos elétricos e eletrônicos e dos processos de produção, transformação e transmissão de energia são todos fruto de conceitos físicos. Esses produtos e processos devem boa parte de sua idealização e implantação ao entendimento proporcionado pela Física. Sem uma mínima noção de conceitos de Eletricidade, Mecânica e Termodinâmica não há como haver uma compreensão, ainda que básica, de todos esses processos, tampouco um uso consciente deles.

Parece que sem a compreensão mínima, não apenas da Física, mas das Ciências Naturais, será difícil haver segurança ao opinar em situações como construção de usinas e barragens, exploração de recursos naturais, planejamento urbano, entre outras decisões que podem afetar o bem-estar da sociedade e do planeta. Muitos dos problemas ambientais modernos podem ser solucionados com a contribuição da Física, assim, a compreensão tanto do problema quanto de sua solução passa pelo entendimento de conceitos e leis físicas.

Além de tudo isso, a alfabetização tecnocientífica confere entendimento dos fenômenos típicos do mundo em que vivemos. As razões anteriores estão ligadas ao senso prático, mas devemos considerar o conforto intelectual obtido ao se compreender a natureza e o Universo que habitamos. Encontrar explicações razoáveis aos fenômenos naturais poderá proporcionar o prazer da contemplação, conforme a tradição grega. Para os físicos, o impacto visual gerado ao se presenciar auroras polares, eclipses, o azul do céu e do mar, o verde das plantas e o espaço além do Sistema Solar anda lado a lado com a satisfação intelectual de conhecer razões que explicam todos esses fenômenos naturais.

Finalmente, a alfabetização tecnocientífica ajuda a prevenir contra os malefícios da pseudociência. Infelizmente existem pessoas que usam a má informação alheia para enganar, ludibriar ou trapacear. De posse de jargões e conceitos da ciência, que por vezes não são bem entendidos, mas conferem credibilidade e legitimidade a um produto ou serviço, pseudocientistas iludem os menos precavidos. Livros sobre cura quântica são lançados como se a Física quântica tivesse a saúde humana como objeto de investigação! Ora, não existe nenhum artigo científico publicado em periódico reconhecido pela comunidade científica que junte estes dois objetos, Física quântica e pensamento. Quem estuda Física reconhece quando hipóteses ou modelos não são científicos, pois percebe que não existe maneira de testá-los. Percebe quando a afirmação é vazia, desprovida de conexão lógica com os conceitos científicos. Evita, dessa maneira, que venha a ser lesado pela má intenção de alguns. O que, porém, dissemos não elimina a possibilidade de o pensamento positivo poder, de fato, propiciar ganhos profissionais e econômicos. O que defendemos é que não se deve utilizar o nome da ciência para creditar produtos e serviços quando estes não são objetos de investigação da ciência. Pode até ser que pensamento positivo ajude a trazer realizações materiais para uma pessoa, mas tal afirmação nunca foi testada pela ciência e, no nível tecnológico em que ela, ciência, se encontra, não há como visualizar um futuro próximo no qual esse teste possa ser feito.

Ganhos cognitivos

Sabe-se que a capacidade cognitiva de uma pessoa está associada, entre outros fatores, com os caminhos sinápticos que já se estabeleceram e que estão se estabelecendo no cérebro. Atividades que exigem e desafiam o nosso intelecto estimulam o aparecimento de caminhos sinápticos. Para o psicólogo e mestre em Educação Marcos Meier, são quatro fatores que se relacionam ao desenvolvimento da inteligência: a diversidade e a intensidade de estímulos, a conquista de desafios, a superação de dificuldades e a resolução de problemas. Sendo assim, a Física se mostra um terreno fértil para o aprimoramento cognitivo, uma vez que a apropriação de seus saberes passa naturalmente por situações que favorecem o aparecimento dessas quatro exigências sugeridas por Meier. A Física é um conhecimento construído que, não raramente, desafia o senso comum e se torna contraintuitivo. Conhecer suas leis já é, em si, um desafio a ser conquistado. Certamente exigirá a resolução de problemas por parte do candidato a detentor de seus saberes. Não se colocam exercícios em livros de Física para fazer parecer que a Física é trabalhosa. Isso ocorre por se ter consciência de que a resolução de problemas de naturezas diversas pode auxiliar na assimilação das várias facetas de um mesmo conceito físico.

Ao estudar Física, o aluno se depara com situações reais e irreais, simples e complexas, intuitivas e contraintuitivas, comuns e incomuns, microscópicas e macroscópicas, conceituais e matemáticas, tangíveis e intangíveis, universais e particulares, o que ajuda a fortalecer sua capacidade de imaginação, outra ferramenta fundamental para a saúde cognitiva. Todas essas circunstâncias oferecem uma composição de estímulos que ajuda o estudante a desenvolver a capacidade de abstração e de generalização, mais duas ferramentas cognitivas imprescindíveis para a compreensão das leis físicas e para a o fortalecimento da cognição.

O desenvolvimento e a apropriação de habilidades lógicas e simbólicas é outro benefício decorrente do estudo da Física. Ela é a ciência natural que usa de forma mais frequente e acentuada a lógica e os símbolos da Matemática para quantificar fenômenos, condensar resultados e fazer previsões por meio de equações, gráficos e tabelas. As habilidades necessárias à manipulação de símbolos e o domínio da linguagem matemática desempenham um papel relevante no intelecto humano e poderão ser utilizados em diferentes contextos profissionais e sociais.

A criatividade é outro ganho intelectual que poderá ser proporcionado pelo estudo dessa ciência. Em nível cognitivo, a criatividade está embasada no pensamento divergente, aquele que considera as mais variadas possibilidades antes de escolher a que melhor se adapta à situação dada. A Física, por se originar de invenções humanas, representadas por modelos, leis e teorias, exige daquele que a estuda e a constrói uma reflexão constante a respeito das inúmeras explicações que poderiam ser dadas a um mesmo fenômeno, até que se chegue a um consenso, ou seja, o pensamento divergente é uma constante daquele que faz ou que estuda a Física. Para Alan Chalmers, citado anteriormente, a postura do cientista é aquela que se dispõe a questionar o fato dado, a reexplicar o já explicado, a recriar o já criado. Para Bachelard, também já citado neste tópico, o homem movido pelo espírito científico deseja saber mais e mais, porém para, imediatamente, melhor questionar o mundo a sua volta.

Por fim, a Física, ao abordar fenômenos de grande e pequena escala com o uso da mesma metodologia e linguagem, favorece uma visão de unidade no todo, o que auxilia no desenvolvimento da capacidade de síntese, outra ferramenta de valor inestimável para a cognição humana.

Procuramos mostrar o poder que a Física tem como ferramenta de desenvolvimento cognitivo. Obviamente não se quer dizer com isso que essa seja a única via de acesso ao desenvolvimento da cognição. Muitas das funções mentais levantadas e outras complementares a essas poderão ser trabalhadas em outras áreas de estudo, como a linguagem e as Ciências Humanas, colaborando para uma formação holística do intelecto.

Aprender Física é realmente para poucos?

A visão da Física como uma ciência a ser aprendida por poucos é um mito que deve ser superado. Obviamente existem pessoas que apresentam mais aptidão para algumas áreas, que parecem ter mais facilidade para entender assuntos que exigem habilidades específicas. Assim, há indivíduos que desenvolvem o lado artístico muito rapidamente, aqueles que têm uma propensão até genética para o esporte e outros que parecem ter nascido com uma facilidade acima da média para compreender assuntos que demandam o uso da inteligência lógica ou simbólica. Todavia, as pesquisas do psicólogo Howard Gardner desmistificaram a crença de que a inteligência é estática, de que o sujeito está condenado a ter como inteligência apenas aquela detectada na infância. Suas pesquisas

indicam que qualquer pessoa saudável pode desenvolver qualquer uma das inteligências múltiplas, a saber, a inteligência lógico-matemática, a linguística, a interpessoal, a intrapessoal, a musical, a cinestésica-corporal e a inteligência espacial. O mito que prega que aprender Física é difícil está ancorado em outro mito: o de que a inteligência é estática e não passível de desenvolvimento. A própria conscientização, por parte do estudante, de que sua inteligência pode se desenvolver lhe confere motivação para buscar os meios para isso, o que já o diferencia daquele que acredita na estagnação cognitiva. Tomar consciência da aptidão que surge na infância de forma natural pode ser importante no momento da escolha da profissão, mas não deve servir de justificativa para não aprender algo. Em princípio, qualquer pessoa é capaz de aprender qualquer coisa, contanto que siga as exigências impostas para a aprendizagem desse assunto. Dessa forma, a união da força de vontade por parte dos estudantes com a boa vontade por parte do professor pode servir de fator decisivo à superação dos obstáculos inerentes ao processo de ensino e aprendizagem de Física.

4 O Novo Enem

Um pouco da história do Enem

O Enem (Exame Nacional do Ensino Médio) foi criado em 1998 com o *status* de primeira prova unificada do Brasil. Seu objetivo inicial era avaliar anualmente a qualidade de aprendizagem dos alunos do Ensino Médio e, com isso, estabelecer critérios para a elaboração de políticas públicas visando à melhoria do ensino.

As provas do Enem, entre os anos de 1998 e 2008, continham 63 questões dispostas de forma sequencial, sem separações em disciplinas escolares ou áreas específicas do conhecimento. Nas primeiras versões, o Enem testava habilidades mais gerais, como a interpretação de tabelas, gráficos e textos, assim como a resolução de problemas simples da vida real do aluno. Essas primeiras habilidades avaliadas demandavam muito pouco do conteúdo específico ministrado no Ensino Médio.

Em 2008, o Ministério da Educação apresentou uma proposta de reestruturação do Enem, que passou então a ser chamado de Novo Enem e começou a ser aplicado em 2009. A prova do Novo Enem é composta, desde então, de 180 testes de múltipla escolha, divididos em quatro áreas de conhecimento: Ciências da Natureza, Ciências Humanas, Linguagens e Matemática, além da prova de redação. Em sua nova estrutura, o Enem traz, além do intuito original de avaliar o Ensino Médio em âmbito nacional, a possibilidade de ser utilizado como ferramenta de seleção para o ingresso do estudante no nível superior. O novo exame, apesar de também testar habilidades, passa a contar com uma lista de conteúdos muito mais extensa do que a utilizada em sua versão antiga. Na visão de muitos professores e educadores, essa nova lista de conteúdos seria equivalente àquela cobrada pelo vestibular tradicional.

Um dos principais objetivos da nova estrutura do exame foi a democratização da concorrência às vagas das universidades públicas federais, conseguida por meio da mobilidade acadêmica. A ideia de centralizar o acesso ao nível superior em um único exame facilita muito o ingresso em universidades públicas. Antes do Novo Enem, para conseguir uma vaga em qualquer uma dessas universidades, o aluno costumava realizar vestibulares diferentes, uma vez que cada instituição tinha o próprio processo seletivo. As provas de seleção tinham suas especificidades de conteúdo e forma e aconteciam em datas e locais diferentes. Além disso, o aluno se via obrigado a pagar a taxa de inscrição de cada um desses vestibulares e ainda os custos de transporte e alojamento nas diferentes cidades onde aconteciam as provas. O exame unificado eliminou as inúmeras taxas de inscrição e o desgaste de várias viagens ajudou o aluno a focar seu estudo em apenas um modelo de prova. O número de inscritos no Enem vem aumentando muito desde a sua primeira edição. O Novo Enem, que desde 2009 é a porta de entrada de inúmeras universidades públicas, atraiu ainda mais interessados, o que contribuiu para um enorme crescimento no número de inscrições. A edição de 1999 contou com a participação de pouco mais de 340 mil candidatos, ao passo que 2015 atingiu a marca impressionante de 8,4 milhões de inscritos.

Outra meta do MEC com a oficialização do Enem como exame de ingresso no nível superior é fazer com que o vestibular tradicional, com o passar do tempo, deixe de ditar a escolha curricular do Ensino Médio. A intenção é mudar a forma como o conteúdo é cobrado nos vestibulares e assim reorganizar a grade curricular do Ensino Médio. O vestibular tradicional costuma cobrar uma quantidade enorme de conteúdos, sem se preocupar com as habilidades necessárias para a resolução de suas questões. No lugar dessa prova, as questões do Enem são pautadas em habilidades. A prova do Novo Enem, diferentemente dos vestibulares tradicionais, exige mais raciocínio do que memorização. A expectativa é que o fato de o Enem ser um exame que requer habilidades mais do que memorização ajude a mudar o perfil curricular do Ensino Médio. Por ser o exame que avalia a qualidade da aprendizagem ao mesmo tempo que abre as portas de grandes universidades do país, nada mais natural que as escolas, tanto públicas quanto privadas, comecem a direcionar seus esforços para um ensino por habilidades. Nessa nova perspectiva, o conteúdo do Ensino Médio passaria a ser utilizado apenas como meio a partir do qual se desenvolvem habilidades, deixando de ser o objetivo final de aprendizagem. Isso implica mudanças nas próprias expectativas de aprendizagem, o que, por conseguinte, conduz a uma reforma curricular. Algumas escolas já iniciaram um movimento de mudança das estratégias didáticas e já começam a fazer uma seleção mais criteriosa de conteúdos. Muitos professores já percebem a necessidade de um ensino que atenda aos novos objetivos educacionais que vieram com o Novo Enem. Dessa forma, entendemos que, aos poucos, o propósito de mudança curricular do Ensino Médio, tão almejada pelo MEC, esteja se concretizando.

Enem *versus* vestibular

Pesquisas em ensino de Física têm apontado, frequentemente, a relevância de um ensino com significado, com sentido. Conforme discutido no tópico 2 deste Manual, ainda que as funções cognitivas de abstração e generalização sejam inerentes à ciência, o início da aprendizagem deveria necessariamente ser contextualizado, provido de sentido e significado para o aluno. É importante que se

entenda que o ensino em questão é aquele destinado a jovens e crianças que não necessariamente possuem já estabelecidas habilidades lógicas e simbólicas. O ensino de Física desprovido de contexto, nesse nível, favorece apenas estudantes que possuem aptidão natural para abstração, além de uma inteligência lógico-simbólica já requintada. Seria algo semelhante a um professor de Educação Física que esperasse de seus alunos um alto rendimento em corrida de longa distância. Tais professores conseguiriam, quando muito, fazer o aluno acreditar que não é capaz de aprender Física, mito já contra-argumentado no tópico 2 deste Manual ou, no outro exemplo, de que ele seja incapaz de praticar esporte. Ora, a abstração, a generalização e o domínio da linguagem lógico-simbólica até podem fazer parte do *hall* de objetivos do professor de Física, contanto que ele perceba se tratar de funções mentais que serão desenvolvidas com o tempo, com experiência, com prática e familiaridade. Dessa forma, um ensino inicial deveria levar em conta as representações já formadas do aluno, as vivências já significadas por ele, além da realidade social e profissional dele e de seus familiares.

Até certo ponto, o vestibular tradicional influencia negativamente a prática do professor. Na tentativa de cumprir a meta preestabelecida pelo vestibular que cobrará uma quantidade exorbitante de assuntos, o professor pode se ver sem saída, direcionando então a sua prática para um ensino descontextualizado, valorizando procedimentos mecanizados de uso de fórmulas sem preocupação com o entendimento de conceitos. Por vezes, transmitem maneiras de fazer com que os alunos cheguem à resposta esperada pela questão do vestibular sem a compreensão subjacente do significado dessas respostas. Em outras palavras, o vestibular tradicional, ao ditar um currículo conteudista e extenso como faz, acaba induzindo um ensino também conteudista, com pouca ou nenhuma significação para o aluno. Tal ensino favorece funções como memorização e reprodução automatizada de procedimentos matemáticos e, dessa forma, privilegia estudantes com natural aptidão para esse tipo de linguagem. Um ensino nesses moldes vai na contramão do destaque atual que se dá à importância de um ensino que atribui sentido e significado aos conceitos físicos.

Uma saída plausível para tal impasse seria a incorporação de um ensino por habilidades. Mas, para tanto, esse modelo de ensino deveria garantir o ingresso do aluno em nível superior e, portanto, a seleção para o nível superior deveria ser realizada por uma prova que organizasse a cobrança dos conteúdos em torno de habilidades. Sendo assim, um exame baseado em habilidades, como se diz o Enem, traz consigo a esperança do fim do problema exposto anteriormente. Uma prova que cobra habilidades favorece um ensino também por habilidades, assim como a prova conteudista do vestibular favorece um ensino também conteudista. Conforme já discutido no primeiro tópico deste Manual, toda habilidade demanda conhecimento e, de maneira geral, quanto mais complexa a habilidade, mais profundo é o conhecimento por ela requisitado. No entanto, um ensino por habilidades traria vantagens claras nesse cenário perturbador do vestibular definindo currículos. Uma vez que uma mesma habilidade pode ser encontrada em diversos saberes e utilizada em diferentes contextos, podem-se usar conteúdos diferentes para o desenvolvimento de uma mesma habilidade. Portanto, não é o caso de abandonar os conteúdos, mas agora existe a possibilidade de selecionar aqueles que funcionarão como matéria-prima para o desenvolvimento de habilidades nos alunos. A premissa pedagógica é que habilidades são mais facilmente transferíveis entre contextos do que conteúdos memorizados e desprovidos de significados. Uma vez incorporada uma habilidade, caso surja uma situação na qual o indivíduo ainda não a tenha utilizado, ele seria capaz de mobilizá-la e transferi-la para esse novo contexto. Com isso, o professor se vê desobrigado de transmitir exaustivamente a vasta lista de conteúdos cobrados pelo vestibular tradicional, bastando para tanto que ele escolha os conteúdos e os assuntos que propiciem ao aluno situações tais que estimulem o desenvolvimento e a apropriação de habilidades. Além dessa vantagem, vale lembrar outro diferencial citado também no tópico 1 deste Manual: o mercado tem se dinamizado enormemente a partir da era da informação, de tal modo que os conteúdos escolares têm papel cada vez menos relevante no exercício da profissão. É bom que se diga, no entanto, que o ensino por habilidades também tem seus problemas e complicações. Se por um lado atenua a questão do currículo conteudista criado pelo vestibular tradicional, por outro é um modelo de ensino que demanda domínio pedagógico amplo do professor que deseja implantá-lo. A força da tradição é uma barreira difícil de ser rompida; existe uma resistência muito grande por parte dos próprios professores em mudar seus esquemas já consagrados de aula, de arriscar uma nova metodologia que possa comprometer a validação de seu trabalho. O ensino por habilidades e competências demanda esforço e dedicação que, em muitos casos, o professor não se vê disposto a empreender. Talvez se trate de uma fase de transição e que aos poucos a escola pedagógica do ensino por habilidades comece a ganhar mais adeptos, passando a se estabelecer como referência real para a sala de aula. Casos bem-sucedidos de professores que se arriscam a uma prática inédita como esta podem servir de exemplo a ser seguido por outros que também se mostram abertos para mudanças, que acreditam na melhoria de um ensino por habilidades, mas que ainda não se sentem preparados para cumprir as exigências dessa prática inovadora. Nesse quadro, a pesquisa em ensino e estudo de casos, em particular aquela dirigida ao papel das habilidades na aprendizagem e as respectivas estratégias didáticas que ajudam a promover tal ensino, merecem atenção especial e divulgação ampla entre o corpo de professores do Ensino Médio.

Habilidades e o conceito de especialista competente

Existem muitas pesquisas já publicadas sobre as características cognitivas e intelectuais do que os educadores denominam especialistas competentes, pessoas que, além de um profundo conhecimento de seu campo de atuação, apresentam habilidades essenciais em torno das quais todo esse conhecimento está organizado. São as habilidades que tornariam o conhecimento vivo, útil e prático. O conhecimento do especialista não corresponde à soma de fatos ou proposições, ou a uma lista de fórmulas relevantes, mas sim de contextos de aplicabilidade, ou seja, o conhecimento é condicionalizado a um conjunto de circunstâncias e mobilizado por intermédio de habilidades. Em pesquisa publicada no artigo de um periódico reconhecido internacionalmente, *Journal of Educational Psycology*, cuja problemática era diferenciar historiadores novatos de historiadores especialistas, foi constatado que o grupo de novatos obteve maior rendimento em testes factuais, que exigiam apenas memorização de fatos e datas. Por outro lado, os especialistas competentes obtiveram rendimento bastante superior quando a tarefa era a análise de documento histórico, o que demanda habilidades mais profundas e sofisticadas. Foi também verificado que, uma vez que os especialistas procuram entender o problema em vez de pular imediatamente para estratégias de resolução, por vezes levam mais tempo que os principiantes para conseguir as respostas, porém, para o especialista, a resposta costuma ter um significado bem claro, enquanto o principiante nem sempre

consegue discorrer sobre o significado da resposta obtida. Outra característica importante do especialista competente é que ele costuma ter uma consciência bem definida do limite de seus saberes. Tem ciência do alcance de seu repertório de conhecimento, mas também conhece as ferramentas necessárias para aprender o que lhe falta.

Com base no exposto, podemos inferir que um ensino que vise ao desenvolvimento de habilidades parece se uniformizar com a formação de futuros profissionais especialistas e competentes. Um exame que apresente situações-problema contextualizadas parece, em princípio, favorecer estudantes que estejam no caminho de se tornar profissionais competentes. Verificar operações mentais que utilizem o conteúdo escolar como matéria-prima, em vez de verificar conteúdos memorizados e procedimentos automatizados, também parece ser o caminho para uma avaliação que instigue uma formação significativa do jovem estudante. Dessa forma, em que pesem todos os problemas estruturais e políticos que a iniciativa pioneira tem sofrido desde a sua concepção, é plausível pensar que o Novo Enem foi uma das medidas mais relevantes do governo na direção da melhoria do ensino no país e deverá ter grande impacto na qualidade de nossos futuros profissionais.

Avaliação e TRI

O Enem tem sua avaliação fundamentada na Teoria da Resposta ao Item (TRI), elaborada nos anos 1950 no campo da Psicologia, e cujo aperfeiçoamento possibilitou sua ampla utilização em avaliações nacionais e internacionais. No Brasil, além do Enem, a TRI é também utilizada para a elaboração do Exame Nacional para Certificação de Competências de Jovens e Adultos (Encceja), do Exame Nacional de Avaliação dos Estudantes (Enade) e da Prova Brasil (Sistema de Avaliação da Educação Básica). No exterior a TRI é utilizada na elaboração de exames importantes, como o exame SAT (teste educacional que serve de critério de ingresso nas universidades estadunidenses), o Toefl (teste utilizado para avaliar o potencial de falar e entender o inglês em nível acadêmico) e o Pisa (teste que avalia estudantes de todo o mundo em habilidades relacionadas à Matemática, às Ciências e à leitura).

No Toefl, por exemplo, os alunos marcam o horário em um dos centros credenciados e podem realizá-lo várias vezes ao ano. A prova é feita no computador, e cada candidato responde a um conjunto diferente de itens. Apesar de os candidatos receberem provas diferentes, todos os resultados são comparáveis entre si. Assim, em princípio, poderia ser dito que duas pessoas que obtiveram o mesmo *score* nesse teste, ainda que tenham realizado provas distintas, apresentam o mesmo potencial em falar e entender o inglês acadêmico. Outro exame importante, e com muitas características comuns com o Enem, é o SAT. Esse é um exame educacional padronizado dos Estados Unidos, aplicado para estudantes do Ensino Médio e que serve de critério para admissão nas universidades do país. O exame ocorre sete vezes ao ano. Novamente, apesar de aplicações realizadas em momentos distintos e com provas diferentes, a existência de uma escala-padrão viabiliza a comparabilidade de desempenho entre os alunos.

A maior razão pela escolha da TRI em detrimento de outras teorias clássicas sobre avaliação é justamente essa vantagem de admitir a elaboração de provas diferentes para o mesmo exame, as quais poderão ser aplicadas em momentos distintos graças ao fato de apresentarem o mesmo grau de dificuldade, assegurando assim a comparabilidade dos resultados. Outra grande vantagem é o fato de essa ferramenta ser adequada para avaliar habilidades em vez de conteúdos memorizados.

Nessa teoria, cada uma das questões de múltipla escolha da prova é denominada item. Diferentemente de um teste comum, a nota do Novo Enem não representa a simples proporção de itens que o estudante acertou na prova. A média obtida não depende apenas do número de itens respondidos corretamente. Essa média leva em conta também a dificuldade dos itens que se erra ou se acerta, além da consistência e da coerência entre esses acertos e erros. Até mesmo o acerto casual, o famoso chute, é previsto pela TRI. Parece contraditório uma pessoa ser capaz de nadar mil metros sem parar, mas não ser capaz de nadar quinhentos metros sem parar. Da mesma forma, espera-se que um candidato que responda corretamente a um item que exija domínio amplo de uma habilidade seja também capaz de responder corretamente a outro item que cobre a mesma habilidade, porém em um nível inferior. Caso isso não ocorra, a TRI considera que o acerto no item de alta complexidade possa ter sido casual (chute), e o cálculo do desempenho final leva isso em consideração. Sendo assim, dificilmente dois alunos que tenham acertado o mesmo número de itens conseguirão o mesmo resultado na média final.

Para que um item possa fazer parte da prova do Enem, o elaborador de item deve seguir uma lista de recomendações durante sua concepção. Hoje existem oficinas que visam preparar professores dispostos a elaborar um item com as características necessárias para se adequar ao Enem. Ainda assim, não é garantido que tal item tenha o nível de dificuldade esperado pelo elaborador ou a consistência exigida pela teoria. Por esse motivo, os itens são testados previamente. São distribuídos aleatoriamente em algumas escolas públicas do Ensino Médio antes de serem de fato utilizados na prova do Enem. Nesse pré-teste, a dificuldade e a validade do item estão atreladas ao número de acertos e à coerência de acertos entre os alunos. Itens que possuem muitos acertos possuirão baixo grau de dificuldade e vice-versa. Além disso, itens que não mantiveram a coerência são descartados. Se os percentuais de acertos e erros em um determinado item são muito próximos, tanto para alunos com alto rendimento final quanto para candidatos com baixo desempenho, aquele item é descartado, uma vez que sua consistência em se caracterizar como difícil ou fácil não pôde ser determinada. O conjunto dos itens aceitos passa então a pertencer ao banco de itens do Inep. A partir desse banco constroem-se as provas que serão utilizadas no Enem. O pré-teste determina também a probabilidade de acerto de um item validado. Em posse da probabilidade de acerto desses itens, para várias habilidades diferentes, é possível construir duas provas que, apesar de distintas, possuem a mesma dificuldade final. É justamente essa a característica que faz da TRI uma teoria apropriada quando se deseja comparabilidade entre provas.

Novo Enem e universidades públicas

O resultado do Novo Enem pode ser utilizado pelo aluno de várias maneiras. A partir de 2009, o exame serve até mesmo como certificação de conclusão do Ensino Médio para estudantes maiores de 18 anos. A prova também é feita por aqueles que têm interesse em ganhar bolsas integrais ou parciais em universidades particulares por intermédio do Programa Universidade para Todos (Prouni) ou para conseguir financiamentos pelo Fundo de Financiamento ao Estudante do Ensino Superior (Fies).

O uso mais importante, ou o mais frequente, do resultado do Enem pode ser o ingresso no nível superior de ensino, utilizado como único, alternativo ou complementar. Quem determina de que

forma o resultado do Novo Enem será usado é a própria universidade. O acesso do candidato ao Ensino Superior em universidades públicas brasileiras se dá pelo Sistema de Seleção Unificada (Sisu). Por esse sistema, totalmente *on-line*, os alunos podem se inscrever para as vagas disponíveis nas universidades brasileiras que aderiram ao Enem como forma única de ingresso. No entanto, como a utilização do Enem pelas universidades brasileiras é opcional, algumas delas ainda utilizam concursos vestibulares próprios para seleção dos seus candidatos. Apesar de cada universidade ter autonomia para aderir ao Novo Enem conforme julgue mais pertinente, o que se observa é uma quantidade cada vez maior de universidades, tanto públicas quanto privadas, utilizando o Novo Enem como forma única ou parcial de seleção.

Sites úteis sobre o Enem (acessos em: abr. 2016):

- Matrizes de Referência do Enem: <download.inep.gov.br/educacao_basica/enem/downloads/2012/matriz_referencia_enem.pdf>.
- Provas dos anos anteriores do Enem: <http://portal.inep.gov.br/web/enem/edicoes-anteriores>.
- Notícias atualizadas sobre o Enem: <http://portal.inep.gov.br/todas-noticias>.
- Matrizes de Referência do Enem: <http://portal.inep.gov.br/web/enem/conteudo-das-provas>.
- Informações gerais sobre o Enem: <http://portal.inep.gov.br/web/enem/enem>.
- Informações sobre o Enem, o Prouni e o Pronatec: <http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=13318&Itemid=310>

5 Sugestões de aprofundamento

A complexidade do ato de ensinar somado às adversidades encontradas em sala de aula talvez resultem em um panorama que demande mais do que os quatro anos do curso de licenciatura pôde oferecer. Mesmo em uma perspectiva otimista, na qual a graduação para o magistério tenha oferecido uma base teórica sólida em educação e didática, além de proporcionar estágios que de fato submetam o futuro professor a cenas reais de ensino, ainda assim não há como assegurar resultados positivos no início da carreira. A transição da vida universitária para a profissional do ensino de Física costuma ser acompanhada mais de dúvidas que certezas, mais frustrações que realizações. Nas palavras do psicólogo educacional Lee Shulman, trata-se da difícil transição da condição de aprendiz experiente para a de professor principiante.

A verdade talvez esbarre no fato de que a Ciência da Educação seja mais complexa do que as Ciências Naturais. Os objetos de estudo da Física, por exemplo, são fenômenos bem delimitados, e seus agentes costumam ser de natureza inanimada, sem vida ou vontade própria. Em contrapartida, a didática enfrenta o desafio de compreender o comportamento humano perante o fenômeno da aprendizagem, o que a coloca em contato com elementos abstratos, difíceis de serem inferidos ou acessados, como pensamento, conhecimento, cognição, aptidão, representações mentais, entre outros. Por esse motivo, o corpo de conhecimento da didática não possui certezas indiscutíveis ou definições universalmente aceitas, mas sim linhas de pensamento que diferem entre si na explicação a respeito de situações de ensino e aprendizagem. Cabe ao professor a tarefa de estudar seus fundamentos para que se sinta apto a escolher a qual corrente deseja se afiliar, tomando como critério, além do próprio estudo, suas crenças pessoais e a realidade de seu alunado. Ao se considerar a complexidade, é razoável esperar que o tempo de licenciatura, por vezes, não seja suficiente para uma formação que edifique fundamentos didáticos, tampouco disponibilize momentos de prática nos quais o aspirante a professor possa construir uma base sólida de procedimentos. Esses saberes e vivências, que o professor vai incorporar apenas com tempo e dedicação duradoura, são justamente os fatores que lhe faltam e que lhe habilitariam a superar as dificuldades comumente encontradas nos primeiros anos de magistério. Na ausência desses fatores, o professor não enxerga outra saída senão modelar suas ações educacionais em experiências bem-sucedidas de colegas de trabalho ou no exemplo dos próprios professores de seus tempos de escola, ignorando boa parte daquilo que estudou na faculdade.

Se por um lado a boa intenção e o conhecimento recém-adquirido de quem se dispôs a estudar e estagiar adequadamente nos tempos da graduação não seja sinônimo de resultados positivos em sua prática, por outro desprezar os estudos modernos sobre ensino e aprendizagem certamente não é a escolha mais ponderada a se fazer. Acreditar no domínio da ciência física como ela se apresenta em âmbito escolar e como condição necessária para um ensino de qualidade é desconsiderar por completo a complexidade do processo didático. Ensinar Física demanda mais do que conhecimento sobre conceitos físicos, exige igualmente um conhecimento pedagógico amplo. É usual encontrar professores que se regozijam com a beleza de suas aulas, geralmente expositivas, por acreditarem que o aluno está a contemplar a mesma beleza que ele enxerga e vislumbra no conhecimento da Física. Não têm ciência de que personalidades e perfis intelectuais diferentes fazem com que os seres humanos respondam de forma também diferente quando expostos a um mesmo saber. Desconhecem ainda as implicações pedagógicas de uma transmissão puramente expositiva e não se ocupam em averiguar criteriosamente se seus alunos serão capazes de transferir o conteúdo ensinado por esse método para outros contextos, ou até que ponto esse conteúdo sobreviverá aos tempos não escolares. Paralelamente a essa forma de encaminhar o ensino de Física, reside a ideia de que o aluno vai aprender quando o professor expõe um tópico da maneira que ele mesmo, professor, o entende. Isso pode ser visto como uma generalização ingênua da cognição humana. Por trás desse raciocínio mora a crença de que a forma de entender as coisas é universal, o que não leva em consideração todos os estudos já consagrados sobre representações próprias, concepções espontâneas e esquemas mentais. A evolução cognitiva é tão peculiar ao indivíduo que generalizá-la desse modo seria o mesmo que admitir a existência de um caminho único ligando dois pontos distantes de uma grande cidade.

Em meio à complexidade dos processos de ensino e aprendizagem, que se buscou caracterizar, é natural que surjam as perguntas: qual é a saída? Como se tornar um profissional competente na área de Ensino?

Estabelecer uma resposta definitiva a tal questionamento seria contradizer o exposto. No entanto, parece ser consenso entre educadores existir algumas medidas que ajudam a amenizar as dificuldades inerentes a essa profissão. Pensadores reconhecidos por suas obras sobre Educação, como o brasileiro Paulo Freire ou o canadense Maurice Tardif, bem como o português António Nóvoa, apostam na continuidade do estudo e na regularidade da troca entre professores e educadores como ações imprescindíveis à vida profissional do professor:

Enquanto ensino continuo buscando, reprocurando. Ensino porque busco, porque indaguei, porque indago e me indago. Pesquiso para constatar, constatando, intervenho, intervindo educo e me educo. Pesquiso para conhecer o que ainda não conheço e comunicar ou anunciar a novidade.

FREIRE, P. *Pedagogia da autonomia*: saberes necessários à prática educativa. Paz e Terra, 2012.

[...] *o tempo surge como um fator importante para compreender os saberes dos trabalhadores, uma vez que trabalhar remete a aprender a trabalhar, ou seja, a dominar progressivamente os saberes necessários à realização do trabalho.*

TARDIF, M. *Saberes docentes e formação profissional*. Petrópolis: Vozes, 2002.

Concluir o Magistério ou a licenciatura é apenas uma das etapas do longo processo de capacitação que não pode ser interrompido.

António Nóvoa em entrevista para a revista *Nova Escola*.

Essa formação vitalícia, no caso do professor de Física, está sustentada por quatro pilares: o estudo da Física, o estudo da didática, a troca profissional e a experiência de sala de aula.

Os três pensadores citados chamam a atenção para a importância da troca entre professores como fonte fértil e indispensável à formação continuada. Na visão deles, essa troca proporciona um estudo e uma reflexão que integram o conhecimento e a experiência de muitos, o que ajuda o professor a escolher metodologias melhores, a comparar práticas e a testar estratégias que lhe pareçam promissoras. Ou seja, perspectivas e pontos de vista de companheiros de trabalho podem enriquecer muito o repertório do professor. A análise conjunta, tanto do aparente fracasso quanto do aparente sucesso de casos reais de sala de aula, poderá auxiliar o professor na tomada de decisões mais seguras e fundamentadas nos rumos que deseja imprimir à sua prática. Mesmo o ato de compartilhar angústias e decepções sobre planejamento e avaliações pode desempenhar um importante papel nessa troca, uma vez que pode ser para o professor uma forma de acolher e de se sentir acolhido, de se perceber como parte de uma classe, o que colabora emocionalmente para a manutenção da perseverança necessária à carreira docente. Outro aspecto a ser explorado com essa troca é o estudo coletivo de livros e textos acadêmicos, o que ajuda a consolidar concepções sobre metodologias e teorias educacionais. Enfim, esses momentos de cooperação e estudo conjunto com colegas de profissão, se levados com regularidade e profissionalismo, favorecem a sinergia entre a motivação e o conhecimento moderno do principiante, com a maturidade, a sabedoria e a vivência dos professores experientes.

A sala de aula é outro espaço de aprendizagem em potencial para o professor. Uma prática consciente, em que existe a preocupação explícita em planejar e validar resultados, se opõe a uma prática mecânica e impensada. A primeira acelera o aprimoramento do trabalho do professor. Combinar o estudo pedagógico teórico com um planejamento refletido, seguido da implantação em sala de aula, é uma maneira de transformar possíveis frustrações em aprendizagem real, de discernir entre aquilo que pode dar certo daquilo que não encontra espaço no ensino. A experiência de sala de aula, quando acompanhada de uma reflexão embasada teoricamente e uma análise de resultados, amplia a bagagem de estratégias de ensino, além de ser uma forma de o professor manter ativas funções cognitivas essenciais ao seu ofício. Em contrapartida, anos de prática de sala de aula, se vistos como mera rotina profissional, podem comprometer não somente a qualidade do ensino, mas também a própria saúde intelectual desse profissional que, por pressuposto, deveria ser exemplo de proatividade mental para seu aluno.

A prática consciente e refletida e a troca entre colegas de profissão são dois pilares que devem caminhar de mãos dadas com o estudo da didática e o estudo da Física como ciência. Esses outros dois pilares, por sua vez, são impulsionados por um senso de compromisso individual do professor. Não dependem de provisões externas, infraestrutura sofisticada ou espaços coletivos de estudo. Deveriam ser encarados como hábitos pelo professor que deseja aperfeiçoar constantemente seu trabalho. O estudo da didática, de práticas educativas, tem o papel de fomentar teoricamente o professor com estratégias que lhe permitem: acessar as representações que seus alunos trazem a respeito do mundo, conhecer ferramentas e métodos que direcionem suas aulas, escolher melhor a ordem de ações que visam ao ensino de um tema qualquer, conhecer as dificuldades típicas e os obstáculos didáticos de determinado assunto, avaliar seus alunos adequadamente e redirecionar a trajetória de ensino escolhida quando necessário e, por fim, proporcionar ambientes e situações que promovam uma atmosfera saudável de aprendizagem. Se por um lado o estudo da Física sem o conhecimento pedagógico correspondente não assegura um ensino de qualidade, por outro o estudo permanente dessa ciência traz benefícios claros ao professor da disciplina. Esse estudo amplia o *hall* de exemplos e contraexemplos que propiciam um ensino mais contextualizado de leis e conceitos físicos, ao mesmo tempo que aumenta o repertório de palavras e símbolos que ajudam a clarificar temas complexos. Ou seja, para desenvolver e aplicar ferramentas pedagógicas eficientes, o professor, além do conhecimento pedagógico, deve estar familiarizado com o discurso da sua disciplina, no caso, a Física. Essa ciência representa um dos domínios mais extensos e complexos do patrimônio cultural humano, daí a necessidade de um estudo contínuo, permanente. Ainda que o currículo de Física do Ensino Médio se limite na sofisticação do ferramental matemático utilizado, e que a Física moderna e contemporânea sejam discutidas apenas superficialmente, ainda assim, uma compreensão mais aprofundada da Física pelo professor certamente o auxiliará na escolha de exemplos, na seleção de tópicos e na adequação da linguagem utilizada. Além disso, o estudo aprofundado da Física vai necessariamente esbarrar em campos de conhecimentos de fronteira que se relacionam ou usam os conceitos da Física. Assim, o professor de Física encontrará em seu caminho saberes não somente das ciências mais próximas, como a Biologia ou a Química, mas também poderá deparar com o estudo da história da ciência, ou de tópicos de Engenharia ou ainda conhecimentos da arte e da música. Todo esse conhecimento, quando ordenado e reunido à luz de conhecimentos pedagógicos, remete a uma ampliação de possibilidades para o professor. Prepara-o para passar a visão dessa ciência como uma dentre as formas de aquisição de cultura da humanidade. Capacita o professor a mostrar o papel da Física na construção e no desenvolvimento de tecnologias que ajudam a modificar e melhorar a vida em sociedade. Além disso, quando o professor aceita o desafio do estudo contínuo dessa ciência, certamente enfrentará dificuldades para entender conceitos modernos da Física. O trabalho e a energia gastos em seu estudo poderão reavivar sentimentos próprios desse processo, os quais decorrem do duelo mental com as dificuldades inerentes à aprendizagem, tornando o professor mais sensível às dificuldades de seus alunos. Finalmente, uma vez vencido o duelo com as dificuldades, o estudo regular de conceitos físicos conduz também à sensação de surpresa e espanto que geralmente acompanha o

entendimento de fenômenos naturais. Inspirados por essa sensação, os professores costumam ficar mais desejosos por conceber rotas de aprendizagem que levem seu aluno a experimentar, por meio da descoberta própria, as mesmas emoções que frequentemente nascem do ato de conhecer e de aprender algo novo.

De maneira resumida, os professores experientes e competentes conhecem os tipos de dificuldade que os alunos provavelmente enfrentarão e são conscientes de que não são necessariamente os mesmos com que ele, professor, deparou quando estudou aquele conteúdo pela primeira vez. Além disso, sabem extrair o conhecimento prévio de seus alunos, a fim de tornar significativa a nova informação. Sabem avaliar o progresso dos estudantes. Esses professores adquiriram conhecimento de conteúdo e conhecimento pedagógico. O desenvolvimento dessas virtudes no educador acontece apenas com grande investimento de tempo, energia, prática, troca, estudo e reflexão. Embora seja comum o pensamento de que o "talento" contribui para formar um especialista em determinada área, mesmo indivíduos aparentemente talentosos necessitam de muita prática e estudo para construir competência em seu campo de atuação.

Estando cientes da dificuldade da profissão no Brasil, compreendemos que a dedicação a uma formação contínua e regular é quase utópica. No entanto, a necessidade não deve ser encarada como um fardo, mas sim como oportunidade para aprender e se aprimorar. Trata-se de uma condição que requer certo grau de idealismo e um senso aguçado de responsabilidade. O idealismo e a responsabilidade poderão surgir e se alimentar da conscientização da importância da profissão. O dever do professor de Física está ligado à transferência de um conhecimento maravilhoso, adquirido por toda a humanidade e que tem servido para transformar a vida da civilização. Um conhecimento que escapa ao senso comum e que torna factíveis feitos inimagináveis, mas que ao mesmo tempo tem o potencial de explicar as coisas mais simples do dia a dia. Professores que se mostram incansáveis na tarefa de ensinar Física e procuram cumprir com naturalidade as exigências levantadas geralmente concordam no que diz respeito às recompensas da profissão. Entendem como parte da realização profissional o despertar de um aluno para o conhecimento como um ganho inestimável para o progresso da nação. Cada aluno seu que decida se tornar um físico, como lenitivo para o cansaço de um dia de trabalho, cada aluno que reconhece, por intermédio de suas aulas, a harmonia e a beleza do cosmos.

Leituras sugeridas

Algumas sugestões de leitura, *sites* e passeios que poderão ser utilizados como fonte de estudo e pesquisa para professores que ambicionam ampliar seu repertório tanto da área da didática como da Física propriamente dita.

– **Para aprofundar-se nos fundamentos da Física básica:**

Curso de Física básica – H. Moysés Nussenzveig – Editora Edgar Blucher

Fundamentals of Physics – Halliday, Resnic, Walker – Editora Wiley

Fundamentos de Física conceitual – Paul G. Hewitt – Editora Bookman

Lectures on Physics – Feynman, Leighton, Sands – Editora Addison Wesley

– Leituras diversificadas em Física e ciências correlatas:

A longa marcha dos grilos canibais – Fernando Reinach – Editora Companhia das Letras

A matéria: uma aventura do espírito – Luis Carlos de Menezes – Editora Livraria da Física

As fantásticas invenções de Nikola Tesla – David Hatcher – Editora Madras

As ilusões da vida: a estranha ciência do extremamente comum – Jay Ingram – Editora Ediouro

Biofísica: conceitos e aplicações – José Enrique Rodas Duran – Editora Pearson

Física do impossível – Michio Kaku – Editora Rocco

Física mais que divertida – Eduardo de Campos Valadares – Editora UFMG

Física moderna – Tippler, Llewellyn – Editora LTC

Física para ciências biológicas e biomédicas – Okuno, Caldas, Chow – Editora Harbra

O circo voador da Física – Jearl Walker – Editora LTC

O grande projeto – Stephen Hawking – Editora Nova Fronteira

Os objetos frágeis – Pierre-Gilles de Gennes – Editora Unicamp

Quântica para iniciantes – Alves, Mateus, Paula – Editora UFMG

Química das sensações – Faria, Retondo – Editora Átomo

Rising Force: The Magic of Magnet – James D. Livingston – Editora Harvard University

Temas atuais de Física – coleção da SBF com 7 volumes e vários autores – Editora Livraria da Física

The Physics and Chemistry of Color – Kurt Nassau – Editora Wiley Inter-science

– Para aprofundar-se em história da ciência:

Evolução das ideias da Física – Antonio S. T. Pires – Editora Livraria da Física

História da ciência – John Gribbin – Editora Europa América

O que é ciência afinal? – Allan F. Chalmers – Editora Brasiliense

Os 100 maiores cientistas da história – John Simmons – Editora Difel

– Para aprofundar-se em didática e ensino:

A didática das ciências – Astolfi, Develay – Editora Papirus

A pedagogia da autonomia – Paulo Freire – Editora Paz e Terra

Como as pessoas aprendem – Bransford, Brown, Cocking – Editora Senac

Construir as competências desde a escola – Philippe Perrenoud – Editora Artmed

Inteligências múltiplas: a teoria na prática – Howard Gardner – Editora Artmed

Mediação da aprendizagem na educação especial – Meier, Budel – Editora IBPEX

Pesquisa na escola – Marcos Magno – Editora Loyola

Saberes docentes e formação profissional – Maurice Tardif – Editora Vozes

Tive uma ideia! – Monica Martinez – Editora Paulinas

– *Sites* recomendados. Acessos em: abr. 2016

- *Site* oficial do MEC:
<www.mec.gov.br/>
- Portal do Professor do MEC:

<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/index.html>
- *Site* do MEC que contém milhares de objetos educacionais:
<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/handle/mec/33/browse?type=title&s=d>
- Livro do Gref na forma digital:
<http://fisica.cdcc.usp.br/GREF/livros.html>
- Videoaulas oferecidas pela Unicamp:
<http://cameraweb.ccuec.unicamp.br/videos>
- Videoaulas oferecidas pela USP:
<http://eaulas.usp.br/portal/home>
- Videoaulas oferecidas pelo Instituto de Física da USP:
<http://video.if.usp.br/video-aulas>
- Conteúdo digital oferecido pela UFSC:
<http://repositorio.ufsc.br/>
- Simulações da Universidade do Colorado (PHET):
<http://phet.colorado.edu/en/simulations/category/new>
- *Site* sobre a Física de partículas:
<www.particleadventure.org/index.html>
- *Site* com videoaulas em inglês de todas as disciplinas escolares e de alguns cursos universitários:
<www.khanacademy.org/>
- Publicações *on-line* da Sociedade Brasileira de Física:
<www.sbfisica.org.br/v1/index.php?option=com_content&view=article&id=244&Itemid=192>
- Periódico Caderno Brasileiro de Ensino de Física:
<www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica>
- Periódico Investigação em Ensino de Ciências:
<www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica>
- Portal de busca de periódico da Capes:
<www.periodicos.capes.gov.br/>
- Associação Brasileira de Educação a Distância:
<www2.abed.org.br/>
- Para fazer o *download* de *software* usado para construir e compartilhar mapas conceituais:
<http://cmap.ihmc.us/download/>
- *Site* sobre novas tecnologias em educação:
<www.gente.eti.br/site/>
- Laboratório Didático Virtual:
<www.labvirt.fe.usp.br/indice.asp>

– Passeios culturais

Catavento cultural:
<www.cataventocultural.org.br/home>
Espaço Ciência:
<www.espacociencia.pe.gov.br/>
Estação Ciência:
<www.eciencia.usp.br/>
Sabina Escola Parque do Conhecimento de Santo André:
<www2.santoandre.sp.gov.br/page/143/42>
Parque Cientec:
<www.usp.br/cientec/>
Show de Física Unesp:
<www.rc.unesp.br/showdefisica/showfis.php>
Show de Física USP:
<www.cepa.if.usp.br/showdefisica>

6 Linha pedagógica da Coleção e estrutura da obra

A interação didática entre professor, livro e aluno

Neste tópico é importante que se mantenha em mente a dinâmica de interação entre professor, livro e aluno. No processo, é comum que o professor utilize o livro como uma das principais fontes de conhecimento e atividades para o ensino, enquanto o aluno o utiliza para estudo, para consulta e como fonte de pesquisa, enfim, como meio para a aprendizagem. Também frisamos que o livro é apenas um dos elementos que contribuem para um ensino de qualidade, elemento que equilibra e complementa outros, como estrutura e ambiente apropriado, preparo cuidadoso do plano de ensino, assim como o engajamento a um plano de aprendizagem por parte do aluno. Vale lembrar ainda que resultados positivos dependem do grau de intimidade que o professor possui com o livro, intimidade obtida pela consciência dos objetivos e das premissas pedagógicas de suas diferentes seções. Com isso queremos dizer que o uso adequado do livro pelo professor requer não somente a leitura de seu conteúdo interno, mas também a pré-leitura deste Manual.

Escolhas pedagógicas

Durante o processo de composição da obra preocupamo-nos em considerar fatores que contribuíssem para um ensino de Física relevante. Julgamos pertinente considerar o perfil da juventude brasileira, que possui como um dos principais atributos a heterogeneidade, tanto na esfera cultural e econômica quanto no nível da formação educacional com que chegam ao primeiro ano do Ensino Médio. Outro aspecto que levamos em consideração foram as funções que o ensino de Física, conforme descrito no tópico 2, devem desempenhar nessa fase escolar, funções ligadas tanto a ganhos intelectuais quanto à alfabetização tecnocientífica. O terceiro, e o mais difícil, elemento que levamos em conta representa o desafio de conceber um material capaz de auxiliar o professor na complexa tarefa de motivar seu aluno a querer aprender. Um material que subsidie o professor que objetiva estimular a curiosidade do estudante, esta que, por razões diversas, parece estar adormecida em alguns jovens do Ensino Básico.

Durante a redação dos capítulos e da escolha das atividades propostas, buscamos visualizar de que maneira abordagens e enfoques diferenciados poderiam facilitar um ensino que tivesse por pressuposto a atenção a esses três fatores. É bem verdade que a obra não se afiliou a uma corrente pedagógica em particular, tampouco se ateve em seguir os passos de alguma teoria educacional. No entanto, procuramos, dentro do limite imposto pela profundidade e extensão da Física em âmbito escolar, disponibilizar diferentes seções que municiassem o professor com possibilidades variadas de abordagem de determinado assunto. A ideia por detrás da escolha é: tendo consciência das características peculiares do seu alunado, você será capaz de reconhecer o valor pedagógico das várias seções, bem como a maneira e o momento mais apropriado de conectá-las às estratégias de ensino. Nosso esforço foi direcionado ao preparo de um material que tivesse como ser explorado em diferentes ce-

nários educacionais, que viabilizasse o ensino para diferentes culturas e diferentes perfis cognitivos. A tentativa de concretizar uma obra abrangente em possibilidades, na forma de um conjunto diversificado de atividades, textos e exercícios, justifica-se pela expectativa de abarcar as necessidades expostas no parágrafo anterior, ou seja, contemplar diferenças e diferentes, subsidiar um ensino que objetive a alfabetização tecnocientífica e fornecer elementos que possam ser usados para motivar o estudo. Acreditamos que a multiplicidade de atividades que nos empenhamos em disponibilizar na obra possa atender a dois dos fatores mencionados. Essa multiplicidade viabiliza diferentes encaminhamentos de ensino exigidos pela realidade heterogênea, ao mesmo tempo que proporciona os recursos necessários para um ensino que favoreça a alfabetização tecnocientífica. Isso ocorre porque os inúmeros recortes epistemológicos que podem ser atribuídos a uma mesma lei ou teoria física podem, todos eles, ser discutidos no livro por meio de propostas didáticas também diferenciadas. Ao proceder assim, o pluralismo de atividades sugerido, e que está presente nas diversas seções da obra, oferece a oportunidade de uma formação completa ao estudante. Entendemos que essa ideologia potencializa o acatar às diferenças e aos diferentes, mostra-se adequada ao professor que toma para si o desafio de ensinar Física e entende essa ciência natural como um possível elemento equalizador da heterogeneidade escolar. Os diferentes recortes aos quais nos referimos possibilitam pontos de vista complementares de uma mesma lei ou conceito; além disso, admitem abordagens em profundidades também distintas. Esse espectro de possibilidades e profundidades pode ser explorado pelo professor que reconhece o nível de maturidade intelectual momentâneo de seu aluno, escolhendo o modo como a sequência de leituras e atividades é mais pertinente. Ao mesmo tempo, esse enfoque pluralista pode ser utilizado pelo professor que tem como meta a aprendizagem holística do aprendiz. As diferentes seções propiciam o desenvolvimento de habilidades cognitivas distintas que, quando reunidas, ajudam o estudante a se inserir no mundo das Ciências Naturais, a dominar os símbolos e a lógica da Física, enfim, a alfabetizar-se técnica e cientificamente enquanto aprimora suas funções cognitivas.

Como dissemos, esforçamo-nos, igualmente, em construir um material que se mostrasse proveitoso ao professor que deseja aguçar a curiosidade de seu aluno. Para tanto, tomamos o cuidado, durante a redação dos textos e da seleção dos exemplos e atividades, em aproximar a Física ensinada ao mundo vivencial do aluno, toda vez que isso nos pareceu factível. Essa aproximação deu-se tanto pelo tratamento de fenômenos naturais presentes no cotidiano imediato do estudante quanto pela escolha de tecnologias conhecidas e já consagradas pela sociedade. Outra tática usada para esse fim motivacional foi apresentar elementos que se opusessem à intuição e ao senso comum. Com frequência, os saberes da Física e das Ciências Naturais contradizem o pensamento comum. As representações primeiras dos indivíduos, geralmente, não condizem com os conhecimentos científicos. Como discutido no tópico 2 deste Manual, o conhecimento físico é construído, elaborado, e exigiu um esforço coletivo da comunidade científica para que fosse concretizado. Muitas vezes, esses saberes possuem uma sofisticação e um grau de abstração não alcançado pelo senso comum. Muito embora as representações mentais e concepções espontâneas de cada um sirvam para que o cidadão interaja e conviva dentro de sua realidade, raramente as mesmas concepções se sustentam quando chamadas a explicar ou prever resultados ainda que simples dessa realidade. Se utilizada com cautela, a incompatibilidade comumente encontrada na cognição humana, entre conhecimento próprio e saber científico, pode ser aproveitada para despertar no aluno a curiosidade de querer encontrar uma explicação para aquilo que seus esquemas mentais não dão conta de explicar. Naturalmente a cautela mencionada está relacionada ao trabalho do professor, e sua adequação como estratégia de ensino será discutida no tópico reservado para esse fim, contudo nos esforçamos em disponibilizar no livro elementos contraintuitivos toda vez que nos parecesse plausível. Dessa forma, esperamos que o professor use adequadamente os elementos de aproximação do mundo vivencial e os elementos contraintuitivos, com o objetivo de despertar no aluno o interesse e o gosto pelo estudo da Física. Do mesmo modo, esperamos que a realização das atividades e das leituras que contêm esses elementos instigue o estudante na aventura de compreender o mundo das Ciências Naturais e favoreça seu comprometimento com seu plano de aprendizagem, assegurando assim a eficiência das estratégias escolhidas pelo professor durante sua ação pedagógica.

Distribuição de conteúdos

Apesar de a lista de conteúdos da obra seguir a distribuição clássica dos livros didáticos, algumas alterações na ordem dos capítulos sobre Eletricidade foram feitas visando a um sequenciamento que nos pareceu mais apropriado para o melhor entendimento do aluno. Além disso, a Coleção apresenta, além dos capítulos sobre Física moderna que já costumam figurar nos livros atuais, como, por exemplo, Física quântica e relatividade, outros que raramente são encontrados em livros didáticos de Física; são eles: O Sistema Solar e a Terra, Máquinas simples, Energia solar e Impactos ambientais, a Física da informação, Física nuclear, Cosmologia e Partículas elementares. Esses capítulos adicionais foram inseridos por incorporarem problemas atuais, assim como temas e tecnologias modernas, o que facilita a aproximação dos conceitos físicos com o mundo vivencial do aluno, aproximação cuja importância foi frisada nos parágrafos anteriores.

Estrutura da obra

Cada volume da Coleção está dividido em quatro unidades cujos capítulos foram escolhidos por afinidade de conteúdo e traz um infográfico para auxiliar o aluno na leitura desse método de exposição de informação.

A página de abertura de cada capítulo contém sempre uma figura e uma pergunta aberta, com o objetivo de situar o aluno no tema que será trabalhado em seguida, bem como proporcionar um primeiro estímulo à reflexão sobre o assunto que será visto. Possíveis respostas às perguntas abertas são disponibilizadas no Manual do Professor, que poderá utilizá-las na forma de sugestão de trabalho em classe, como início de um plano de aulas ou ainda como fechamento do assunto. A escolha do modo como utilizar essas perguntas ou outras partes do livro deve sempre atentar para a harmonia entre livro, estratégias didáticas escolhidas e necessidades de aprendizagem do aluno.

Após a página de abertura, cada capítulo inicia com um texto cuja linguagem e exemplos dados foram pensados pelo bem do entendimento do aluno que estuda o assunto pela primeira vez, mas traz representações já formadas sobre alguns dos conceitos e dos fenômenos que serão abordados. O texto inicial tem como intuito mostrar ao aluno que o assunto a ser visto tem certo grau de relação com seu mundo vivencial, além de servir também para introduzir termos e símbolos próprios do tópico em questão. Entendemos a aproximação com a realidade do aprendiz como uma das formas de conferir sentido e significado aos conteúdos que serão estudados. Apenas a título de exemplo, iniciamos o estudo da Cinemática pela relação existente entre o conforto em viagens e os conceitos de velocidade e aceleração;

na Eletricidade, iniciamos o capítulo pela questão da instalação elétrica residencial e pela observação de eletrodomésticos simples.

Após o texto introdutório, o desdobramento de cada capítulo se dá pela inserção de sugestões de exercícios propostos, exercícios resolvidos e seções diferenciadas. Esses recursos aparecem na quantidade e na ordem que, em nosso julgamento, parecia favorecer uma aprendizagem temperada por conteúdos conceituais, procedimentais e históricos da Física. Além disso, a escolha das atividades foi sempre feita com foco nas habilidades que poderiam ser desenvolvidas a partir dos conteúdos do capítulo em questão, assim como na construção de competências que seriam necessárias em capítulos posteriores. A profundidade conceitual e a sofisticação matemática crescem de forma gradativa ao longo do livro, sempre de modo que os assuntos trabalhados anteriormente possam fornecer subsídios para o conteúdo em pauta. Ainda assim, conceitos e equações foram retomados em alguns momentos de maneira a contribuir para o entendimento de um novo fenômeno ou para o aprofundamento de algum assunto.

Como discutido no item Escolhas pedagógicas, as seções e as atividades da Coleção visam proporcionar abordagens diferentes e complementares de leis e conceitos físicos. Assim, um mesmo conteúdo é visto do ponto de vista histórico, do ponto de vista social e moderno, além de serem trabalhados seus aspectos conceituais e procedimentais, tendo em mente a interpretação científica de fenômenos, a expressão adequada da linguagem e o exercício da cidadania. Uma das formas que utilizamos para conseguir essa diversidade de abordagens foi a proposição de debates sobre o impacto da ciência, em especial da Física, na sociedade contemporânea. Como exemplo podemos citar temas que, por colaborarem diretamente nessa influência em nossa vivência diária, vimos por bem tratar ao longo da coleção: Trânsito, GPS, Economia de energia, Ondas eletromagnéticas e Efeito fotoelétrico.

Ao longo das páginas de cada volume foram disponibilizadas propostas de leitura que poderão ser requisitadas como tarefa de casa para o aluno. A finalidade dessas propostas varia desde um complemento de assunto que careceria de maior disponibilidade de tempo para que fosse trabalhado até o oferecimento de textos que ajudem a desenvolver gosto por leituras de cunho científico e histórico.

Os exercícios sugeridos em cada capítulo foram selecionados de forma que suas soluções demandem o domínio do assunto em pauta em perspectivas diferentes, sem privilegiar algum enfoque em particular, como, por exemplo, o enfoque matemático, tão acentuado em exercícios de vestibular. Assim, exercícios desse tipo foram selecionados apenas quando acreditamos que poderiam contribuir para essa visão holística da aprendizagem de conceitos físicos.

Seções presentes na obra

As seções existentes na obra estão distribuídas entre os exercícios e os textos dos capítulos e se apresentam na forma de propostas de atividades, de experimentos, de leituras, de pesquisas, entre outras. Tais seções ajudam a promover a visão integral da Física. Além disso, as seções tomam os conteúdos trabalhados no capítulo e os utilizam como matéria-prima para gerar ocasiões que auxiliem no desenvolvimento de habilidades.

A seguir apresentamos cada uma das seções, descrevendo o tipo de atividade presente, sua razão didática, bem como possíveis usos que o professor e o aluno podem fazer delas.

Compreendendo o mundo

Traz fenômenos cujos saberes e procedimentos de outras Ciências Naturais são tão relevantes quanto os físicos para que se alcance sua compreensão. O objetivo é mostrar a relação entre os saberes das Ciências Naturais e outras ciências e desse modo fornecer meios para que o aluno perceba a artificialidade da fragmentação disciplinar, ao mesmo tempo que entenda a necessidade didática dessa separação.

Em construção

Biografia de um ou mais personagens da Física, tem caráter mais informativo do que formativo, com a intenção de mostrar ao estudante que grandes nomes da ciência foram indivíduos comuns, com suas características sociais, culturais e ideológicas próprias além de mostrar que a vida profissional desses cientistas, assim como a vida de todos nós, costuma ser repleta de idas e vindas, erros e acertos, desmitificando a possível imagem ingênua do cientista genial, perfeito, ideal.

Trabalho em equipe

Propõe um trabalho, geralmente de pesquisa orientada, a ser realizado em duplas ou em equipes maiores, e cujo objetivo é oferecer uma oportunidade de desenvolvimento de habilidades importantes tanto para a futura vida profissional quanto para o convívio social saudável. São habilidades essenciais, como, por exemplo, a seleção de informação, a argumentação de pontos de vista distintos, a exteriorização verbal e escrita de ideias, assim como a negociação e o debate de possíveis significados para uma mesma lei ou conceito. A orientação da proposta é encaminhar o grupo à solução consensual de uma situação-problema que solicita a aplicação de conhecimentos específicos do capítulo.

Física tem história

Apresenta o entorno tecnológico, político, social, econômico, religioso e cultural da construção das teorias físicas. Dessa forma pretendemos tornar o desenvolvimento dinâmico da ciência e a evolução de suas ideias uma parte integrante do assunto abordado. Os aspectos metodológicos do "fazer" Física são explicitados com o intuito de conflitar tanto a visão tradicionalista dos passos preconcebidos do método científico quanto a visão excessivamente positivista da ciência.

Física explica

Traz fenômenos naturais e tecnologias cuja explicação e funcionamento evidenciam o uso de leis e conceitos físicos trabalhados no capítulo. A seção tem por objetivo ser uma das ocasiões em que se procura estabelecer um vínculo com o cotidiano do aluno, além de utilizar aplicações da Física como meio de conferir sentido e significado a suas leis e seus conceitos.

Ampliando

Conforme dissemos anteriormente, buscamos, no decorrer dos textos dispostos em cada capítulo, atentar para o uso de uma linguagem que fosse acessível ao aluno, que facilitasse a interpretação da mensagem a ser transmitida. No entanto, alguns termos não triviais são utilizados por serem os mais apropriados no contexto do tema trabalhado. Dessa forma, entendemos o uso da terminologia específica como oportunidade para ampliar e aprofundar o vocabulário científico ou não científico do estudante. Esse boxe, em forma de glossário, destina-se a definir, conceituar e exemplificar muitas dessas palavras que, provavelmente, são novas para estudantes do Ensino Médio.

Experimento

As atividades experimentais em ensino de Física costumam ser vistas como estratégia de destaque entre os educadores, dado o seu potencial em simular e reproduzir fenômenos naturais no ambiente de sala de aula, além de facilitar a visualização e o entendimento de conceitos abstratos e complexos. Além disso, tornaram-se famosas por possibilitarem que os alunos desenvolvam habilidades supostamente necessárias para o bem fazer da ciência, como observar, identificar, selecionar, formular e testar hipóteses e modelos, contribuindo assim para o exercício da autonomia, virtude que ocupa alto grau de hierarquia na escala de competências. A seção tem como propósito sugerir atividades desse tipo que possam ser implantadas em sala de aula ou em ambiente de laboratório. Dependendo do assunto tratado, as sugestões diferenciam-se no encaminhamento recomendado. A Coleção conta com sugestões de experimentos que vão desde uma simples demonstração ou verificação de fenômenos e leis até atividades de cunho mais investigativo, em que o aluno é chamado a observar, formular hipóteses, testar, enfim, colocar em prática as habilidades mencionadas. No entanto, em concordância com aquilo que foi discutido ao final do primeiro tópico, preferimos uma postura mais prudente em relação aos experimentos investigativos; assim, muitas propostas de experimentos necessitam de sua assistência antes que a autonomia seja atingida.

Retomando

Ao término do capítulo são colocadas questões, perguntas abertas e sugestões de investigação que requerem, além do domínio dos principais conceitos vistos ao longo do capítulo, a capacidade de propor soluções mais criativas que as tradicionais. São propostas que auxiliam na prática de habilidades mais sofisticadas, uma vez que tais habilidades devem estar acompanhadas de um domínio conceitual também mais amplo. Habilidades genéricas, como identificar, comparar ou relacionar, têm sua complexidade determinada pelo nível do conhecimento que as complementa. **Relacionar** as grandezas espaço e tempo em um movimento uniforme é certamente uma habilidade menos complexa do que **relacionar** características geométricas do condutor com a intensidade de corrente elétrica induzida pela variação de fluxo de campo magnético na região onde ele se encontra. Esta última, por sua vez, talvez seja menos complexa do que a habilidade de **relacionar** as características físicas de uma casa de *show* com a musicalidade que ela oferece a sua audiência. Questões mais abertas e mais próximas da realidade do aluno, mas que exijam habilidades sofisticadas como estas últimas, quando trabalhadas de forma séria e regular, podem preparar para o modelo de prova do Novo Enem, além de colaborar para a formação completa que a Física pode oferecer aos seus estudantes.

7 Discussão sobre avaliação

De forma geral, a escola tradicional procura detectar, em suas avaliações, as habilidades e os saberes adquiridos por meio de duas entre as múltiplas inteligências presentes na cognição humana: a inteligência linguística e a lógico-matemática. As duas inteligências, por estarem ligadas à capacidade de redigir textos de forma clara, de manipular símbolos e de elaborar soluções para questões objetivas, são mais facilmente testáveis que as demais. Apesar da abrangência de sentidos para a palavra **inteligência**, sua definição formal, em um primeiro momento, auxilia no entendimento de possíveis funções e contextos da avaliação no ambiente escolar. Para Gardner, psicólogo já citado no tópico 3, inteligência é a capacidade de resolver problemas ou elaborar produtos que sejam valorizados em um ou mais ambientes culturais ou comunitários. Ele defende a existência de outras cinco inteligências de mesmo *status* cognitivo das duas inteligências costumeiramente avaliadas na escola. São elas: as inteligências espacial, musical, cinestésica-corporal, interpessoal e intrapessoal. Nessa forma de entender a cognição, uma verdadeira legião de injustiçados teria deixado a escola com a certeza ilusória de que sua inteligência está muito aquém da inteligência média, sem se dar conta de que, na verdade, as inteligências inferidas na fase escolar são apenas as duas mencionadas. É muito provável que todos nós, brasileiros, tenhamos enfrentado o mesmo sistema avaliativo durante os anos escolares. Há de se dizer, contudo, que o impacto psicológico maléfico que o demérito social pode ter provocado naqueles que não manifestavam naturalmente as duas inteligências deve ser enorme e, talvez, irrecuperável. No outro extremo estão aqueles que, por não conhecer as dimensões múltiplas da cognição humana, deixam a escola considerando-se mais "sabidos" que os seus colegas quando, possivelmente, apresentavam apenas uma aptidão maior para duas entre as múltiplas inteligências. Não é necessária uma teoria epistemológica ou cognitiva muito profunda para perceber a falta de validade da avaliação nesses moldes, basta que verifiquemos o futuro daqueles que apresentavam baixo rendimento escolar. Que poderia ser dito a respeito de artistas, cantores, comerciantes, bailarinas, marinheiros, cabeleireiros, atletas, enfim, indivíduos que podem muito bem ter atingido patamares elevados de sucesso profissional em suas carreiras, mas que não necessariamente conseguiam boas notas na escola? Não seriam eles igualmente inteligentes? Não conseguiram eles usar seus recursos cognitivos para produzir produtos e resolver problemas que tivessem valor no ambiente cultural e comunitário em que vivem? A supervalorização da inteligência linguística e da inteligência lógico-matemática em detrimento das demais acaba passando a visão, replicada pela sociedade, de que inteligente é aquele sujeito que sabe resolver problemas de Matemática, Física, Química e Lógica. Esse malogro educacional, encontrado não apenas em nível nacional, mas também mundial, faz com que as outras capacidades advindas das outras dimensões intelectuais não ganhem o suporte educacional que precisam para se desenvolver na época escolar, ficando, com frequência, obscurecidas durante a juventude. O aflorar das outras cinco inteligências se dá ao sabor do acaso e das circunstâncias da vida que demandem seu uso, sem um suporte pedagógico esquematizado para que sejam fortalecidas de forma sistemática. Não é preciso grandes esforços para iniciar um movimento de evolução no espírito da avaliação escolar. A simples conscientização da pluralidade da cognição humana já poderia promover uma mudança na postura do professor, que poderia atentar para comportamentos que refletissem as outras capacidades. Avaliar o aluno somente por seu rendimento na resolução de problemas que exigem um elevado patamar de sofisticação matemática tem o mesmo grau de pertinência que avaliar um vendedor somente por sua destreza em calcular impostos sobre seus produtos, ou um boxeador pelo impacto de seus ganchos

de direita; claramente fica faltando uma visão de outros atributos igualmente relevantes para o cumprimento de suas funções.

Outro panorama que nos sentimos obrigado a descrever diz respeito à maneira de avaliar, a que Gardner atribui o nome de "testagem". A testagem seria a padronização do sistema avaliativo, ou seja, o costume de realizarem provas iguais para alunos diferentes, com tempo preestabelecido, com questões descontextualizadas, privilegiando as inteligências mencionadas. Por que avaliar todos com os mesmos instrumentos se somos todos diferentes? Por que esperar que todos cheguem preparados no momento exato da avaliação? Por que não considerar a influência de outras características da personalidade humana em momentos de alta pressão como esses? Por que provas escritas se o mundo profissional reivindicará outras formas de avaliação? Por que tantas provas individuais se o trabalho em equipe tem se mostrado cada vez mais eficiente na obtenção de soluções complexas? Por que valorizar respostas padronizadas se a criatividade recomenda justamente o distanciamento e a divergência com o comum? Por que usar a avaliação apenas para atribuir uma nota e classificar o aluno em aprovado ou reprovado? Por que não conceber avaliações atraentes e que possam gerar expectativas de prazer em vez de ansiedade? A finalidade do ensino em um cenário frustrante como esse se reduz à simples preparação para as provas e os exames. Sem dúvida uma realidade perturbadora! Embora tenhamos reforçado os aspectos considerados inapropriados e negativos do sistema vigente de avaliação, estamos cientes de que uma generalização indevida seria descabida. Devemos considerar todo esforço gasto por pesquisadores, professores e instituições públicas ou privadas, objetivando uma avaliação de qualidade e que estivesse inserida em um contexto inovador de ensino e aprendizagem. A imagem idealizada por esses educadores e que estaria do lado oposto da caricatura feita nos parágrafos anteriores é a imagem de um sistema avaliativo que ajuda o aluno a evoluir, a aprender, a romper barreiras cognitivas e adquirir qualidades essenciais à construção saudável de sua futura vida social e profissional. Nesse caso, em que a avaliação seria utilizada como meio para a aprendizagem significativa, o foco seria o preparo do estudante para a conquista de sua autonomia, ajudando-o a tomar ciência de seu papel como cidadão, bem como de seus deveres, direitos e compromissos com o coletivo.

Problemas da avaliação na escola tradicional

Testes padronizados não revelam, necessariamente, as diferenças entre ações pedagógicas tradicionais e inovadoras, tampouco refletem o cuidado e zelo pela qualidade do ensino. A impessoalidade, a especificidade e a previsibilidade das avaliações tradicionais fazem com que ações didáticas bem planejadas, estratégias diferenciadas e um maior comprometimento do professor, por vezes, passem despercebidos. Métodos modernos mostram-se, aos olhos da avaliação tradicional, equivalentes ao método conservador. Isso ocorre em razão da incapacidade da avaliação tradicional discernir respostas mecanizadas daquelas que nascem de um real entendimento e aprendizagem. Conforme argumentamos no tópico 3, um ensino de qualidade deveria estar atrelado a uma avaliação que sustenta tal ensino, que se mostre eficiente tanto em detectá-lo quanto em alimentá-lo.

A seguir listamos alguns pontos geralmente tidos como os principais problemas da avaliação tradicional:

- Linguagem

  Caso se pretenda detectar habilidades e conteúdos por meio de uma linguagem rebuscada e carregada em termos técnicos, deve-se, antes, trabalhar esse tipo de enunciado com o aluno. Ensinar Física pressupõe ensinar o aluno a interpretar enunciados típicos da Física. Como exemplo, compare as duas questões a seguir, que, em princípio, poderiam ser tidas como equivalentes por um leitor menos atento.

1) *Calcule a aceleração.*
   Dados:
   $m = 3\ kg$
   $F_r = 6\ N$

2) *Sabendo que a massa de um móvel tem valor de 3 unidades no Sistema Internacional e que a resultante das forças exercidas sobre ele tem intensidade 6 N, calcule a taxa temporal com que sua velocidade varia.*

Nitidamente a questão 2 demanda mais conhecimento do que a primeira. Para chegar à solução dessa questão, o aluno precisa saber e saber fazer:

a) qual a unidade de massa no SI (saber);
b) que a palavra móvel é o nome genérico de algo que pode se movimentar (saber);
c) que a taxa de variação da velocidade é justamente a aceleração (saber);
d) identificar que se trata de um problema da segunda lei de Newton (saber fazer);
e) que os símbolos de massa e aceleração são, respectivamente, *m* e *a* (saber);
f) utilizar a segunda lei de Newton para chegar à solução (saber fazer).

Em comparação, a primeira questão necessitaria apenas dos itens **d** e **f**, sendo, portanto, bem menos complexa.

Nesse ponto, nossa intenção ainda não é defender a presença do primeiro ou do segundo tipo de questão. O que não faz sentido, no entanto, é esperar que o aluno alcance a resposta almejada na questão 2 sem que tenha tido o preparo adequado para isso.

- Avaliar apenas as inteligências linguística e lógico-matemática

  Existe outro problema que pode ser inferido tomando como exemplo as mesmas duas questões. Caso o aluno apresente aptidão natural para as inteligências linguística e lógico-matemática, é possível que detecte o mecanismo de resolução da segunda questão, ainda que nunca tenha deparado com questões desse tipo e que o ensino ao qual foi submetido não o tenha preparado adequadamente. Isso revela o problema anunciado no início do tópico. Tal aluno passa a ser tido como o inteligente da turma, mas, na verdade, outros alunos não acertaram a questão por uma falha no ensino, a qual, nesse aluno em particular, foi compensada por uma maior capacidade em detectar sentidos implícitos e simbólicos. Para agravar a situação, o aluno que chega ao resultado correto não o faz necessariamente como consequência de uma compreensão profunda dos conceitos envolvidos. Seu acerto pode ser reflexo de sua maior capacidade em manipular símbolos e interpretar textos. Porém, não há como garantir uma aprendizagem significativa, acompanhada de sentido e significado. Caso o mesmo aluno fosse chamado a conceituar massa ou discorrer sobre o Sistema Internacional, ou mesmo sobre a segunda lei de Newton, é pos-

sível que revelasse falta de conhecimento sobre os conceitos. Naturalmente não estamos sugerindo a exclusão de questões desse tipo dos livros didáticos ou das avaliações escolares; não é o caso. Contudo, ela deve ser complementada com outras formas de avaliação que visam valorizar outras inteligências enquanto verificam a compreensão profunda dos conceitos físicos ensinados.

- Ainda não existe a cultura de avaliar outras capacidades intelectuais
  Não existem testes escritos que se prestem a averiguar características típicas de um bom líder, ou de um bom jogador de futebol, ou de um bom músico. Isso acontece simplesmente porque tais qualidades emergem na ação e não há meios de detectá-las, com confiança, pelo sistema tradicional de avaliação. Em outras palavras, os testes formais e escritos são especialmente favoráveis ao indivíduo que possui certa mistura de inteligência linguística e lógica, e que fica à vontade ao ser avaliado em um ambiente descontextualizado, em um tempo determinado e em condições impessoais, mas desfavorecem aquele que se manifesta melhor em projetos continuados ou trabalhos em equipe. Em síntese, a sociedade escolar, além de colocar as duas inteligências em um pedestal, não cria meios seguros de avaliar as outras inteligências. Essa "massificação" imposta pelo sistema avaliativo parece surgir da insistência em querer lidar com os alunos da mesma maneira e de aplicar o mesmo tipo de métrica a todos eles. Tal procedimento é considerado por pesquisadores da área de ensino e avaliação, injustificável em termos científicos e até ofensivo em termos éticos.
- O aluno sabe em que parte da matéria estará a resposta esperada
  Outro problema comum do processo avaliativo brasileiro é resultado da cultura de sequenciamento e de avaliação acumulativa, ou seja, avaliar sempre aquilo que foi ensinado na semana ou no mês anterior. Os alunos sabem de antemão em que "capítulo" está o problema colocado na avaliação e, assim, usam essa informação para decidir que conceitos e fórmulas serão relevantes para a solução. Um exemplo figurativo e esclarecedor sobre esse assunto é o seguinte: se uma pessoa é solicitada a listar rapidamente e "de cabeça" cinco coisas brancas quaisquer, talvez leve mais tempo do que levaria caso tivesse sido solicitada a listar cinco coisas brancas comumente encontradas dentro de uma geladeira. É importante notar que ela poderia, na primeira pergunta, ter escolhido coisas da geladeira, mas esse comando não havia sido passado. Na segunda tarefa, o comando restritivo, assim como ocorre com exercícios cujo tema está em andamento, pode ajudar muito para que se chegue à resposta correta, ainda que não haja uma compreensão real da razão da escolha de tais leis ou conceitos.
- Rigidez dos momentos de avaliação
  Dependendo da maturidade cognitiva, emocional e psicológica do estudante, pode ser particularmente fácil ou difícil o domínio de certos tipos de assunto. Essas diferenças de personalidade implicam diferenças também no tempo de aprendizagem de cada um. Não parece justo que o aluno se submeta a testes sem que esteja devidamente preparado para enfrentá-lo. O teste é que deveria esperar pelo preparo adequado do aluno. Quem está a serviço de quem? No entanto, estamos cientes do limite temporal imposto pelo próprio programa curricular do Ensino Médio. Mas julgamos que o engessamento curricular deveria ser intermediado por uma prática saturada por bom senso e flexibilidade.

O que deveria ser avaliado?

O papel da avaliação deveria ser ampliado para além do conceito tradicional da realização de provas. No lugar de ser imposta em momentos espaçados, poderia ser contínua e natural, parte constituinte do processo de ensino-aprendizagem e de diálogo entre professor e alunos. A concepção arraigada e difundida do teste que seleciona e que classifica deveria, aos poucos, dar lugar à ideia da avaliação que integra harmonicamente os diferentes. Naturalmente, mudanças assim deveriam ser executadas coletivamente, e não por iniciativas isoladas. O primeiro incentivo à mudança deveria partir dos dirigentes e políticos que zelam pela educação do país e, conforme discutimos no tópico 4, entendemos a implantação do Novo Enem como um enorme passo nesse sentido. A mudança para um ensino de qualidade deve estar respaldada por avaliações que verifiquem e ajudem a promover tal ensino, não significando que devemos abandonar por completo o sistema atual de avaliação, mas sim complementá-lo e aprimorá-lo. Um novo paradigma avaliativo deveria nascer de razões mais humanas e acolhedoras que não excluam, mas incluam, que não selecionem, mas integrem. Tendo razões mais abrangentes e humanas em mente, é possível caminhar para as especificidades que ajudam na concretização dessa nova intenção avaliativa. Agora apresentamos alguns pontos que podem servir de base para o leque de habilidades e saberes que poderiam ser avaliados pelo novo panorama avaliativo sugerido.

- Entendimento profundo e não superficial
  As avaliações devem revelar o entendimento em vez de meramente mostrar a capacidade de reproduzir fatos ou desempenhar habilidades isoladas. Deve testar a compreensão profunda, e não a superficial. Uma pesquisa em educação se tornou famosa pela resposta que os alunos deram à seguinte pergunta: há 26 carneiros e 10 cabras em um navio, quantos anos tem o capitão? Por incrível que possa parecer, a maioria dos alunos do grupo entrevistado forneceu como resposta 36 anos de idade. Essa resposta é produto direto dos problemas levantados sobre a avaliação tradicional, em que os alunos acreditam que devem manipular os dados da questão para chegar à resposta esperada, sem a necessidade de um entendimento real daquilo que está em jogo. O ato de elaborar respostas se mecanizou a tal ponto que, por vezes, exclui uma mínima reflexão acerca dos conceitos envolvidos e, em muitos casos, como nesse estudo, um aparente descaso em relação ao significado da solução encontrada. Talvez seja importante enfatizar que uma compreensão profunda não precisa necessariamente vir acompanhada de uma destreza afiada na linguagem da Matemática. A compreensão deve ser avaliada e desenvolvida gradualmente, ao longo do processo de ensino. Professores que entendem a avaliação como meio que leva à aprendizagem prestam muita atenção ao progresso individual de seus alunos e idealizam tarefas apropriadas. Apresentam aos estudantes dificuldades moduladas, desafiadoras o suficiente para manter o envolvimento, mas não tão difíceis a ponto de desencorajá-los.
- Transferência
  Já mencionamos em outros tópicos que uma aprendizagem significativa deve ser capaz de passar no teste da transferência, que tanto serve como meio para um ensino de qualidade quanto como forma de sondar se o ensino gerou aprendizagem. Tem pouco alcance significativo um ensino de porcentagem cujos exemplos sejam retirados apenas do contexto financeiro de juros, taxas e montantes. Não há problema algum em utilizar também

esse contexto, contanto que o ensino elucide o aluno a respeito da existência de outras aplicações práticas e abstratas para o mesmo conceito. Ainda nesse sentido, não parece eficiente passar por toda Mecânica fazendo com que o aluno acredite se tratar da Física de "bloquinhos" e planos. Tal atitude limita o alcance da aprendizagem e restringe o leque de habilidades que poderiam ser trabalhadas a partir desse tema. Uma transferência ainda maior, que será vista no tópico 8, diz respeito à capacidade de lançar mão dos métodos e conceitos de uma ciência ou disciplina escolar no domínio de atuação de outra. Mas a transferência não precisa ser trabalhada apenas a partir de exemplos imaginados ou praticados dentro da sala de aula. O passeio a um museu, a ida a um cinema ou teatro, a análise de uma música ou poesia, a visita técnica a uma usina, enfim, todas essas são ocasiões em que pode ser trabalhada e testada a transferência dos conceitos estudados.

- Sobrevivência
  Aprender implica, também, apreender. A sobrevivência já foi igualmente mencionada em outras passagens deste Manual e, assim como a transferência, tanto serve como meio para a aprendizagem quanto como objeto a ser avaliado. Ela ameniza o problema mencionado sobre o aluno saber em que parte da matéria serão ancoradas as perguntas da prova. A sistematização da cobrança do que foi aprendido no passado serve de inspiração para o aluno treinar o resgate e o fluxo dinâmico dos conceitos presentes em sua mente, faculdade mental comum àqueles que, em outros tópicos, denominamos especialista competente.
- Criatividade
  De acordo com Monica Martinez, doutora em Ciências da Comunicação e autora de estudos sobre o pensamento criativo, a criatividade não só pode como deveria ser desenvolvida na escola. Para ela, criatividade é a qualidade de quem possui inventividade, inteligência e capacidade para criar, inovar, ser original. Em sua visão, o nascimento de uma ideia é parte de um processo que depende de fatores como personalidade, conhecimento, habilidades pessoais, motivação e ambiente apropriado. Acredita ainda que ser criativo é uma característica que precisa ser alimentada, elaborada, mas decorre muito mais do esforço individual e do aprimoramento das próprias qualidades, mediante a aplicação de técnicas e dedicação, do que de um dom ou de um talento extraordinário. Talvez seja complexo demais atribuir notas para a criatividade de alguém. Todavia, o novo paradigma avaliativo sinalizado por pesquisas modernas em educação, avaliações subjetivas, sem atribuição de notas classificatórias, são bem-vindas. Desse modo, a criatividade, anteriormente vista apenas como função cognitiva a ser valorizada e desenvolvida, passa a pertencer também à lista de qualidades a ser avaliada. Existe, entretanto, uma função cognitiva presente nas mentes inventivas e que pode funcionar como algo de concreto para o professor desejoso de uma avaliação mais pragmática. Trata-se do pensamento divergente, ou seja, a capacidade de produzir uma variedade de respostas para uma mesma pergunta. Curiosamente, uma pesquisa comparou essa função ao longo dos anos em um grupo de crianças e, para surpresa (ou não) dos educadores, ela diminuiu com o passar do tempo para as crianças do grupo analisado. A hipótese aventada pelos autores da pesquisa é a de que o sistema tradicional de ensino, ao negar repetidamente respostas para perguntas simples das crianças durante os primeiros anos escolares, alegando se tratar de assuntos futuros, acaba podando essa natural característica infantil. Outra função cognitiva associada à criatividade e também passível de ser treinada e avaliada na escola é a fluência ideacional associativa, ou seja, a capacidade de produzir muitas relações pertinentes a uma mesma ideia ou conceito. Ambas as capacidades, quando amparadas por um ensino e uma avaliação que as valorizem e as promovam, poderão fazer surgir o pensamento criativo do aluno.
- Capacidades relacionadas às outras inteligências
  Alunos que não demonstram um bom desempenho em provas por vezes surpreendem colegas e professores pela capacidade e pela desenvoltura em liderar grupos, organizar eventos, atuar em uma peça, etc. A avaliação deveria reconhecer e prestigiar a existência das diferentes inteligências da mente humana. Contudo, a inércia do sistema avaliativo dificulta mudanças. Mesmo professores e educadores, que deveriam encabeçar o movimento de mudança do perfil avaliativo, por vezes replicam impensadamente o tipo de avaliação aos quais foram, eles mesmos, submetidos por toda a vida escolar e universitária. Como agravante, não existe ainda uma forma consolidada e disseminada para avaliar as outras dimensões da cognição. As pesquisas apontam como promessas para esse propósito cenários avaliativos totalmente repensados, uma vez que essas outras inteligências não possuem a natureza escrita intrínseca à inteligência linguística e à inteligência lógico-matemática. Essas outras inteligências manifestam-se na ação, e não na escrita. Assim, avaliar tais capacidades humanas requer a elaboração de circunstâncias propícias para que se manifestem, além de uma forma sistemática de observação e detecção de tais manifestações. Em outras palavras, foge completamente daquilo que os professores já se sentem preparados e estão habituados a fazer. Consequentemente, levar em conta as outras capacidades humanas durante as avaliações escolares vai demandar estudo, preparo, organização e ações coletivas por parte de professores e dirigentes.

Tipos de avaliação

Tentaremos fazer um breve resumo com o objetivo de familiarizar aqueles que ainda não tenham uma visão clara a respeito dos diferentes tipos de avaliação escolar. O resumo, evidentemente, não substitui um estudo mais aprofundado a respeito do tema. Atualmente a literatura sobre o assunto é vasta, e algumas indicações e sugestões de leituras que abrangem esse e outros tópicos sobre educação foram inseridas no tópico 5.

- Escrita *versus* verbal
  Não ser capaz de expressar-se hábil e corretamente na forma escrita não é sinal de ausência de conhecimento. Não são raras as ocasiões nas quais os alunos fornecem respostas verbais muito mais precisas e próximas dos conceitos aceitos cientificamente do que quando requisitados para redigir a resposta à mesma pergunta. Obviamente a abrangência da avaliação verbal não é a mesma da escrita. Pedir a um aluno que resolva uma equação verbalmente poderá trazer dificuldades relativas ao tipo de raciocínio e operações que tal resolução demanda, mas isso não elimina a avaliação verbal, apenas a posiciona quanto às suas possibilidades.
- Somativa *versus* processual
  Se o professor se espanta com as notas de seus alunos ao final do bimestre, talvez o problema esteja no espaçamento temporal entre suas avaliações. Esperar o final de uma sequência de aulas ou de um bimestre para avaliar os alunos pode acarretar a desagra-

dável surpresa de eles não atingirem a expectativa de aprendizagem esperada. Uma avaliação contínua ajuda a monitorar o progresso dos estudantes. Ela revela ao professor em que ponto do caminho que leva do raciocínio informal para o formal se encontra cada aluno; essa informação auxilia o professor no planejamento do próximo passo da instrução.

- Informativa *versus* formativa
  É comum encontrar na literatura sobre avaliação as designações "formativa" e "processual" como sinônimas. Entretanto, preferimos reservar a palavra *formativa* para referir-se ao tipo de avaliação que tem como principal objetivo promover a formação, ou seja, ser um momento de aprendizagem para o aluno. Evidentemente, uma avaliação ao mesmo tempo formativa e processual já estaria muito mais próxima da avaliação esperada por um ensino idealizado, uma vez que proporcionaria tanto a formação do aluno quanto o *feedback* constante para aluno e professor. Seja como for, tem pouco mérito na visão de pesquisadores em ensino uma avaliação informativa, que busca detectar apenas conhecimentos factuais, como datas, definições, exemplos isolados, entre outros tipos de informação. Foi-se o tempo no qual se valorizava alguém pelo tamanho da lista de informações memorizadas, como capitais, constantes físicas, datas, etc. O acesso à informação crua, atualmente, se dá de maneira tão dinâmica que avaliar a memorização de dados parece ser totalmente desprovido de relevância em um ensino moderno.
- Padronizada *versus* customizada
  Ainda que se possa argumentar a favor de avaliações padronizadas em âmbito nacional, conforme o exame do Enem ou provas de admissão em universidades, essa argumentação não encontra respaldo no ambiente de sala de aula. Alunos diferentes podem e devem ser avaliados diferentemente. Maturidades intelectuais diferentes precisam de estímulos avaliativos também diferentes. Se a avaliação representa um momento de aprendizagem e se dá de forma contínua, então nada mais natural que tais avaliações sejam customizadas às necessidades de aprendizagem de cada um dos alunos. Como dito no item sobre avaliação processual, as diferenças detectadas por meio desse modo avaliativo devem ser levadas em conta quando da elaboração do próximo passo da instrução, mas esse próximo passo inclui novas avaliações. Embora a redação de questões distintas regularmente para um grupo grande de alunos represente uma tarefa praticamente utópica, a flexibilidade na escolha das formas de avaliação pode funcionar para que se crie um instrumento avaliativo adequado às especificidades de cada aluno. Um instrumento assim customizado pode ser fruto da composição planejada de avaliações que requerem menor tempo de aplicação, como avaliações verbais, subjetivas e coletivas.
- Impessoal *versus* pessoal
  Não faltam relatos sobre alunos apáticos e indiferentes no ambiente escolar, mas que apresentam uma autonomia surpreendente quando motivado por desejos e interesses pessoais. A manifestação de virtudes diferenciadas poderia ser provocada, em ambiente escolar, por avaliações atraentes que suscitem interesse pessoal do aluno. Exemplos de avaliações desse tipo são textos produzidos individualmente e depois compartilhados com colegas ou no mural da escola, ou ainda a apresentação de um experimento cuja elaboração foi viabilizada apenas por intermédio da cooperação e união de qualidades únicas de cada aluno ou uma apresentação qualquer na qual o aluno poderá revelar habilidades e capacidades até então omitidas e desconhecidas por professores e colegas. Trabalhos como esses podem servir de pretexto para que você coloque em ação seu plano de ensino, inserindo intencionalmente tarefas que ajudem o aluno a desenvolver habilidades que em outras ocasiões não se mostraria disposto a desenvolver, ou a se apropriar de conteúdos que, no contexto tradicional, não se mostraria disposto a aprender. Esse interesse e essa motivação adicionais podem ser utilizados para que o professor não somente avalie outras inteligências, mas também aproveite o momento para mostrar ao aluno o prazer e o benefício de um maior comprometimento pessoal com a aprendizagem.

Sugestões de uso do livro como recurso avaliativo

Somos favoráveis ao uso dos vários trechos do livro como fonte diversa para avaliações. Estamos cientes da escassez de tempo disponibilizado para aulas de Física na maioria das escolas brasileiras. Assim sendo, a avaliação pode ser explorada, também, como forma de compensar esse descompasso entre quantidade de conteúdos e número de aulas. Acreditamos, portanto, que um planejamento bem-feito e executado com rigor poderá incorporar a cobrança de um largo espectro de atividades avaliativas, como relatório de pesquisa, interpretação de textos do livro, resolução de exercícios do livro, realização de resenhas explicativas de experimentos propostos, debate em grupo, entre outras formas que o professor estabelecerá tomando como critério principal as características de seu alunado e sua intenção didática. Ao longo do desenvolvimento do conteúdo, em cada capítulo da Coleção, o professor encontrará diversas sugestões para compor e complementar o processo de avaliação.

Faremos algumas sugestões mais específicas de como vincular seções do livro com diferentes tipos de avaliação.

Seções

Compreendendo o mundo e Física explica

São duas seções destinadas justamente à aplicabilidade da Física em tecnologias diferentes, permitindo que a transferência seja testada de forma natural. Os diferentes contextos necessários à transferência já são dados e descritos. Cabe ao professor utilizá-los para o fim de desenvolver e testar transferência. Além disso, de forma geral, a compreensão minuciosa de tecnologias e fenômenos naturais demanda um entendimento profundo das leis e dos conceitos físicos que regem tal fenômeno ou tecnologia e, portanto, serve como oportunidade para avaliar o grau de entendimento do aluno, se superficial ou profundo, a respeito das leis trabalhadas no capítulo.

Em construção e Física tem história

As duas seções poderão ser utilizadas como ponto de partida para o resgate de conceitos físicos abordados anteriormente e que estejam associados a pesquisas e personagens históricos relatados na seção. Dessa forma, as seções podem ser vistas como recurso por meio do qual a sobrevivência dos conteúdos é avaliada e desenvolvida. Elas podem ainda ser utilizadas como maneira de avaliar até que ponto o aluno é capaz de articular as ideias das Ciências Humanas para compreender o avanço da ciência, mais um exemplo de transferência sendo avaliado. Por fim, serve para avaliar a visão que o aluno possui sobre as "duas" histórias: a da civilização e a da ciência; se eles percebem essas histórias como separadas, sem relação, ou como uma única história "contada" por perspectivas dis-

tintas. Trata-se, assim, de uma forma de avaliar o grau do entendimento dos conceitos físicos, se superficial ou profundo. Quando o entendimento do conceito físico em questão é profundo o suficiente, o aluno percebe seu nascimento e até mesmo sua funcionalidade como consequência direta da própria história da humanidade.

Trabalho em equipe e Experimento

Este é um momento promissor para a avaliação e a promoção de capacidades associadas às inteligências interpessoal e intrapessoal. Obviamente o produto final da pesquisa deve ser considerado elemento a ser avaliado, mas a interação entre os membros do grupo durante o processo também serve como avaliação. De que forma o aluno expôs suas ideias? Como reagiu à não aceitação de suas ideias? Procurou compor as diferenças para que se conseguisse um trabalho mais completo ou supervalorizou as próprias opiniões? Em que medida foi capaz de liderar ou aceitar a liderança de outro? Seus colegas de grupo acharam sua participação harmônica ou inoportuna? Em que grau se comprometeu com a realização e a qualidade do trabalho proposto?

Retomando

Seção por meio da qual se pode avaliar e desenvolver criatividade, algumas de suas questões não apresentam uma resposta fechada, admitindo maior debate para estimular o uso e o treino do pensamento divergente. Recomendamos ao professor que assegure ao aluno que a criatividade, assim como sua inteligência, é passível de se desenvolver, bastando que haja um empenho regular e orientado nesse sentido.

Palavras finais

Em que pesem as avaliações injustas e inadequadas que certamente todo cidadão há de deparar em sua jornada na vida, que ao menos na escola essas avaliações sejam repensadas para promover o fortalecimento da personalidade da criança, inocente por natureza e muitas vezes despreparada para as pressões que encontra já nessa idade. Que a realidade da cognição multifacetada por inteligências diversas seja considerada no processo avaliativo, de forma a torná-lo mais justo e menos estigmatizador. Segundo Douglas Fox, em artigo publicado na *Scientific American Brasil*, as pesquisas em neurociência estão chegando à conclusão de que as leis da Termodinâmica podem impedir a continuidade da evolução do cérebro humano. O modo pelo qual tem evoluído ao longo dos milênios ocorre pela modificação física dos neurônios, de forma similar à miniaturização dos transistores. Mas tanto um quanto o outro parecem estar chegando aos limites do avanço e do aumento de eficiência. No entanto, Fox argumenta que a mente humana poderá encontrar vias melhores de se expandir sem a necessidade da evolução biológica adicional. Cita o exemplo das abelhas, que, agindo em sintonia, formam uma entidade coletiva mais inteligente que cada uma delas isoladamente. Tomando-se essa hipótese como cabível, é possível pensar que os próximos passos do aprimoramento da cognição humana se darão mais pela ação de capacidades interpessoais do que linguísticas ou lógicas. Sob esse ponto de vista, o caminho de um ensino que almeje a evolução harmoniosa da civilização deverá ser o da implementação de atividades avaliativas que respeitem as diferenças individuais dos jovens ao mesmo tempo que valorizam a conquista e construção coletiva da aprendizagem.

8 Estratégias didáticas e o conteúdo digital na prática pedagógica

O que o professor deve saber e saber fazer para estruturar sequências didáticas e planos de aula visando a um ensino de qualidade?

As estratégias didáticas representam parte do conhecimento que permite ao professor responder a essa pergunta. Elas podem ser entendidas como o conjunto de ações, práticas, métodos e tipos de atividade escolhidos com o respaldo de teorias e resultados de pesquisas em ensino. Servem para direcionar o processo de ensino-aprendizagem. Antes, porém, que iniciemos a explanação sobre tipos de estratégia didática, convém que alertemos para que não haja uma interpretação precipitada que costuma surgir após esse tipo de leitura. É muito comum que o professor, ao deparar com os fundamentos de uma estratégia didática pela primeira vez, se encante com suas possibilidades e compre a ideia como a salvadora para o ensino e para sua prática de sala de aula. Mas com esse encantamento surgem os modismos didáticos que se vendem como a panaceia para o ensino. O encantamento pode nascer, justamente, do entendimento parcial da teoria que sustenta tal estratégia. Estratégias didáticas adequadas ao ensino de Física não necessariamente devem se manter adequadas para o ensino de Matemática. Mesmo dentro da Física, as diferenças estruturais de conceitos e procedimentos demandam práticas didáticas também diferenciadas. Assim, reforçamos que não acreditamos em uma única estratégia ou em alguma teoria educacional que seja universalmente aplicável, que funcione em todas as circunstâncias. Somos adeptos, conforme mencionamos em tópicos anteriores, do pluralismo metodológico, também defendido e explicitado por Laburú, Arruda e Nardi em periódico de prestígio em educação, sob o título de *Pluralismo metodológico no ensino de Ciências*. A ideia simples que fundamenta o pluralismo é de que a pertinência de teorias e estratégias está atrelada à situação e à realidade do alunado em questão, e, desse modo, seu uso deve ser ponderado pela observação de inúmeros fatores que determinam sua validade e sucesso. Em síntese, perguntar qual técnica de ensino é melhor se torna o mesmo que perguntar qual ferramenta é melhor: um martelo, uma chave de fenda, uma faca ou um alicate; trata-se, nitidamente, de um questionamento esvaziado de sentido.

Finalmente, convém ressaltar que a apresentação de estratégias neste tópico tem o propósito único de ser um primeiro contato para o professor que ainda não o tenha.

Precisamos chamar a atenção para o fato de que vamos discorrer não apenas a respeito de estratégias para o ensino, mas também de fundamentos teóricos que as subsidiam. Por vezes, não explicitaremos a estratégia em si, mas somente aspectos teóricos que podem ser incorporados à consciência e à reflexão docente, influenciando a prática e a ação pedagógica.

Vale comentar que algumas das estratégias didáticas, para que vinguem, precisam da criação de estruturas de apoio material, da participação dos pais e, por vezes, da comunidade local. Dependem de condições que vão além da boa vontade e do conhecimento dos

professores. Sendo assim, algumas das estratégias que serão abordadas neste tópico devem ser compreendidas sob uma perspectiva coletiva para que possam de fato transformar a escola e se mostrar eficientes para amenizar problemas estruturais, como desinteresse, evasão e repetência.

Estarmos cientes de que o fenômeno didático ocorre sempre pela interação entre os três participantes do processo: professor, aluno e saber. Contudo, procuramos organizar as estratégias que serão expostas a seguir pelo grau de proximidade com cada um desses agentes. Com isso, iniciamos pelas estratégias mais centradas nos alunos, assim como as premissas teóricas correspondentes. Tal proximidade, por ser subjetiva, serve apenas como forma de organizar o tópico, sem que haja um sentido teórico mais profundo que a sustente.

Estratégias centradas no aluno

Concepções espontâneas e representações mentais

Se existe um resultado consolidado pelas pesquisas em ensino-aprendizagem e aceito como fato incontestável por grande parte dos educadores é a visão de que o aluno chega à sala de aula, mesmo nos primeiros anos escolares, com representações mentais bem estabelecidas sobre o funcionamento do mundo. Ainda que por vezes rudimentares, no sentido em que se distanciam bastante do saber formalizado pela ciência, as representações, estejam na forma de concepções espontâneas, conhecimentos prévios ou esquemas mentais, possuem um sentido de utilidade muito grande para a criança. Essas representações acerca do mundo foram construídas por observação, por tentativa e erro, pelo convívio familiar, social e cultural e permitem à criança interagir com a realidade e dela extrair aquilo que precisam para viver em sociedade. Existem diversas estratégias visando à aprendizagem que obedecem ao fundamento de que aprender é modificar as representações existentes na mente de cada um, aproximando-as cada vez mais de um conhecimento mais formal e, assim, permitir ao indivíduo uma interação e compreensão mais refinada da realidade que o cerca.

Outra premissa que embasa ações pedagógicas centradas no aluno diz respeito ao interesse individual. Caso o aluno não enxergue razão para modificar suas estruturas cognitivas, é possível que se acomode e prefira mantê-las. Afinal, tais estruturas vêm, até então, fornecendo explicações razoáveis e uma forma de negociar com os elementos da realidade com a qual ele já está habituado. Se não houver um interesse real em modificá-las e aprimorá-las, provavelmente não vai predispor o investimento de tempo e energia que a mudança demandaria.

Conflitos cognitivos

Com base nas premissas citadas, uma estratégia estudada por pesquisadores em ensino e praticada por professores é estabelecer conflitos cognitivos durante o processo de ensino-aprendizagem. Tais conflitos seriam induzidos por meio de um raciocínio expositivo, uma demonstração experimental ou qualquer outra maneira que tenha sido previamente planejada e pensada pelo professor. Os conflitos cognitivos teriam o papel de desestabilizar o equilíbrio da estrutura cognitiva vigente na mente do aluno de tal forma que se sentisse impelido em aprender e assimilar um novo saber capaz de reestabelecer o equilíbrio do estágio anterior. Algumas pesquisas, no entanto, indicam que o conflito, caso não seja realizado com cautela e no momento propício, poderá prestar um desserviço ao ensino, fazendo com que o aluno se feche definitivamente para aquele conhecimento, como que defendendo a harmonia cognitiva já conquistada.

Trabalho em equipe

Trabalho em equipe no ensino faz a vez de uma estratégia também fundamentada nas representações prévias do aluno e na necessidade de cultivar interesse. Como primeira justificativa, podemos dizer que o trabalho com os colegas é naturalmente mais atraente para o jovem, uma vez que a expectativa da socialização costuma ser mais sedutora na idade escolar. Um trabalho planejado com rigor e seriedade pelo professor ou pelo grupo de profissionais da escola poderá promover situações em que o aluno deverá externar suas opiniões e negociar significados a respeito de objetos e conceitos. Em ocasiões como essas, suas representações prévias afloram e tornam-se perceptivas para o educador, que, em posse dessas informações, deverá conduzir o trabalho de forma que propicie a reformulação de proposições incorretas acerca dos fenômenos e dos conceitos em pauta. Existem várias modalidades de trabalho em equipe, que se distinguem por seus idealizadores assim como pela maneira com que buscam prender o interesse do aluno. Entre trabalhos em equipe mais duradouros, com expectativas de aprendizagem mais abrangentes e que geralmente são adotados como componente curricular oficial da escola como um todo, destacam-se os *centros de interesse*, *projetos de trabalho* e *temas geradores*. Além das premissas que sustentam o processo pedagógico protagonizado pelo aluno, ou seja, a aprendizagem entendida como fruto da evolução das representações próprias e o interesse como necessidade para aprendizagem, essas três estratégias ainda possuem em comum:

- valorização da aprendizagem por descoberta, sempre acompanhada da orientação de um educador preparado;
- as intervenções do educador, que têm como principal objetivo problematizar, tomar distância e fornecer meios para que todos os alunos se envolvam no debate;
- o protagonismo do aluno, que deverá encaminhá-lo à autonomia; portanto, um dos objetivos com trabalho em grupo é que o aluno aprenda a aprender;
- o objeto ou tema do trabalho associado à realidade do grupo, de tal sorte que promova relações entre situações significativas em nível individual e coletivo;
- o diálogo mediado pelo professor como essência do processo.

Vale dizer ainda que a discussão de significados entre colegas de classe, durante trabalhos em grupo, possui a vantagem extra de diminuir a assimetria de conhecimentos entre aquele que ensina e aquele que aprende. Em termos psicológicos, o conhecimento mais profundo e complexo do professor pode ser encarado pelo aluno, ainda que em nível inconsciente, como uma ameaça ou sinônimo de maior poder, inibindo a abertura necessária à mudança e aceitação do novo. Uma vez mais aproveitamos para ressaltar a relevância do trabalho em grupo desde a infância, preparando as habilidades que deverão ser mobilizadas na fase adulta. Grandes empresários e empreendedores insistem em observar a importância de se saber trabalhar em equipe, principalmente diante dos problemas modernos de complexidade nunca antes vista. Inovações e soluções para problemas como a fome, a poluição e a pobreza muito provavelmente partirão de equipes colaborativas e criativas.

Estratégias centradas na relação aluno-saber

A seguir, discorreremos um pouco sobre teorias e estratégias focadas na relação aluno-saber. São teorias que relacionam a forma e organização do conhecimento com o respectivo impacto na aprendizagem.

Campos conceituais e situações-problema

Gérard Vergnaud, psicólogo francês, cujo trabalho de doutoramento foi orientado por Jean Piaget, elaborou uma teoria chamada **teoria dos campos conceituais**, cujas premissas são amplamente discutidas por educadores e pesquisadores em ensino. Vergnaud defende que o conhecimento está organizado em campos conceituais, cujo domínio por parte do sujeito ocorre ao longo do tempo, por experiência, maturidade e aprendizagem. Campo conceitual seria o conjunto de situações, conceitos, relações, conteúdos e operações de pensamento relacionadas a um domínio teórico do conhecimento. Os elementos do conjunto se entrelaçariam, pouco a pouco, durante a aprendizagem. De acordo com sua teoria, um conceito não se forma dentro de apenas uma situação, do mesmo modo que uma situação não se analisa a partir de um só conceito. Essa teoria parte do pressuposto de que a assimilação de todas as propriedades de um conceito pode levar anos para ocorrer e, no meio do caminho, é natural a presença de mal-entendidos e analogias malfeitas. Sob esse ponto de vista, o aperfeiçoamento cognitivo e as respostas do sujeito evoluem à medida que encontram uma combinação de tarefas dentro de situações que serão dominadas paulatinamente. São as situações que conferem sentido a um conceito, portanto um conceito torna-se significativo por meio de uma variedade de situações. Uma estratégia didática decorrente dessas premissas teóricas é conhecida como situação-problema, implantada pelo oferecimento de situações atraentes o suficiente para que o aluno se predisponha a enfrentá-la e cujo enfrentamento e solução se dará apenas pela apropriação de novos conhecimentos. Aquele que cria a situação-problema deve conhecer os conhecimentos prévios de seus alunos e identificar o tipo de situação mais apropriada para tal perfil cognitivo. A interação aluno *versus* situação-problema o leva ao reconhecimento da ineficiência de seus esquemas e ao trabalho no sentido de reestruturá-los, ou seja, o enfrentamento tem como consequência uma aprendizagem significativa.

Obstáculos didáticos

Gaston Bachelard, citado no tópico 3, concebeu uma teoria epistemológica para a evolução da ciência e sugeriu sua utilização também em âmbito educacional. Introduziu a ideia de obstáculo epistemológico que, em educação, tem seu análogo conhecido como obstáculo didático, que é aquilo tomado como certo e indiscutível e que, até certo ponto do desenvolvimento do sujeito, o ajuda a progredir e a aprender, porém, inevitavelmente chegará o momento em que a nova aprendizagem se dará somente pelo abandono dele, que, até então, parecia infalível. Não devemos confundir obstáculos didáticos com concepções ou representações espontâneas, pois os obstáculos são muito mais difíceis de serem detectados, uma vez que, até certa altura do processo de aprendizagem, ele é de fato algo correto e utilizado para resolver problemas. Assim, modelos aproximados do real, muito comuns em Física, assim como analogias que ajudam a ilustrar, são exemplos de raciocínios válidos, mas que poderão representar futuros entraves para a aprendizagem, ainda que, durante um tempo, sejam essenciais para que ela ocorra. Um obstáculo muito citado no ensino de Matemática é a ideia de conceber a multiplicação como um caso particular da adição. É inegável que a operação de multiplicar três vezes o número 5 pode ser entendida como a adição consecutiva de três números 5. No entanto, isso que é verdade e funciona adequadamente para os números inteiros pode representar um obstáculo didático para a aprendizagem quando o aluno depara com a multiplicação de dois números decimais quaisquer, para a qual deixa de valer esse raciocínio. A estratégia didática que nasce da teoria de obstáculos é do ensino promovido por meio da superação deles. Alguns pesquisadores, como o francês Jean-Pierre Astolfi (1943-2009), sugerem até mesmo uma reforma curricular no programa escolar baseada na teoria de obstáculos didáticos.

Teoria antropológica do didático

Yves Chevallard, pensador francês citado no tópico 2, trouxe para o ensino duas teorias que vêm sendo muito estudadas por educadores. Uma delas é a teoria da transposição didática, que será discutida mais adiante. A teoria da transposição didática foi complementada anos depois pelo próprio Chevallard, que passou a chamá-la de teoria antropológica do didático. Tentando colocar em termos simples, trata-se de uma teoria que argumenta que, por trás de toda atividade humana regular, existe um corpo organizado de saberes, tácitos ou explícitos, mas que podem ser separados em quatro grupos que diferem por sua função: **tarefa** é aquilo que o ser humano precisa realizar, executar; **técnica** é a maneira pela qual se executa essa tarefa; **tecnologia** é o conjunto de proposições que justificam, explicam e estabelecem o grau de validade de uma técnica, enquanto **teoria** seria a explicação da própria tecnologia. Essa classificação pode ser de grande valia para o planejamento de aulas e atividades didáticas. Como exemplo, o professor pode planejar uma atividade experimental conduzida por um conjunto de tarefas a ela associadas, sendo que sua intenção didática é que o aluno se aproprie das técnicas necessárias à realização de tais tarefas, bem como das tecnologias e teorias subjacentes. Além disso, a atenção para a presença desses quatro elementos pode ajudar a detectar aquilo que falta para um entendimento mais completo de um assunto. Constitui ainda uma maneira de organizar e agrupar os saberes que estão em processo de aprendizagem, o que facilita sua recuperação e utilização mais fluente em contextos diversificados.

Técnicas de metacognição

O ato de refletir sobre aquilo que está sendo aprendido, buscando a autoconscientização do progresso de aprendizagem, do alcance do que já se aprendeu e daquilo que ainda falta aprender, enfim, é a monitoração recorrente da própria aprendizagem. Trata-se de um conceito utilizado como estratégia didática, a metacognição. Essa monitoração teria o papel de auxiliar a organização do conhecimento novo e sua associação com o antigo, o que otimizaria o processo de aprendizagem ao mesmo tempo que favoreceria o desenvolvimento da autonomia, em particular, do autodidatismo. No ensino de Física para o Ensino Médio, algumas perguntas podem contribuir para que o aluno monitore a própria aprendizagem. Durante o período de aprendizagem de um tópico, o aluno poderia manter em mente um conjunto de perguntas que, de certa forma, expressam o nível de compreensão já alcançado sobre o tema em estudo. Perguntas como: Qual o vocabulário

específico do assunto? Quais as grandezas envolvidas? Qual a matemática envolvida? Quais os exemplos e contraexemplos comuns? Quais as condições de validade das leis e teorias? Quais os fenômenos naturais associados ao assunto? Os conceitos e leis podem explicar alguma tecnologia? Qual o contexto histórico em que foi concebido? Quais operações eu devo ser capaz de realizar? De que forma os novos saberes se relacionam aos conhecimentos que eu já possuía?

Estratégias centradas no professor

Teoria da transposição didática

A primeira teoria trazida para o campo da educação por Chevallard foi a teoria da transposição didática. De acordo com os preceitos da teoria, a necessidade de se ensinar um conhecimento conduz à necessidade de modificá-lo para que se transforme em objeto de ensino. Antes, um conhecimento utilizável, agora um conhecimento utilizável e ensinável. Ao ingressar na escola, o saber sábio, aquele obtido no meio acadêmico, converte-se em conteúdo curricular. Para tanto, são feitas seleções, recortes, fragmentações, simplificações, linearizações, descontextualização, tudo para que os saberes ganhem uma roupagem de conteúdo escolar. É pouco provável que algum professor de Física do Ensino Médio utilize *Principia* de Newton em sala de aula, mas, ainda assim, não estaria no primeiro nível do conhecimento acadêmico, pois Newton certamente procurou conceber modificações em sua linguagem de modo a tornar a obra inteligível para aquele que a visitasse pela primeira vez. No entanto, os livros didáticos para o Ensino Médio "didatizam" ainda mais os saberes divulgados nas primeiras publicações do saber acadêmico. O professor, por seu turno, se apropria dos saberes expressos no livro didático e novamente aplica transformações que lhe adéquam à realidade de seu alunado. O processo poderá transformar o conhecimento a tal ponto que chegue a causar distorções ou inadequações daquilo que está sendo ensinado. Para que a contextualização histórica se recupere e que o conhecimento seja aprendido pelo aluno de uma forma mais próxima de sua origem, o conceito de vigilância epistemológica deverá permear o trabalho do professor. A vigilância epistemológica, conceito que faz parte da engrenagem da transposição didática, permite ao professor garantir a "sobrevivência dos saberes" no contexto da sala de aula. Trata-se de uma atitude individual que permite ao professor refazer o percurso do saber ensinado na sala de aula até o saber de referência gerado na academia, e verificar, de forma regular e sistemática, a pertinência, relevância e validade dos objetivos e conteúdos que se propõe a ensinar.

Tempo *versus* profundidade

Outra recomendação para a prática docente e que tem origem nos estudos sobre construção de competências diz respeito ao tempo investido em um assunto. Por vezes, a instrução é interrompida antes que o estudante desenvolva fluência naquele tópico. A tentativa de abranger muitos conteúdos rapidamente pode retardar a aprendizagem, pois os alunos precisam de tempo para estabelecer conexões com seus conhecimentos prévios e desenvolver habilidades. Um procedimento que se revelou como adequado em melhorar resultados de aprendizagem de alunos do Ensino Médio é aquele em que o professor inicia um assunto pedindo a seus alunos que façam uma leitura prévia a respeito do que será visto. Após a leitura, o professor direciona um debate elencando convergências e divergências de opiniões para então sintetizar os primeiros resultados de uma forma expositiva. O primeiro passo deve ser seguido da disponibilização de tempo para que o aluno pratique habilidades a partir do novo conhecimento e, assim, alcance uma formalização mais requintada dos conceitos envolvidos. Outro procedimento compatível com a necessidade do aprofundamento do tema, e que parece até facilitar a transferência dos conteúdos aprendidos de um contexto para outro, é a execução de um plano de ensino que incorpore uma quantidade razoável de exemplos variados, concretos e abstratos, além de contraexemplos e casos contrastantes. A variedade de exemplos do que "é" e daquilo que "não é" ajuda o aluno a delinear os atributos relevantes e irrelevantes de determinado conceito, o que permite a caracterização das várias facetas e das condições de validade de uma lei ou equação da Física.

Ações e práticas didáticas abordadas em outros tópicos

A seguir lembraremos algumas ações já vistas em outros tópicos e que podem ser entendidas como conhecimento e ações pedagógicas que contribuem para a formação de uma atmosfera favorável à aprendizagem:

- reforçar ao estudante a característica dinâmico-evolutiva da inteligência;
- usar avaliações como estratégia de ensino que levem em consideração inteligências e habilidades múltiplas;
- atribuir nexo a tudo que for ensinado, observando que nexo não é necessariamente obtido por utilidade, mas sim por conexões que promovam sentido e significado;
- estabelecer o processo dialógico durante as aulas, observando que o processo dialógico pressupõe a busca pelo entendimento das razões, opiniões, diferenças e interesses mútuos;
- respeito às diferenças culturais, religiosas, intelectuais, observando que respeitar pressupõe levar em conta as características do outro durante o planejamento e execução das ações pedagógicas;
- usar atividades experimentais tanto para verificar leis e demonstrar fenômenos como também para a investigação de fenômenos naturais;
- ensinar a Física como uma ferramenta para a compreensão e ação sobre o mundo, bem como para a satisfação em se entender e contemplar a natureza.

Relações entre as teorias e estratégias didáticas com a Coleção

O leque de conhecimentos, ações pedagógicas, práticas diferenciadas e estratégias didáticas relacionadas neste tópico pode causar a sensação de angústia ou ansiedade no professor, sensações típicas daquele que se conscientiza das inúmeras possibilidades de escolha. Por esse motivo é bom que digamos que é mais importante e pode trazer mais benefícios ao ensino o uso consciente e refletido de uma dessas estratégias do que a tentativa de utilizar impensadamente todas elas. Naturalmente, conforme mencionamos, estratégias e ações diferentes podem ter aplicações também distintas, porém, apenas um estudo contínuo somado à vivência da profissão possibilitará um uso apropriado e

sistemático dos conhecimentos pedagógicos. As figuras, textos, exercícios e atividades distribuídos no decorrer dos volumes da coleção servem como material de apoio durante a prática pedagógica. Não faz sentido, no entanto, vincular as diferentes seções e trechos do livro a alguma estratégia em particular. Cabe ao professor a tarefa de associar harmônica e conscientemente o pluralismo de atividades e seções do livro às suas ações e estratégias, levando em conta sua intenção didática e expectativas de aprendizagem e tomando por base as características cognitivas de seu alunado. Lembrando que a associação entre estratégia didática com trecho do livro não é de forma alguma tarefa simples, uma vez que depende de inúmeros fatores, como a complexidade do assunto abordado, a habilidade em foco, a natureza do conteúdo, conceitual, procedimental ou histórico, além da qualificação e destreza do próprio professor ao colocar em ação a estratégia escolhida.

Recursos digitais na prática pedagógica

Apesar de não haver um rigor muito sério a respeito do uso desses termos, convém fazer uma separação dos três tipos existentes de recursos digitais, essa que poderá contribuir para o esclarecimento de algo que pode ser novo para muitos: a diferença entre conteúdo digital, ferramenta digital e tecnologia digital. Conteúdo digital é o correspondente ao conteúdo escolar, mas que pode ser disponibilizado na rede, como textos, hipertextos, figuras, gráficos, etc. Ferramenta digital é o meio pelo qual o conteúdo digital está disponibilizado na rede, como, por exemplo, filmes, áudios, jogos, animações, simulações, hipertextos, *sites*, redes sociais, fóruns, *blogs*, etc. Finalmente, tecnologia digital é o instrumento que permite a conexão com essas ferramentas e respectivo acesso ao conteúdo digital, como computadores, *tablets*, telefones, lousas digitais, etc.

A utilização de todos os recursos digitais no ensino é cada vez mais frequente e facilita a comunicação entre os agentes do processo didático, além de ampliar as possibilidades pedagógicas. Podem permitir ou não a interação com o usuário. Animação, por exemplo, é uma representação dinâmica de um processo qualquer, como um fenômeno natural ou outro evento, mas que não admite a interação com o usuário. A animação funciona como um filme feito em linguagem computacional. Já as simulações usam linguagens que admitem a interatividade com o usuário, que pode alterar parâmetros e então modificar a dinâmica em curso. Videoaulas não interativas, dirigidas tanto a alunos do Ensino Básico quanto à formação docente, também ajudam a compor o conteúdo digital voltado ao ensino que pode ser encontrado na rede. Grandes universidades, nacionais e internacionais, disponibilizam gratuitamente cursos inteiros pela internet. Alguns deles são oficiais e atribuem titulação de graduação para o aluno, os conhecidos cursos de EAD (Ensino a Distância). Universidades públicas e outras instituições públicas e privadas ainda se valem dos ambientes virtuais de aprendizagem (AVA) para divulgar calendários, disponibilizar recursos didáticos digitais, além de organizar debates e discussões via fóruns síncronos ou assíncronos para seus alunos. Além disso, professores e alunos contam com um acervo enorme de demonstrações experimentais gravadas em vídeo e disponibilizadas de forma gratuita pelos canais da rede, além de grandes enciclopédias virtuais, dicionários *on-line*, entre tantos outros recursos didáticos digitais.

Pelas linhas anteriores podemos concluir que, por se tratar de ferramentas e meios para o ensino, as vantagens e prejuízos dos recursos digitais são causados, em última análise, pelo uso apropriado ou não que se faz deles. Com isso queremos dizer que devemos evitar a noção ilusória de que a simples presença do recurso digital garantiria melhores resultados de aprendizagem. Em contrapartida, o seu uso planejado e apropriado tem se mostrado eficiente em melhorar o ensino em vários cenários educacionais.

Se por um lado os recursos digitais por si só não asseguram a aprendizagem efetiva, eles certamente podem ampliar as possibilidades didáticas para o ensino de Física. Isso ocorre em razão de algumas de suas características básicas, tais como: o poder de visualização dinâmica de modelos científicos e fenômenos naturais, a interatividade usuário-tecnologia e a comunicação síncrona ou não síncrona entre usuários distantes.

Visualização dinâmica de modelos e a interatividade usuário-tecnologia

Quais eram as alternativas para representar, por exemplo, a superposição entre duas ondas gerando um padrão de interferência em um anteparo? Desenhar esse fenômeno no velho quadro-negro, além de ser tarefa quase impraticável para um não artista, limitava muito o entendimento subsequente à alteração de parâmetros como frequência, comprimento de onda, amplitude, largura da fenda, meio de propagação e natureza da onda. Animações e simulações, por intermédio das características de visualização dinâmica de modelos científicos e da interatividade citados, possibilita um entendimento que antes nem mesmo alguns professores eram capazes de alcançar. Antes disso, a saída que se mostrava mais eficiente e que ainda hoje é bastante utilizada para se entender a superposição de ondas é representada pela atividade experimental da cuba de onda, na qual dois estiletes vibratórios são usados para gerar ondas na superfície da água. Ainda assim, as variáveis que podem ser agregadas às programações computacionais por detrás das simulações, além de admitirem alterações e interações de forma mais dinâmica que a atividade experimental, abrangem um número muito maior de possibilidades. Além disso, a diversificação de parâmetros pode ser viabilizada em um tempo didático, por vezes, inferior àquele gasto com o quadro-negro ou com a atividade experimental. Atualmente, a quantidade de *sites* que disponibilizam gratuitamente animações e simulações de qualidade chega a assustar mesmo os mais otimistas e simpatizantes do uso de recursos digitais para o ensino de Física.

Outro argumento a favor dessa característica da tecnologia digital é que a substituição de imagens cristalizadas por simulações dinâmicas e interativas serve como recurso para a visualização de processos e objetos físicos abstratos, como campos elétricos, emissão e recepção de ondas eletromagnéticas, entre outros. Porém, justamente nesse ponto, os recursos digitais para o ensino de Física costumam sofrer algumas críticas, críticas relativas à sua adequação didática para o ensino do abstrato. Diferentemente de uma onda na superfície de um líquido, que representa um ente concreto, campos, emissão e propagação de ondas eletromagnéticas, por sua vez, são conceitos e objetos de natureza abstrata. Quando representados por animações e simulações, precisam incorporar elementos visuais reconhecíveis, como flechas representando vetores ou raios de luz, o que pode passar a falsa noção de realidade e concretude para tais elemen-

tos. Nesses casos, as imagens funcionam como analogias e não guardam uma relação precisa e verdadeira com os objetos que representam. Ocorresse isso em sala de aula, o professor tomaria o cuidado de enfatizar os limites e as correspondências da analogia, discutindo com o aluno o significado e a razão para a escolha de tais imagens. Contudo, em um ambiente virtual, caso o aluno esteja por conta própria, a correspondência inapropriada poderá, futuramente, funcionar como um entrave para a continuidade do ensino.

Comunicação síncrona ou não síncrona entre usuários

Caminhando para outro aspecto das tecnologias, poderíamos nos questionar sobre quais agentes do ensino os alunos poderiam dialogar antes da ascensão e inserção dos recursos digitais no ensino? O máximo idealizado para uma relação dialética no ensino era conferida pelas possibilidades: professor-aluno e aluno-aluno. Sob essa perspectiva, uma vez mais as possibilidades se ampliaram. Tem se tornando cada vez mais frequente, no ensino, o uso de serviços eletrônicos de correspondência, *chats on-line*, fóruns de discussão, redes sociais e inúmeras outras ferramentas digitais, tanto públicas quanto privadas, por meio das quais profissionais da educação compartilham seu conhecimento e interagem a distância com estudantes e outros professores ao redor do mundo. Mais uma vez a crítica aparece nesse ponto para destacar a importância da escolha consciente do tipo de interação, uma vez que, de forma geral, não há como verificar a qualificação dos profissionais do outro lado da rede.

Reflexões finais

Caso se aceite como um dos objetivos finais do ensino o de preparar estudantes para que se tornem futuros profissionais competentes e aprendizes autônomos, existe um argumento bastante convincente a favor do uso de tecnologias. Cada vez mais, cientistas e outros profissionais estão implantando sistemas colaborativos baseados em conexões via internet. Esse meio de comunicação vem ganhando força e importância no mundo profissional. Conforme vimos anteriormente, o trabalho cooperativo é fundamental para a conquista de solução de problemas complexos; por conseguinte, a aprendizagem colaborativa é um passo determinante no sentido de preparar o jovem estudante para a futura realidade profissional. O contraponto desse argumento se situa no fato aceito em educação que diz que, no ensino, diferentemente do que se poderia esperar em outras áreas, o "algo a mais" pode representar "algo a menos". No caso dos recursos digitais, o "a mais" pode estar na forma de sobrecarga de informação, o que atrapalharia o processo de conexões de que a aprendizagem carece para se estabelecer, transformando-se, portanto, em "a menos". Além disso, o excesso vai na contramão da importância atribuída ao empenho próprio, à tentativa e erro, à busca pelo acerto, enfim, ao dispêndio de energia e investimento de tempo. A dificuldade e superação conferem valor ao conhecimento obtido, contribuindo assim para sua permanência duradoura na estrutura cognitiva do aluno. Outro medo dos educadores diz respeito à facilidade pela qual o aluno se desvia de seu objetivo e se distrai em relação às suas metas quando navega na internet. A autodisciplina é qualidade indispensável nessas ocasiões e evitaria a perda de foco, contudo não há como assegurar que o aluno já tenha se apropriado dessa qualidade antes que acesse o mundo virtual. Sendo assim, é possível começar a elaborar o argumento de que o uso dos recursos digitais em ensino deve ser sempre mediado por um profissional da educação, que exercerá o papel de orientar, chamar a atenção, discutir, enfim, direcionar o rumo da aprendizagem obtida por intermédio desses recursos. Nossa crença é de que a exploração proveitosa de recursos tecnológicos conectados à rede exige a mobilização de habilidades relacionadas à pesquisa que, talvez, o jovem estudante ainda não seja capaz de demonstrar, pois a infinidade de informações, confiáveis ou não confiáveis, que estão disponíveis deverá ser analisada pelo sujeito que a acessa. Para uma análise como essa, ele deverá lançar mão de habilidades como identificar, selecionar, comparar, relacionar e tomar decisões que o capacitem a navegar no mar de possibilidades da internet, com uma bússola que lhe permita seguir um caminho seguro.

Vale terminar dizendo que, apesar do grande potencial de colaboração e aumento do espectro de possibilidades que os recursos digitais oferecem para o ensino, a nosso ver, nada substitui o professor presencial. O professor de sala é aquele que olha para seu aluno à procura de indicativos que vão além das possibilidades virtuais de interação. Ele fica atento aos sinais de motivação ou indiferença, de entendimento ou dúvida, de simpatia ou antipatia para, a partir daí, criar vínculos intelectuais por meio dos quais a relação dialógica, essencial à aprendizagem, se estabelecerá. De acordo com esse raciocínio percebe-se, principalmente nessa fase, em que a autonomia ainda não aparece como componente da personalidade do aprendiz, que o professor presencial representa o porto seguro que vai sustentar o desenvolvimento cognitivo do jovem antes que ele alce voo por conta própria. Nessa visão, os recursos digitais, a despeito do enorme potencial, devem ser vistos apenas como complemento didático, usado sob a orientação e recomendação do professor, quem vai assegurar seu uso a favor de um plano maior de ensino e aprendizagem.

9 Temas transversais

Por que a preocupação com a transversalidade no ensino?

A necessidade de articular conhecimentos disciplinares nasce do fato de que, no mundo, os processos e os objetos extrapolam os saberes de uma única disciplina escolar. Algumas situações com as quais especialistas de diferentes áreas deparam faz com que desenvolvam competências que mobilizam os aportes de várias disciplinas, além de conhecimentos próprios de seu campo de atuação. Um ensino atualizado, portanto, deve ser aquele que propicia conexões entre as diferentes áreas do saber na busca por explicações sobre o mundo, destacando e significando conceitos e problemas comuns a todas elas.

Com essa necessidade, fica fácil questionar a validade de um ensino fragmentado, que não explicita a relação epistemológica e prática entre domínios do conhecimento. Também é fácil entender a interdisciplinaridade, tendência atual do ensino, como a saída lógica para esse impasse, uma vez que a relação entre disciplinas proporciona uma visão unificada da natureza, ajudando o indivíduo a posicionar-se com mais propriedade e responsabilidade perante as questões que influenciam a vida coletiva.

Por que foram criadas disciplinas escolares?

A interação e a contemplação da natureza têm impulsionado o ser humano a buscar o entendimento sobre o mundo em que vive. Essa busca tem gerado um enorme acúmulo de conhecimentos. Desse modo, a separação e a organização dos saberes adquiridos são condições para que se dê continuidade ao estudo e ao aprofundamento de assuntos específicos. A classificação em temas afins facilita o trabalho de cientistas e estudiosos, que devem se apropriar dos conhecimentos anteriores e com base neles construir novos conhecimentos para o avanço da ciência. Em um primeiro momento, portanto, a reunião do conhecimento por padrões de afinidades surge da necessidade de dar continuidade à própria ciência, daí a ramificação em domínios e subdomínios de conhecimento ser uma constante na história da humanidade. Essa separação também possibilitou a especialização profissional, fundamental para a manutenção de uma vida harmônica em sociedade. Hoje em dia é muito comum a figura do especialista que dedica sua vida a estudar e se aprofundar em áreas específicas do saber. A partir daí exercem funções também específicas, porém essenciais ao bem-estar moderno, representadas pelas profissões de médico, cientista, geofísico, meteorologista, apenas para citar algumas.

Contudo, a divisão e o agrupamento por afinidade ainda estão associados à utilidade do conhecimento. Porém, quando o conhecimento entra na escola, cresce ainda mais a necessidade de modificá-lo, até mesmo com mais fragmentações e compartimentalizações, agora por razões didático-pedagógicas. O conhecimento que nasceu em um contexto e que serve para ser usado naquele contexto, quando migra para a sala de aula, deve se tornar um conhecimento ensinável. Para tanto, recebe modificações e descontextualizações bem descritas pela teoria da transposição didática. Vale notar, portanto, que a fragmentação do saber em disciplinas surgiu da necessidade de organizá-lo, tanto em âmbito profissional quanto em âmbito escolar e, portanto, teve uma razão de ser. Contudo, o acúmulo de saberes disciplinares na escola nos dias atuais é tamanho que é comum que o aluno e, por vezes, o próprio professor, se perca quanto aos motivos reais de ensinar determinados assuntos. Além disso, o motor propedêutico que tomou a escola por tanto tempo descaracterizou ainda mais os saberes escolares, transformando-os em algo que deveria ser aprendido sem que se buscasse explicitar razões claras para isso. Conforme mencionamos em outros tópicos, um ensino nesses moldes, sem atribuição de sentido e significado e fundamentado na enorme fragmentação em que se apresenta, gera uma aprendizagem mecânica não duradoura ou transferível a outros contextos. Saberes com pouca duração e não transferíveis contribuem pouco com as futuras necessidades profissionais e não profissionais do aprendiz. A separação, organização e classificação do saber adquirido foram ações motivadas por necessidades justas. Todavia, essas ações devem ser acompanhadas do esforço em se apontar o caminho de volta, fornecendo razões que unificam e reintegram esses saberes.

Qual é o problema da compartimentalização na escola?

O problema de um ensino fragmentado é supor que a integração dos saberes se dará de forma espontânea pelo estudante. Como vimos, questões ou situações reais demandam saberes de mais de uma disciplina escolar. As pesquisas em ensino de Ciências têm mostrado que essa integração entre saberes das diferentes disciplinas dificilmente ocorrerá caso não haja um trabalho didático-pedagógico planejado para esse fim, cujo objetivo seja o de preparar o aluno para a mobilização de saberes multidisciplinar.

De que forma levar em conta a multidisciplinaridade intrínseca à realidade?

Um trabalho didático-pedagógico que realmente considere a interdisciplinaridade deveria estar atrelado ao compromisso coletivo do corpo docente e, se possível, da comunidade local da escola. Algumas estratégias promissoras nesse sentido levam em conta as práticas sociais de referência, tidas como as atividades profissionais, ou não, que pertencem à cultura de uma sociedade e que servem de referência social para o ensino.

Assim, a ideia é haver uma caracterização das habilidades e conhecimentos associados a uma prática social reconhecida pelo aluno para, a partir dela, estruturar o plano de ensino-aprendizagem. Sob esse enfoque, o sentido do conteúdo seria dado de uma forma natural, já que o aluno teria consciência de que as situações propostas pertencem àquela prática que lhe é familiar.

Em uma comunidade na qual a indústria, por exemplo, tivesse presente, as práticas industriais poderiam servir de referência para o ensino. Desse modo, a escolha de produtos químicos, a automação de processos, o emprego de maquinários específicos, a elaboração e o *design* de produtos, os cuidados ambientais próprios à indústria, entre muitos outros elementos que consideram as atividades industriais, poderiam servir de base para a programação curricular da escola. Percebe-se, portanto, a necessidade de um trabalho minucioso por parte do corpo docente para que tal metodologia fosse levada até a sala de aula. Ela exige que os professores aventurem-se para fora de suas disciplinas e estejam dispostos a trabalhar com problemas que ultrapassam seus conhecimentos específicos.

Além disso, seria necessária uma reformulação, fundamentada e planejada, da transposição didática. Outras duas estratégias promissoras para um ensino interdisciplinar são os projetos temáticos e temas geradores, descritas no tópico anterior. No ensino por projeto ou por temas geradores, o conhecimento vai sendo construído, e as habilidades vão sendo desenvolvidas na medida em que surgem as necessidades, sendo estas identificadas tanto pelo aluno como pelo professor.

O conhecimento a ser aprendido será aquele exigido para a superação da fase em que se encontra o projeto, não importando seu caráter disciplinar. Assim, a composição e a articulação das disciplinas são um fator essencial para o avanço do ensino por projeto.

No entanto, assim como ocorre com as práticas sociais de referência, o trabalho por projeto ou temas geradores requer um compromisso coletivo dos profissionais da escola, sem o qual, dificilmente, o projeto atingirá objetivos significativos de aprendizagem.

O que essas metodologias de ensino têm em comum é o tratamento de temas transversais, temas que fogem da abordagem isolada das disciplinas escolares. Os assuntos escolhidos no trabalho por projetos devem ser complexos o suficiente para que ultrapassem os diferentes campos do conhecimento.

Temas transversais são aqueles que precisam do saber de várias disciplinas para que se tornem compreensíveis e que apontam problemas cuja solução se dá apenas pelo uso de métodos e saberes dessas diferentes disciplinas. Não faria sentido, portanto, um trabalho pautado pela transversalidade que tomasse a perspectiva rígida de apenas uma disciplina. Assim, pode-se dizer que a transversalidade de temas promove a articulação interdisciplinar e carece dela. Além disso, a transversalidade também admite a entrada de saberes extracurriculares na escola, uma vez que problemas reais ultrapassam a fronteira escolar. Como exemplos de temas transversais que fogem do domínio disciplinar, podemos citar: energia, poluição ambiental, saúde, ética, música e tecnologia.

A contribuição desta obra

Entendemos que o ensino centrado nas práticas sociais, por projeto ou por temas geradores, e que, portanto, favoreçam a interdisciplinaridade, devem originar-se de uma reorientação curricular e da aceitação, por parte do corpo docente, dessa nova maneira de conduzir o processo didático. Aquele que ambiciona uma prática docente com essas características, no entanto, deve estar subsidiado por um material didático que o auxilie. Deve contar com um material conveniente, que considere a visão de outras disciplinas, que proponha problemas que transcendam a solução disciplinar, que aborde temas transversais, relacionando as diferentes áreas do conhecimento, explicitando regiões afins e identificando regiões complementares.

Nesse sentido, procuramos elaborar um livro que pudesse dar sua parcela de contribuição para um ensino com a expectativa da interdisciplinaridade. Chamamos a atenção, no entanto, que, em nosso entender, um ensino assim pressupõe a utilização de várias fontes de pesquisa e não apenas do livro didático. Entendemos que será trabalho dos professores e dos próprios alunos pesquisar e selecionar fontes que tragam o conteúdo necessário para cada estágio do ensino. Entretanto, acreditamos que nossa Coleção tem muito a contribuir para um ensino interdisciplinar.

Durante a escolha e organização da obra, mantivemos em mente a necessidade de vincular os conceitos físicos às situações reais, situações cujo entendimento abarcasse disciplinas distintas. Por isso acreditamos que alguns exemplos fornecidos ao longo do texto central de cada capítulo poderão contribuir para o trabalho didático interdisciplinar. Essa contribuição se torna mais evidente, no entanto, nas seções **Trabalho em equipe**, **Física tem história**, **Física explica** e, em especial, na seção **Compreendendo o mundo**, seções que apresentam uma conexão direta com fatos, situações e tecnologias do cotidiano e cuja compreensão se dá pela articulação lógica de saberes multidisciplinar. Além disso, dedicamos uma unidade completa do segundo volume da Coleção ao estudo do tema transversal **Energia e Meio Ambiente**.

A escolha da inserção mais acentuada desse tema transversal é justificada por sua urgência e atualidade. Esse tratamento mais cuidadoso ao tema energia e meio ambiente se deu naturalmente, uma vez que sua conceituação passa, em Física, pelos assuntos abordados até aquela parte do curso do segundo volume da coleção. Apesar de a abordagem desse tema ter se dado principalmente pela via dos procedimentos da Física, fizemos referência, sempre que possível, aos saberes da Química e da Biologia subjacentes. Com isso procuramos contribuir, ao menos de forma moderada, para uma visão um pouco mais abrangente e integrada sobre energia e meio ambiente.

Conceitos unificadores em ciências

Para aqueles que almejam uma orientação mais específica sobre um ensino interdisciplinar bem planejado, descreveremos a seguir algumas sugestões encontradas no livro *Ensino de Ciências: fundamentos e métodos*, dos professores de pós-graduação em ensino Demétrio Delizoicov, José Angotti e Marta Pernambuco. Suas ideias, a nosso ver, trazem uma forma clara de organizar o ensino interdisciplinar. Os autores identificaram quatro conceitos que unificam conteúdos das Ciências Naturais e, desse modo, são úteis durante a seleção e construção curricular de um ensino que tenha como intuito a articulação lógica das Ciências Naturais.

Os quatro conceitos unificadores levantados pelos autores são: **transformação**, **regularidade**, **energia** e **escala**.

A ideia de **transformação** está presente tanto na Física como na Biologia e na Química, interligando conceitos de cada uma delas e entre elas. O movimento, os processos biológicos, a passagem do tempo, as reações químicas, e tantos outros exemplos, ocorrem sob o comando da transformação.

As **regularidades** governam as próprias transformações, ou seja, as transformações são passíveis de classificações e categorizações, justamente por apresentarem regularidades.

A **energia** incorpora os dois primeiros conceitos, uma vez que suas diferentes modalidades têm como principal característica comum a regularidade de se conservar ao se transformar. Além disso, essa característica se mantém imaculada, seja na perspectiva biológica dos seres vivos ou nos processos supostamente inanimados da Física e da Química. Aliás, energia talvez seja um dos conceitos que deixa a artificialidade da fragmentação disciplinar mais evidente, uma vez que as várias modalidades energéticas se intercambiam dinamicamente entre os objetos de estudo dessas três disciplinas, sem "preconceito" com nenhuma delas.

Finalmente, o conceito de **escala** unifica processos em nível micro e em nível macro, revelando suas regularidades físicas, químicas e biológicas. Existem fenômenos e processos que independem da escala e, quando isso ocorre, esses processos e fenômenos são sempre caracterizados matematicamente por uma lei de potência. Seus gráficos log-log apresentam-se sempre como uma reta inclinada.

Últimas considerações

Esperamos, com a elaboração desta obra e composição deste guia de orientações, oferecer aos professores um livro que possa ser utilizado de fato em sala de aula. Um livro que coopere com aquele que acredita no ideal do ensino transformador e da aprendizagem significativa voltada à formação da cidadania. Um livro que ressoe com a expectativa de formar cidadãos sensibilizados com os problemas modernos, cidadãos capazes de contribuir de forma competente para a busca de soluções éticas e para a melhoria do panorama mundial.

10 Sugestões de abordagem e resoluções

Apresentamos uma sugestão de abordagem acompanhada das resoluções dos exercícios de cada capítulo. As sugestões são baseadas nas experiências de sala de aula que tivemos. Porém, o caminho a ser trilhado por você pode, e deve, ser diferente do nosso, pois as situações são bem diferentes. Esperamos que essas sugestões o ajudem a criar o seu método de aula.

UNIDADE 1 – O calor e suas consequências

Antes de começar o trabalho com essa Unidade, sugerimos que você proponha uma discussão sobre os riscos e as causas da exposição solar excessiva. Apresente aos alunos as dicas básicas de proteção: uso de filtro solar, bonés e chapéus, ingestão frequente de líquidos, etc. Incentive uma pesquisa sobre os tipos de radiação solar e suas consequências para o corpo humano. Espera-se que os alunos concluam que a radiação mais perigosa é a UV-B, que, dependendo da exposição pode causar queimaduras e aumentar o risco de desenvolver câncer de pele.

CAPÍTULO 1 – Temperatura e calor

Este capítulo inicia uma nova fase de desenvolvimento do aluno, pois apresenta a combinação de vários fatores interessantes: a proximidade dos fenômenos em relação às experiências cotidianas; a aplicação de conceitos desenvolvidos anteriormente, relativos à Mecânica, aplicados em novo contexto, aprimorando as habilidades de generalização e a relação direta entre as Ciências Sociais com os assuntos aqui trabalhados.

Podemos iniciar com o questionamento sobre a importância da democratização do uso de energia e a importância desse fato para a melhoria da qualidade de vida. Acreditamos que você pode trabalhar essa questão como agente motivador para o trabalho que se segue.

Seguimos apresentando as estratégias para o desenvolvimento de cada tópico, privilegiando, sempre que possível, suas relações com o dia a dia.

1. Noções de temperatura e calor

Você pode começar mostrando a necessidade da construção de termômetros, tanto para processos comuns do cotidiano como para avaliar que tipo de traje vai ser mais adequado à temperatura de determinado dia ou para os fornos de processos industriais. Até mesmo nos fornos de cozinha esse é um item importante, pois muitas receitas necessitam de temperaturas específicas.

Acreditamos que o passo seguinte seja conversar sobre a diferenciação entre os conceitos de temperatura e calor, cujo significado na linguagem do dia a dia nem sempre corresponde àquele atribuído na Física.

Uma maneira de diferenciar poderia ser:

temperatura → estado

calor → processo

Para refletir

A fonte do calor nesse processo é o corpo humano.

Em seguida, é possível discutir a ideia de medida de temperatura construindo uma escala arbitrária, apresentando o conceito de grandeza termométrica.

A lei Zero da Termodinâmica pode ser apresentada para levar, de uma maneira natural, o aluno a entender o significado de equilíbrio térmico.

O objetivo do exercício resolvido 1 é mostrar explicitamente como se constrói uma escala termométrica, incluindo a função termométrica. Evitamos colocar como exercício proposto diretamente, pois é comum os alunos compreenderem a construção, mas terem dificuldades na formulação matemática do problema. Você pode resolvê-lo, passo a passo, com os alunos acompanhando, ou pedir que cada grupo comente um dos três itens da resolução e que um quarto grupo comente o gráfico.

2. Escalas Celsius e Fahrenheit

Neste ponto você pode retomar a discussão sobre escalas termométricas e ressaltar a arbitrariedade na atribuição dos pontos fixos.

É interessante comentar que, por razões históricas, as escalas mais utilizadas são a Celsius e a Fahrenheit; apresente os pontos fixos correspondentes.

Uma vez escolhidos os pontos fixos, é possível estabelecer a relação entre os valores da grandeza termométrica e a temperatura na escala Celsius. Da mesma forma, é possível, escolhidos os valores dos pontos fixos, estabelecer a relação entre os valores da grandeza termométrica e a temperatura na escala Fahrenheit.

Isso permite uma transitividade, ou seja, para um dado valor da grandeza termométrica há um valor de temperatura na escala Celsius e outro na escala Fahrenheit. Assim, estabelece-se diretamente a relação entre essas duas escalas.

Isso corresponde a usar a escala Fahrenheit como grandeza termométrica para os valores na escala Celsius, ou vice-versa. Outras escalas foram populares no passado, como a escala Reamur, muito utilizada pelos vinicultores franceses.

Física explica

Essa seção aborda o termômetro de máxima e mínima, termos muito comuns nas previsões do tempo. É interessante para se destacar como a engenhosidade, junto com os conceitos da Física, permitiu a construção desse termômetro.

Paralelamente, você pode comentar a abolição do mercúrio como substância termométrica pelo perigo cumulativo de danos neurológicos que ele pode causar.

Sugerimos que o texto seja trabalhado por grupos de alunos que podem ser convidados a redigir respostas sobre as questões propostas, desenvolvendo as habilidades de conexões entre os códigos da Física e da linguagem habitual.

Os dois exercícios apresentados foram planejados para desenvolver as habilidades de interpretação dos fenômenos da natureza pelo uso do raciocínio físico, e as possíveis respostas para essas questões são:

1. A Síndrome de Minamata demorou 20 anos para se manifestar após o início da contaminação: e este foi o período de duração do garimpo da região. Minamata era então uma aldeia de pescadores às margens de uma baía com esse nome, contaminada por mercúrio despejado por uma indústria no local. Morreram mais de 1000 pessoas com problemas neurológicos.

Fonte de consulta: INSTITUTO CIÊNCIA HOJE. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/especiais/rastros-do-mercurio/passado-e-tragedia>. Acesso em: 9 abr. 2016.

2. Cerca de 18 °C.

O exercício resolvido apresentado permite desenvolver as habilidades de equacionamento das leis físicas, assim como discutir a questão das **variações** de temperatura. O exercício explora esse tema detalhadamente e pode ser discutido com os estudantes durante a apresentação do tema.

O processo mais importante a ser desenvolvido é a montagem das proporções, e não memorização das as fórmulas, para que o aluno esteja apto a comparar escalas quaisquer.

3. Kelvin, uma escala absoluta

Este tópico pode começar com a pergunta: Qual é o menor comprimento possível de uma barra?

A partir daí, uma discussão pode ser feita, com base na ideia: o menor comprimento possível seria o comprimento nulo. Tanto faz que se esteja medindo em polegadas, metros ou centímetros.

Essa pergunta também pode ser feita sobre a escala de temperaturas: Qual seria a menor temperatura possível? Determinado esse valor, ele poderia ser adotado como ponto de partida e daí por diante ficaria só a questão de se escolher o "tamanho" do grau (Celsius, Fahrenheit ou outro qualquer).

São esses questionamentos que podem nos levar à conceituação de escala absoluta de temperatura. Nesse aspecto, não existe uma única escala absoluta, se o tamanho do grau escolhido for o da escala Celsius, obtemos a escala Kelvin, mas se for escolhido o tamanho do grau idêntico ao da escala Fahrenheit, ter-se-ia outra escala absoluta, a escala Rankine.

O exercício resolvido 3 permite o desenvolvimento da habilidade de interpretação dos conceitos físicos fundamentais.

Os exercícios propostos, além de trabalhar as habilidades de expressão matemática dos problemas físicos, exploram essa possibilidade que pode ser discutida com os alunos, determinando qual seria a temperatura de fusão do gelo na escala Rankine.

Você pode, então, aproveitar para mostrar que a **variação** de temperatura entre o ponto do gelo e do vapor, nessa escala, continuaria sendo de 180 divisões, como preconiza a escala Fahrenheit.

4. Dilatação térmica de sólidos

A pergunta apresentada para reflexão pode ser utilizada para discutir que, com o aumento de temperatura, não aumenta o tamanho das partículas (átomos, moléculas, íons) que compõem o corpo, mas sim a distância entre elas. Isto é, você pode mostrar, logo de início, que o fenômeno da dilatação é a dilatação dos espaços entre as partículas.

Para refletir

A "folga" na calçada é comum na construção civil e é necessária para evitar que a dilatação térmica do material deforme, trinque ou rompa a construção.

É possível desenvolver a capacidade de expressão do fenômeno por meio de leis quantitativas, apresentando e discutindo a expressão para o cálculo da dilatação com a aproximação mais simples: a linear.

No contexto desse capítulo, o termo "linear" refere-se ao cálculo da dilatação de comprimentos, diâmetros, perímetros, ou seja, dilatações que ocorrem em uma dimensão.

Para desenvolver a habilidade de avaliação de ordem de grandeza em fenômenos físicos, você pode mostrar que as dilatações térmicas, relativamente ao tamanho inicial dos corpos, são extremamente pequenas, mas o seu estudo se justifica pelos possíveis danos que podem advir quando não são levadas em consideração.

Alguns exemplos do cotidiano podem ser explorados: restaurações dentárias, motores, juntas em pontes, ferros automáticos de passar roupa, calçadas e trilhos.

Uma aplicação cotidiana interessante para possível discussão é a lâmina bimetálica e sua utilidade no pisca-pisca.

No momento seguinte, é possível apresentar a ideia de dilatação em duas dimensões (placas, chapas) com o consequente conceito de dilatação superficial.

É possível demonstrar, de maneira simplificada, que o coeficiente de dilatação superficial é o dobro do linear.

Aqui, é possível realizar uma atividade experimental sobre a dilatação de furos. É muito comum o aluno pensar que peças com furos, ao se dilatarem, têm seus furos diminuídos. Acreditamos que este seja um ponto muito difícil para o entendimento do aluno, que requer experimentação efetiva.

A ideia de dilatação volumétrica aparece de maneira natural, como extensão da linear e da superficial. Isso leva os alunos a desenvolver suas habilidades de extensão de raciocínio por analogia, sendo possível chegar à expressão, $\gamma = 3\alpha$.

A seguir, os exercícios podem ser utilizados de maneira variada.

5. Dilatação térmica de líquidos

Como sugestão para o início desse tópico podemos considerar a dilatação dos líquidos uma ampliação do estudo da dilatação volumétrica, partindo do exemplo dos caminhões que transportam combustível: se fossem completamente preenchidos em baixas temperaturas, quando chegassem a regiões mais quentes poderiam apresentar vazamentos.

Para refletir

Outro fato que pode motivar os alunos é a dilatação anômala da água. Esse fenômeno é interessante pois os lagos congelam apenas na superfície, o que acaba permitindo a preservação da vida aquática sob a camada isolante de gelo.

Para refletir

A água aumenta seu volume ao reduzir sua temperatura a temperaturas menores que 4 °C. Assim, em uma garrafa cheia de água e fechada, a água não terá espaço suficiente para expandir e, consequentemente, a garrafa quebrará.

Neste momento, acreditamos ser importante pontuar que líquidos estão sempre contidos em recipientes e as dilatações de ambos ocorrem simultaneamente. Daí surge a ideia de dilatação aparente, resultado da subtração de ambas, o que pode ser ilustrado com o exercício resolvido 4.

Para refletir

Quando a água atinge 0 °C ainda na fase líquida, por ser menos densa que a água líquida em temperatura maior, essa água sobe para a superfície do lago e solidifica, formando uma fina camada de gelo. Por ser mais densa, a água com temperatura até 4 °C tende, por convecção, a descer para a parte mais profunda do lago.

6. Transmissão da energia térmica

Normalmente, esse tema é abordado com o nome de transmissão do calor. Optamos por modificá-lo para que o aluno perceba que a quantidade de calor é a quantidade de energia térmica transferida.

Sugerimos que você comece pela seção **Física tem história**, para que os alunos percebam as diferenças entre as interpretações, antiga e atual. Isso levará à conclusão que calor é uma forma de energia que se propaga entre os corpos.

É possível, então, apresentar a condução como processo predominante nos sólidos e apresentar uma forma simplificada da expressão matemática que modela o processo. Acreditamos ser importante destacar que esse processo tem baixa intensidade nos líquidos e é praticamente inexistente nos gases.

Como fato cotidiano, é possível falar sobre a importância da espessura na transmissão da energia térmica e explicar por que, em dias muito frios, às vezes usamos mais de uma blusa.

Aqui sugerimos que você comece discutindo como seria a transmissão de energia térmica em líquidos. Para tanto, você pode perguntar aos alunos por que a cortiça flutua na água. Muitos darão de imediato a resposta: porque ela é menos densa que a água.

Na convecção ocorre um processo análogo. O ar quente, menos denso, tende a "flutuar" sobre o ar frio, mantendo a circulação.

Várias questões cotidianas podem ser discutidas:

- a importância da gravidade nesse processo;
- a importância de os aquecedores ficarem na parte de baixo dos ambientes, enquanto os aparelhos de ar condicionado ficam na parte de cima;
- como se formam as brisas litorâneas;
- como acontece uma inversão térmica.

Você pode, agora, conversar um pouco com os alunos sobre a possibilidade de transporte de energia térmica sem suporte material, perguntando como a energia proveniente do Sol se propaga.

As diversas aplicações da transferência de energia pelas ondas eletromagnéticas, com ênfase para o infravermelho, podem ser apresentadas para trazer o cotidiano para a teoria exposta.

Física explica

Nessa seção, os alunos podem ser questionados sobre a necessidade de, às vezes, evitar a transmissão de energia térmica. Manter o café quente, por exemplo.

Como uma atividade prática, o aluno pode verificar quais são as partes da garrafa térmica associadas a cada modo de transmissão de energia térmica.

Em construção

Como complemento à leitura do texto, é proposta uma pesquisa em grupo. Estimule os alunos a pesquisar outros aspectos do trabalho científico de William Thomson (Lord Kelvin).

Um trabalho de seminário pode ser proposto com base em dois pontos:

- Para que áreas da Física Lord Kelvin contribuiu?
- Pesquisar se Lord Kelvin teve alguma atuação como membro de associações científicas nas propostas de Charles Darwin sobre a Teoria da Evolução.

Experimento

Essa seção proporciona uma oportunidade para que as competências de interpretação, redação, experimentação e apresentação de resultados sejam desenvolvidas por meio de um procedimento bastante simples.

O experimento proposto deve ser realizado preferencialmente por você, pois envolve manipulação de recipientes com água em ebulição. A seguir, apresentamos uma sugestão para a realização do experimento proposto:

Um valor típico para a seringa na mistura de água e gelo fundente é 10 mL.

Com a seringa na água em ebulição, a leitura deve aumentar para aproximadamente 13,66 mL.

Considerando essas medidas, o gráfico teria o aspecto da figura seguinte:

Volume de água na seringa × temperatura

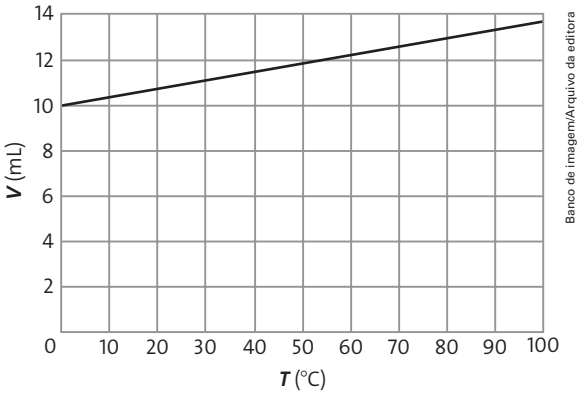


Gráfico elaborado para fins didáticos.

A equação dessa reta é: $V = 10 + \frac{3{,}66}{100} \cdot \theta_C$

O ponto em que ela vai intersectar o eixo das abscissas é tal que:

$0 = 10 + \frac{3{,}66}{100} \cdot \theta_C \Rightarrow \theta_C \simeq -273{,}22\ °C$

Atividades complementares

Propomos algumas questões que podem ser utilizadas em avaliações ou como trabalhos extraclasse.

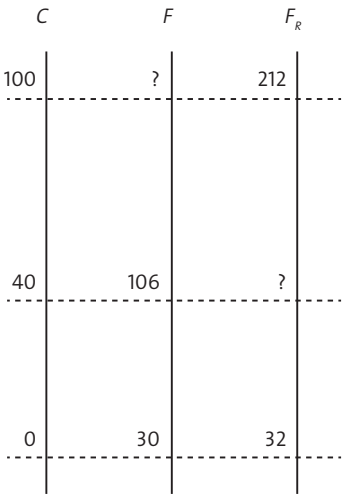
1. Um laboratório dispõe de um termômetro *C*, de alta precisão, calibrado na escala Celsius, e um termômetro *F*, defeituoso, calibrado na escala Fahrenheit. Para o ponto de gelo, o termômetro *F* assinala 30 °F; e, quando o termômetro *C* indica 40 °C, o *F* indica 106 °F.

a) Quanto indicará o termômetro *F* no ponto do vapor?

b) Sendo F_R o valor real da temperatura em graus Fahrenheit, estabeleça a equação termométrica que relaciona F_R com *F*.

Resolução:

Para montar as proporções, vamos observar a figura seguinte.



a) Observando as duas primeiras escalas, temos:

$\frac{40-0}{100-0} = \frac{106-30}{F-30}$, logo $\frac{2}{5} = \frac{76}{F-30} \Rightarrow$

$\Rightarrow 2F - 60 = 380 \Rightarrow F = 220\ °F$

b) Sabendo que o ponto de vapor na escala defeituosa é 220 °F, montamos a proporção:

$\frac{F_R - 32}{212-32} = \frac{F-30}{220-30} \Rightarrow F_R = \frac{18}{19}F + \frac{68}{19}$

2. Verifica-se que certa temperatura obtida na escala Kelvin é igual ao correspondente valor na escala Fahrenheit acrescido de 145 unidades.

a) Qual é o valor dessa temperatura na escala Celsius?

b) Quanto é esse valor na escala Kelvin?

Resolução:

a) De acordo com o enunciado: $T = \theta_F + 145$

$\frac{\theta_F - 32}{9} = \frac{T-273}{5} \Rightarrow \frac{\theta_F - 32}{9} = \frac{\theta_F + 145 - 273}{5} \Rightarrow$

$\Rightarrow \frac{\theta_F - 32}{9} = \frac{\theta_F - 128}{5} \Rightarrow 9\theta_F - 1152 = 5\theta_F - 160 \Rightarrow$

$\Rightarrow \theta_F = 248\ °F$

$\frac{\theta_F - 32}{9} = \frac{\theta_C}{5} \Rightarrow \frac{248-32}{9} = \frac{\theta_C}{5} \Rightarrow$

$\Rightarrow \frac{216}{9} = \frac{\theta_C}{5} \Rightarrow \theta_C = \frac{216 \cdot 5}{9} \Rightarrow \theta_C = \frac{216 \cdot 5}{9} = 120\ °C$

b) $T = \theta_F + 145 \Rightarrow T = 248 + 145 \Rightarrow$

$\Rightarrow T = 393\ K$

3. Analise as igualdades a seguir, escrevendo quais são verdadeiras (V) e quais são falsas (F).

a) 373 K = 100 °F

b) 0 K = 273 °C

c) 50 °C = 90 °F

d) 0 °C = 32 °F

e) 0 °C = −273 K

Resolução:

a) Falsa. 373 K = 212 °F

b) Falsa. 0 K = −273 °C

c) Falsa. 50 °C = 122 °F

d) **Verdadeira**.

e) Falsa. 0 °C = 273 K

4. (PUC-SP) Três barras – *AB*, *BC* e *AC* – são dispostas de modo que formem um triângulo isósceles. O coeficiente de dilatação linear de *AB* e *BC* é α, e o de *AC* é 2α. A 0 °C, os comprimentos de *AB* e *BC* valem 2ℓ, e o de *AC* vale ℓ.

Aquecendo-se o sistema à temperatura *t*, observa-se que:

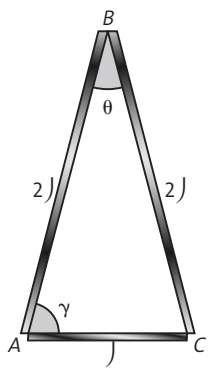
a) o triângulo torna-se equilátero.

b) o triângulo deixa de ser isósceles.

c) não há alteração dos ângulos θ e γ.

d) as barras *AB* e *BC* dilatam o dobro que *AC*.

e) as três barras sofrem dilatações iguais.



Formato/Arquivo da editora

Resolução:

Os lados *AB* e *BC* possuem mesmo comprimento inicial e coeficiente de dilatação. Ao sofrerem um aquecimento *t*, a dilatação $\Delta\ell$ nos dois será:

$\Delta\ell = \ell_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$

$\Delta\ell = 2 \cdot \ell \cdot \alpha \cdot t$

O lado *AC* sofre a mesma variação de temperatura *t*. A variação de comprimento $\Delta\ell$ é:

$\Delta\ell = \ell_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \Rightarrow \Delta\ell = \ell \cdot 2 \cdot \alpha \cdot t$

$\Delta\ell = 2 \cdot \ell \cdot \alpha \cdot t.$

Portanto, as três barras sofrerão a mesma variação de comprimento.

Resposta: alternativa **e**.

5. (Ufpel-RS) Todos sabemos que é essencial a presença de água para assegurar a existência de vida em nosso planeta. Um comportamento específico dessa importante substância garante, por exemplo, que o "simpático" urso da figura tente garantir sua refeição, apanhando o peixinho que nada em um lago, abaixo da camada de gelo.


João Xavier de Campos/Arquivo da editora

A formação dessa camada de gelo na superfície do lago, permitindo que a fauna e a flora permaneçam vivas em seu interior líquido, deve-se:

a) à dilatação irregular da água, que atinge densidade máxima à temperatura de 4 °C.

b) ao elevado calor específico da água, que cede grandes quantidades de calor ao sofrer resfriamento.

c) à grande condutividade térmica do gelo, que permite ao Sol continuar a aquecer a água do lago.

d) à temperatura de solidificação da água, que permanece igual a 0 °C, independente da pressão a que ela está submetida.

Resolução:

O menor volume da água líquida ocorre quando ela está a 4 °C. Nessa temperatura, a densidade (relação entre a massa e o volume) da água é a maior possível. Durante o resfriamento da água em regiões com invernos rigorosos, quando esta chega a 4 °C, terá a maior densidade, indo para as profundezas. É por causa dessa propriedade que o congelamento da água ocorre na superfície.

Resposta: alternativa **a**.

Resolução dos exercícios

1 I. Errado. Corpos com volumes ou massas diferentes podem ter a mesma temperatura, pois é uma medida do valor médio da energia das partículas e não do valor total.

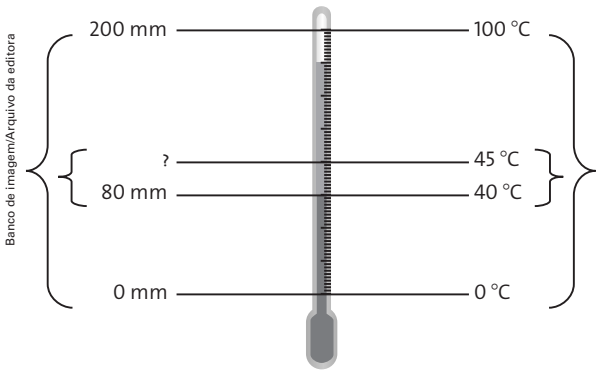
II. **Certo**. Os dois corpos estavam com a mesma temperatura.

III. Errado. A temperatura será igual, pois os líquidos já estavam em equilíbrio térmico.

IV. Errado. Justificativa na III.

V. **Certo**.

2 Fazendo-se a proporção entre os segmentos indicados pelas chaves, temos:



Banco de imagem/Arquivo da editora

$\frac{\Delta h}{200-0} = \frac{45-40}{100-0}$, logo $\frac{\Delta h}{200} = \frac{5}{100} \Rightarrow \Delta h = 10$ mm

Resposta: alternativa **d**.

3 Aqui estamos discutindo variações de temperatura.

a) $\Delta\theta = 45 - 25 \Rightarrow \Delta\theta = 20\ °C$

b) Como $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$, temos:

$\theta = 10 + 20 \Rightarrow \theta = 30\ °C$

c) O chuveiro funciona corretamente, produzindo sempre a mesma variação de temperatura. As sensações de quente e frio dependem da temperatura de saída da água, determinada pela variação de temperatura e da temperatura de entrada.

4 A temperatura informada pelo comandante era $T_F = 41\ °F$.

Substituindo esse valor na expressão de conversão de escalas, obtemos:

$\frac{T_C}{5} = \frac{T_F - 32}{9} \Rightarrow \frac{T_C}{5} = \frac{41-32}{9} \Rightarrow T_C = 5\ °C$

A temperatura externa era de 5 °C, portanto o traje escolhido pelo passageiro foi inadequado.

5 Cálculo aproximado: $\theta = \frac{(68-30)}{2} = 19\ °C$

Cálculo exato: Temos: $\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9}$, substituindo $\theta_F = 68$, obtemos $\theta = 20\ °C$.

6 Segundo a informação da embalagem: $\Delta T_C = 20\ °C$

Substituindo esse valor na expressão que fornece a variação de temperatura, temos:

$\frac{\Delta T_C}{5} = \frac{\Delta T_F}{9} \Rightarrow \frac{20}{5} = \frac{\Delta T_F}{9} \Rightarrow \Delta T_F = 36\ °F$

Portanto, o fabricante deverá imprimir na embalagem que o modelo é capaz de produzir uma variação de temperatura de 36 °F.

7 Considerando ΔC a diferença entre a aproximação e a temperatura exata em graus Celsius, temos que a regra proposta por Marcos é: $\frac{F}{2} - 15 = C + \Delta C$ (I)

Como $\frac{C}{5} = \frac{F-32}{9} \Rightarrow C = \frac{5F}{9} - \frac{160}{9}$ (II)

Substituindo (II) em (I), obtemos:

$\frac{F}{2} - 15 = \frac{5F}{9} - \frac{160}{9} + \Delta C \Rightarrow$

$\Rightarrow 9F - 15 \cdot 18 = 10F - 320 + 18 \cdot \Delta C \Rightarrow$

$\Rightarrow 320 - 270 - 18\Delta C = F \Rightarrow 50 - 18\Delta C = F$

a) Se $\Delta C = +3\ °C$, então $50 - 18 \cdot 3 = F \Rightarrow F = -4\ °F$. Valor correto obtido pela equação geral, será $-20\ °C$, mas, na aproximação, o valor será $-17\ °C$.

b) Se $\Delta C = -3\ °C$, então $50 - 18 \cdot (-3) = F \Rightarrow F = 104\ °F$. Valor correto obtido pela equação geral será 40 °C, mas, na aproximação será 37 °C.

c) Se $\Delta C = 0\ °C$, então $50 - 18 \cdot 0 = F \Rightarrow F = 50\ °F = 10\ °C$.

d) Funciona bem entre $-20\ °C$ e 40 °C, logo, é uma boa aproximação para temperaturas cotidianas.

8 O exercício 8, além de trabalhar habilidades de cálculo, permite a visualização do uso de princípios físicos em uma aplicação do cotidiano.

A variação de temperatura, na escala Celsius, entre o zero absoluto e a fusão do gelo é 273 °C. Como $\frac{\Delta T_C}{5} = \frac{\Delta T_F}{9}$, temos:

$\frac{273}{5} = \frac{\Delta T_F}{9} \Rightarrow \Delta T_F = 491{,}4$

9 a) 400 °C corresponde a 673 K e $-200\ °C$ corresponde a 73 K.

b) $\Delta\theta_C = \Delta T \Rightarrow \Delta T = 600\ K$

10 I. **Verdadeira**. Como: $\Delta\ell = \ell_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$, temos

$\Delta\ell = 10{,}0 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot (25 - 0)$

Portanto, $\Delta\ell = 3{,}0 \cdot 10^{-3}$ m $= 3{,}0$ mm

A nova folga entre trilhos consecutivos passa a ser:

$d = 9{,}0 - 3{,}0 \Rightarrow d = 6{,}0$ mm

II. Falsa. A folga entre os trilhos varia com a temperatura devido ao fenômeno da dilatação térmica.

III. **Verdadeira**. Quando $\Delta\ell = 9{,}0$ mm $= 9{,}0 \cdot 10^{-3}$ m os trilhos irão se tocar, e como $\Delta\ell = \ell_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$, temos:

$9 \cdot 10^{-3} = 10{,}0 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot (\theta - 0) \Rightarrow \theta = 75\ °C$

11 a) Em cada temperatura, a diferença entre os comprimentos das barras é sempre a mesma, pois no gráfico temos retas paralelas.

b) Do gráfico obtemos:

$\begin{cases} \ell_{A0} = 6\ m \\ \ell_{B0} = 8\ m \end{cases}$

Pelo exposto nos itens anteriores, temos:

$\begin{cases} \Delta\ell_A = \Delta\ell_B \\ \Delta\ell = \ell_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \end{cases}$, assim: $\ell_{0A} \cdot \alpha_A \cdot \Delta\theta = \ell_{0B} \cdot \alpha_B \cdot \Delta\theta \Rightarrow$

$\Rightarrow 6 \cdot \alpha_A = 8 \cdot \alpha_B \Rightarrow \frac{\alpha_A}{\alpha_B} = \frac{4}{3}$

12 Como a dilatação é proporcional ao comprimento inicial da barra e ao coeficiente de dilatação, a barra menor deve ter coeficiente de dilatação maior.

13 $A = A_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta\theta)$

$1{,}02 \cdot A_0 = A_0 \cdot (1 + 2\alpha \cdot \Delta\theta) \Rightarrow 1{,}02 = 1 + 2 \cdot 26 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta\theta \Rightarrow$

$\Rightarrow 0{,}02 = 5{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta\theta \Rightarrow \Delta\theta = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{5{,}2 \cdot 10^{-5}} = 385 \Rightarrow$

$\Rightarrow \theta - 20 = 385 \Rightarrow \theta = 405\ °C$

14 $\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta\theta$

$0{,}01 \cdot V_0 = V_0 \cdot \gamma \cdot 40 \Rightarrow 0{,}01 = \gamma \cdot 40 \Rightarrow$

$\Rightarrow \gamma = 2{,}5 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$

Logo, $\alpha = \frac{\gamma}{3} = 8{,}3 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$

15 A redução da temperatura acarreta diminuição do volume segundo $\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta\theta$. O volume final será de 9 800 litros: $V_f - V_i = 10\,000 - 200 = 9\,800$ litros.

16 a) $\Delta V = V_0 \cdot \gamma_{ap} \cdot \Delta\theta \Rightarrow 9 = 450 \cdot \gamma_{ap} \cdot 80$

Portanto: $\gamma_{ap} = 2{,}5 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$

b) O coeficiente de dilatação do líquido é maior que o aparente, pois, deve-se levar em consideração a dilatação do recipiente.

17 a) Sim.

b) Principalmente na condução. A lã é isolante térmica e diminui o ganho de calor que passa do ar para o gelo, retardando o processo de fusão.

18 Como o gradiente de temperatura é da esquerda para a direita, o recipiente *A* está mais quente.

Como $\frac{\Delta\theta}{\Delta x} = C =$ constante, vamos analisar o intervalo entre os dois termômetros.

$C = \frac{60 - 40}{40} \Rightarrow C = 0{,}5\ \frac{°C}{cm}$

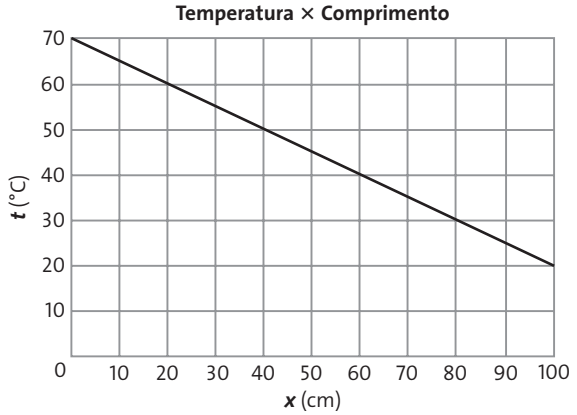
Para o recipiente *A*, temos:

$0{,}5 = \frac{\theta_A - 60}{20} \Rightarrow \theta_A = 70\ °C$

Para o recipiente *B*, temos:

$0{,}5 = \frac{40 - \theta_B}{40} \Rightarrow \theta_B = 20\ °C$

É interessante apresentar o gráfico das temperaturas ao longo do comprimento da barra, como abaixo.



Banco de imagem/Arquivo da editora

19 a) Fluxo de energia – Do Sol para a pessoa.
Processo de transmissão – Irradiação.

b) Fluxo de energia – Do ferro para a roupa.
Processo de transmissão – Condução.

c) Fluxo de energia – Do aparelho para o alimento.
Processo de transmissão – Irradiação.

d) Fluxo de energia – Dos alimentos para o ar (condução), que sobe por convecção.
Processo de transmissão – condução e convecção.

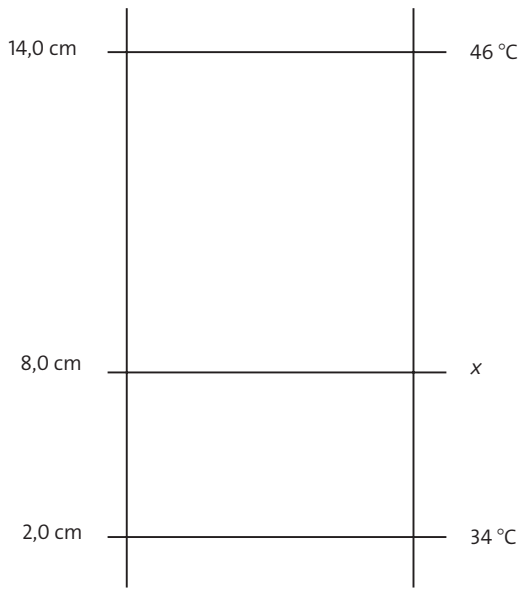
e) Fluxo de energia – Da pessoa para o ambiente, cedendo calor.
Processo de transmissão – Condução.

f) Fluxo de energia – Da fogueira para a pessoa.
Processo de transmissão – Irradiação.

20 As temperaturas são iguais (equilíbrio térmico) e a lata parece mais fria, pois troca calor de maneira mais efetiva (maior condutividade).

Resposta: alternativa **d**.

21 As informações do enunciado podem ser resumidas em um esquema.



Montando-se a proporção, temos:

$\frac{x - 34}{46 - 34} = \frac{8 - 12}{14 - 2}$, logo: $x - 34 = 12 \cdot \frac{6}{12} \Rightarrow x = 40\ °C$

Resposta: alternativa **d**.

22 Pelo fenômeno da dilatação térmica, nos dias mais frios ocorre a contração dos cabos, logo eles devem ser colocados com folga.

Resposta: alternativa **d**.

23 I. Incorreta. Aumentando a temperatura teremos uma diminuição de densidade, pois o volume aumenta.

II. **Correta**. Diminuindo a temperatura teremos um aumento de densidade, pois o volume diminui.

III. **Correta**. A medida deixaria de depender do volume.

Resposta: alternativa **e**.

CAPÍTULO 2 – Calorimetria

A fotografia de abertura deste capítulo apresenta um fenômeno que será estudado no decorrer dele. A partir da imagem do derretimento de um pedra de gelo que recebe calor do Sol, surge a questão: quanta energia é necessária para que isso ocorra?

1. Capacidade térmica

Sugerimos a conceituação do que é a capacidade térmica (C) de um corpo, enfatizando que, quanto maior for a capacidade térmica, maiores serão as quantidades de calor necessárias para variar a temperatura (esfriar ou aquecer). Você pode prosseguir com exemplos de sistemas com capacidades térmicas bem pequenas, como fagulhas, gotículas de água e gravetos, que podem ser aquecidos rapidamente, e de sistemas com grande capacidade térmica, como grandes caldeiras, rios, baías, cujo aquecimento é mais difícil.

Apresente a unidade usual da calorimetria, caloria, obtida tendo como substância padrão a água e a escala Celsius. Ressalte que, como está se falando de energia, há uma relação de conversão entre a unidade usual e a unidade de energia no SI – o joule.

Calor específico (c)

Podemos ter corpos constituídos de diferentes substâncias com a mesma capacidade térmica. Para diferenciar substâncias, é preciso então verificar qual é a capacidade térmica que apresentam por unidade de massa, conceito que, por motivos históricos, ficou conhecido como calor específico, da época em que se acreditava que os corpos continham o *calorium*.

A tabela 2.1, que apresenta o calor específico de algumas substâncias, visa mostrar quão alto é o calor específico da água, quando comparado com a maioria das substâncias, sua aplicação e consequências climáticas.

2. Calor sensível

A chamada equação fundamental da calorimetria $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$ é apresentada como decorrência natural das definições de capacidade térmica e calor específico. Sua função é quantificar a quantidade de calor envolvida nos processos em que não ocorre mudança de fase. Você pode comentar, de passagem, que apenas estamos analisando situações em que não há variações expressivas de volume, caso contrário haveria energia na forma de trabalho envolvida no processo. Isso será tratado depois na 1ª Lei da Termodinâmica.

Vale a pena destacar a convenção de sinais que está embutida na equação fundamental, conforme o quadro seguinte.

	Valor algébrico de Q	**Variação de temperatura**
Calor recebido	$Q > 0$	$\Delta\theta > 0$
Calor cedido	$Q < 0$	$\Delta\theta < 0$

Comercialmente, principalmente nos aparelhos de ar condicionado, é usada a unidade Btu (unidade térmica britânica). É interessante o aluno ter uma ideia do quanto significa essa unidade no SI. Na verdade, nos aparelhos de ar condicionado é citada somente em Btu, mas o verdadeiro significado é Btu/hora.

Em seguida, falamos sobre as calorias nos alimentos. Os nutricionistas utilizam a chamada "caloria grande" (abreviada por Cal), que na verdade é 1 kcal.

Um exemplo numérico simples ilustra o significado de diferentes capacidades térmicas comparando dois corpos.

Calor de combustão

Quantas calorias são obtidas ao se queimar 1 grama de determinada substância? Esse é o calor de combustão. Nos laboratórios, utilizando-se quantidades determinadas de cada substância, esse calor é determinado. O mesmo vale para os alimentos, com exceção dos vegetais. Se houver tempo, você pode comentar que, nos vegetais verdes, antes da queima analisa-se a fração de celulose que contêm para se fazer uma correção de resultado após a queima, pois nosso organismo não "queima" essa parte dos vegetais. Essa é uma das razões pelas quais, embora a ingestão de grande quantidade de vegetais possa nos dar a sensação de saciedade, não tem o mesmo teor de calorias que encontraríamos na mesma quantidade de carne, por exemplo.

Física explica

Há uma proposta de atividade na qual os alunos pesquisam as condições de alimentação na região em que vivem, relacionando o número de calorias ingeridas com o que é recomendado. Esse trabalho, além de expor o aluno a uma aplicação prática do conhecimento adquirido, visa a discussão sobre problemas sociais.

3. Calor latente

O texto começa com a pergunta: Será que é possível uma substância receber calor e mesmo assim manter sua temperatura constante? A resposta é sim, mas resta ainda mais um esclarecimento: para onde vai a energia? O texto discute a questão da separação das partículas do corpo aquecido e como esse processo de separação das partículas "consome" a energia fornecida.

A discussão dos patamares para as substâncias cristalinas pode ser bem relacionada com o cotidiano. Por exemplo, no cozimento dos alimentos, ou ao ferver água para fazer um café, iniciada a fervura podemos abaixar a chama, sem alterar a temperatura do líquido em ebulição, economizando combustível. O que acontece se aumentarmos a chama? A água vaporiza mais rapidamente, mas a temperatura permanece 100 °C (se for ao nível do mar).

Em seguida, é apresentado como obter quantitativamente o calor latente, conhecendo o valor experimental da quantidade de calor necessária para mudança de fase por unidade de massa da substância escolhida.

Destaque que com os alunos também aqui há a questão algébrica: calor recebido é positivo e calor cedido é negativo.

Física explica

Em geral, os estudantes não têm dificuldade para compreender o processo de ebulição, mas o processo de evaporação precisa ser detalhado com calma. As aplicações no cotidiano são muitas. Secagem da roupa no varal, secagem do piso molhado, a sensação de perda de calor (frio) quando colocamos um pouco de água a evaporar sobre a pele e assim por diante. A analogia com a média dos alunos de uma classe nos parece suficiente para que eles compreendam.

4. Trocas de calor

Começamos a discutir as trocas de calor e o sistema isolado. Propositalmente, evitamos discutir logo de início o equilíbrio térmico, pois as trocas de calor geralmente ocorrem em sistemas que

não atingem o equilíbrio térmico, como o motor de um carro em funcionamento, por exemplo. Mas, mesmo assim, continua válido para o sistema isolado que:

$$Q_A + Q_B = 0$$

O exemplo detalhado de um tipo de sistema de refrigeração pode ser resolvido com o acompanhamento dos alunos.

Agora vamos para sistemas que, após as trocas de calor, atingem o equilíbrio térmico, ressaltando a condição adicional que terá esse tipo de situação:

$$\text{Equilíbrio térmico} \Leftrightarrow \theta_A = \theta_B = \theta_{\text{equilíbrio}}$$

Pode-se então partir para a discussão dos exercícios. Instrua os alunos a organizarem detalhadamente os dados, pois são muitas variáveis envolvidas.

Há exercícios que irão exigir um pouco mais de abstração dos alunos e o trabalho com os gráficos, como é o caso de equilíbrios térmicos que vão acontecer nos patamares. As resoluções detalhadas desses problemas estão no final deste guia.

5. Diagramas de fases

Aqui consideramos importante a discussão sobre a influência da pressão nos pontos de fusão e solidificação das substâncias, diferenciando as substâncias com comportamentos menos comuns, como a água e as outras.

Comece discutindo a curva de fusão. As cruzinhas, parecidas com a rosa dos ventos, visam mostrar que podemos mudar a fase de uma substância variando a pressão ou a temperatura, para cada uma das transições discutidas. As tabelas detalham os seus significados, uma a uma.

O fenômeno do regelo é clássico e, acreditamos, não pode deixar de ser discutido, por explicar a facilidade de patinação e quão escorregadios são os pisos congelados.

Várias situações do dia a dia são apresentadas nas observações, considerando o fenômeno da evaporação.

6. Umidade do ar

O texto começa destacando que o vapor de água é transparente e, portanto, imperceptível à visão. Muitos alunos confundem as gotículas de vapor condensado em suspensão como sendo vapor. Explique que, como acontece nas nuvens, isso já é água na fase líquida, em minúsculas gotas em suspensão.

Iniciamos discutindo a umidade absoluta por nos parecer algo mais simples de compreender pelos alunos, para depois falarmos da relativa. A umidade relativa é apresentada quase como uma necessidade prática para sabermos quão longe estamos do chamado ponto de orvalho.

O tema é importante, principalmente levando em consideração as questões de saúde pública, pois umidade relativa muito baixa pode causar ressecamento nas mucosas, com danos ao sistema respiratório.

Se possível, recomendamos um comentário sobre o higrômetro de fio de cabelo, primeiro aparelho para fazer essa medida.

Promova uma discussão que envolva o ponto de orvalho, como o embaçamento dos vidros, a neblina e o efeito tanto do ar-condicionado quanto do aquecedor na redução da umidade relativa ambiente e as precauções que podem ser tomadas.

Você pode comentar como a presença de material particulado na atmosfera pode abreviar o ponto de orvalho em virtude de as micropartículas funcionarem como germes de condensação. Esse foi um dos grandes problemas ocorridos em Londres e pode ser observado em alguns locais próximos a fábricas, onde há esse tipo de emissão pelas neblinas localizadas.

Em construção

Assim como a biografia de Kelvin (capítulo anterior), a de Fourier também se insere em um período da Revolução Industrial. A busca pelo aprimoramento das máquinas térmicas era também preocupação dos franceses.

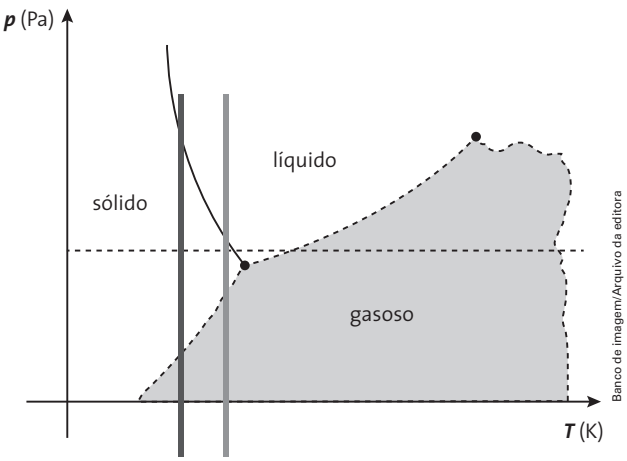
Na área militar, o transporte de tropas, víveres, munição e armamentos pôde ser incrementado com as ferrovias. Além disso, de certa forma, as armas de fogo são também máquinas térmicas e precisam de refrigeração para evitar a fusão dos canos quando trabalharem com vários disparos consecutivos. Um dos instrumentos para o estudo dessa refrigeração é a Lei de Fourier sobre a condução do calor.

Após os alunos lerem a biografia de Fourier, deixamos como sugestão uma pequena redação ou apresentação em conjunto com o professor de História, relacionando a presença dos cientistas nos instrumentos de guerra, como aconteceu com Arquimedes, Carnot, Fourier e, mais tarde, muitos outros na Segunda Guerra Mundial.

Experimento

Para responder às questões, vamos lembrar da curva de solidificação da água em função da pressão e temperatura, conforme a figura seguinte. A linha horizontal pontilhada corresponde à pressão atmosférica.

Curva da solidificação da água em função da pressão e da temperatura



Banco de imagem/Arquivo da editora

Gráfico elaborado para fins didáticos.

1. Como o gelo do congelador está a uma temperatura pouco abaixo de 0 °C (cerca de −5 °C), com pequeno aumento de pressão – distância entre a linha pontilhada e a curva de solidificação, medida na linha mais clara – podemos fundir a região de contato entre as duas pedras. Aliviada a pressão, essa região regela e as pedras ficam unidas.
2. Como o gelo do *freezer* está a uma temperatura muito baixa (≃ −18 °C) o aumento de pressão para provocar a fusão deve ser extremamente alto – distância entre a linha pontilhada e a curva de solidificação medida na linha mais escura – e não conseguimos isso usando simplesmente as mãos. Logo, as pedrinhas não ficarão unidas após esse procedimento.

Atividade complementar

Para a realização dessa atividade complementar, vamos precisar de uma caixa ou cilindro de isopor, uma balança, cubos de gelo recém-tirados do congelador, água e um termômetro.

Esta atividade complementar pode ser realizada em sala de aula com os alunos reunidos em grupo (4 a 5 participantes por grupo). O objetivo é analisar um sistema térmico constituído por um calorímetro, água e gelo. Com as medidas realizadas na atividade, temos condições de calcular a temperatura inicial do gelo. A comparação entre os valores obtidos por cada grupo pode ser um indicativo da precisão do experimento.

A primeira parte do procedimento consiste na fabricação de um calorímetro, que é essencialmente um objeto que não deixa substâncias em seu interior trocarem calor com o meio externo. Pelo fato de o isopor ser um bom isolante térmico, um calorímetro pode ser construído de isopor, como o da foto abaixo.

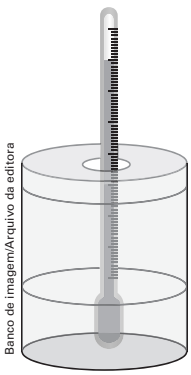
Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora



Calorímetro simples: copo térmico, de poliestireno expandido, com tampa e termômetro.

No topo há uma tampa e um furo, no qual é introduzido um termômetro. A figura a seguir mostra um desenho esquemático do calorímetro.

Banco de imagem/Arquivo da editora



Esquema ilustrativo do calorímetro. Representação sem escala e em cores fantasia.

Sugerimos que você deixe pronto o furo em cada tampa dos calorímetros, com o tamanho necessário apenas para a introdução do termômetro. Caso não haja termômetros suficientes, outra sugestão é fazer o experimento e os alunos acompanharem.

Para a segunda parte da experiência, são necessários balança, água, gelo e um termômetro.

Coloque em um recipiente 500 g de água. Tome cuidado para descontar a massa do recipiente no qual a água estava quando for feita sua pesagem. A seguir, coloque a água no calorímetro. No interior do calorímetro, determine com o termômetro a temperatura da água.

A seguir, meça a massa de um cubo de gelo e coloque no calorímetro junto com a água. Por fim, tampe o calorímetro e coloque o termômetro em seu interior, através do furo que foi feito na tampa. Meça a temperatura final da mistura (água + gelo). Para isso, é necessário esperar um tempo até ocorrer o equilíbrio térmico. A seguir, peça aos alunos que respondam às seguintes perguntas. As respostas poderão ser de forma escrita, entregues no final da aula ou na aula seguinte.

1. O calorímetro teria o mesmo efeito se fosse feito de metal? Justifique.

   Não. O calorímetro deve isolar as trocas de calor das substâncias que estão nele com o meio externo. Metais, ao contrário do isopor, são bons condutores térmicos e permitem a troca de calor. Dessa forma, um calorímetro feito de metal não seria eficiente.

2. Ao medirmos a temperatura final da mistura, por que devemos esperar a leitura do termômetro não se alterar mais (ou pelo menos demorar para se alterar)?

   Nesse experimento queremos medir a temperatura final da mistura, que corresponde ao equilíbrio térmico. Enquanto o termômetro continua variando sua temperatura, não há o equilíbrio térmico. Apesar disso, a equação para as trocas de calor continua válida em qualquer momento do experimento.

3. Qual é a temperatura final média obtida experimentalmente? Caso haja valores muito discrepantes entre os obtidos pelos diferentes grupos, dê algumas hipóteses para esse fato.

   Aqui é interessante que você anote as diversas temperaturas obtidas pelos alunos e monte uma tabela. A seguir você poderia colocá-la no quadro e comparar os valores. Se os valores forem próximos entre si, isso é bom, pois indica concordância entre os resultados. Caso haja algum valor discrepante dos demais ou se os valores forem todos bem diferentes, é interessante listar algumas hipóteses para o fato, como:

   - o calorímetro usado pode não ter sido fechado corretamente, o que acarreta trocas de calor;
   - pessoas diferentes manuseando os cubos de gelo podem ter ficado com ele por mais ou menos tempo na mão, o que aumenta ou diminui a troca de calor do cubo de gelo com a mão e com o ambiente;
   - a temperatura não foi medida corretamente;
   - os termômetros podem não estar calibrados corretamente.

   O importante aqui é a discussão de possíveis fenômenos que possam ter interferido no experimento e a plausibilidade das justificativas dos alunos.

4. Pela média das temperaturas medidas experimentalmente, calcule a temperatura inicial do gelo.

   O cálculo deve ser feito utilizando-se a equação para trocas de calor:

   $$\sum Q = 0 \Rightarrow m_{água} c_{água} \Delta\theta_{água} + m_{gelo} c_{gelo} \Delta\theta_{gelo} + m_{gelo} L = 0$$

   O cálculo da temperatura inicial do gelo depende dos valores da massa de gelo usada e da temperatura final da mistura. Grupos diferentes podem ter medido massas de gelo ligeiramente diferentes, o que acarreta pequenas discrepâncias.

   Discuta com os alunos os resultados obtidos por eles para o cálculo da temperatura inicial do gelo. Por exemplo, valores maiores que 0 °C são fisicamente inconsistentes.

Resolução dos exercícios

1 a) A capacidade térmica é definida pelo produto entre a massa e o calor específico. Assim, para a fase líquida, temos:

$C_l = 550 \cdot 1 \Rightarrow C_\ell = 550$ cal/°C

Para a fase sólida, temos:

$C_s = 1000 \cdot 0{,}55 \Rightarrow C_s = 550$ cal/°C

Assim, ambas as capacidades térmicas são iguais.

b) Pela análise da tabela, podemos ver que a água no estado líquido tem um calor específico maior, mesmo que ambas tenham a mesma capacidade térmica.

2 a) Como ambas estão pintadas de preto e sob mesma insolação, receberam a mesma quantidade de calor.

b) Como as massas são iguais, a que tem maior calor específico terá maior capacidade térmica, ou seja, o ferro.

c) A de menor capacidade térmica, ou seja, o cobre.

3 Colocando-se certa massa de água (conhecida) no recipiente, medimos sua temperatura inicial. A seguir, com o termômetro ainda dentro da água, ligamos a fonte de calor (fogão) e medimos o tempo que demora para a água variar sua temperatura em 1 °C. O fogão tem fluxo de calor constante, sendo dado pela seguinte expressão: $\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{mc\Delta\theta}{\Delta t}$

Assim, conhecendo-se a massa de água que está no recipiente, seu calor específico (1 cal/g °C) e medindo-se o tempo necessário para ela variar sua temperatura em 1 °C, poderemos calcular o fluxo de calor do fogão.

A seguir, retiramos a água do recipiente e colocamos o óleo de soja. O mesmo procedimento que foi feito com a água deve ser repetido: medimos a temperatura inicial do óleo e a seguir o esquentamos até sua temperatura variar em 1 °C, medindo o tempo necessário para isso ocorrer. Com esses dados, vamos analisar a equação para o fluxo de calor:

$$\phi = \frac{\Delta Q_{\text{óleo}}}{\Delta t_{\text{óleo}}} = \frac{m_{\text{óleo}} c_{\text{óleo}} \Delta\theta}{\Delta t_{\text{óleo}}}$$

O fluxo de calor é uma característica do fogão e não depende da substância que está no recipiente. A equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$c_{\text{óleo}} = \phi \cdot \frac{\Delta t_{\text{óleo}}}{m_{\text{óleo}} \Delta\theta}$$

Todas as variáveis da expressão foram medidas. Assim, pode-se calcular o calor específico do óleo.

4 a) $C = \frac{Q}{\Delta u} = \frac{40 \cdot 100}{50 - 10} \Rightarrow C = 100$ cal/°C

b) $C = \frac{Q}{m} = \frac{100}{200} \Rightarrow C = 0{,}5$ cal/(g · °C)

5 Com o auxílio da tabela, a quantidade de calorias pode ser determinada pela multiplicação da massa de alimento consumida pelo calor de combustão. Supondo que um aluno consome 100 g de arroz, 100 g de feijão, 120 g de carne e 80 g de batata frita, temos:

$125 \cdot 1670 + 125 \cdot 670 + 150 \cdot 1460 + 70 \cdot 2740 \simeq 700$, ou seja, 700 kcal.

Note que esse valor varia bastante de aluno para aluno.

6 a) O homem está com a razão. A água ferve a 100 °C (nível do mar). Durante o processo de ebulição, a temperatura da água não se altera.

b) A energia adicional do fogo alto servirá apenas para que a água evapore mais rapidamente.

7 a) Como a potência da dissipação é 750 W e $P = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, temos:

$750 = \frac{\Delta Q}{60}$, pois $\Delta t = 60$ s = 1 min, logo $\Delta Q = 45\,000$ J.

Como essa quantidade de calor provém da vaporização, temos $\Delta Q = mL_V$, isto é,

$45 \text{ kJ} = m \cdot 2\,250 \text{ kJ/kg} \Rightarrow m = 0{,}02 \text{ kg} = 20 \text{ g}$.

b) Como meia hora corresponde a 30 min, temos: $M = m \cdot 30 \Rightarrow$

$\Rightarrow M = 600$ g

Ou seja, a pessoa perdeu mais de meio litro de água.

8 a) Sendo 1 cal = 4,2 J e $P = \frac{Q}{\Delta t}$, teremos:

$$P = \frac{mL}{\Delta t} \Rightarrow P = \frac{3 \cdot 540 \cdot 4{,}2}{0{,}1} \Rightarrow P \simeq 68 \cdot 10^3 \text{ W}$$

b) Podemos usar a seguinte regra de três:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ m}^2 \text{ ——— } 6 \cdot 10^4 \text{ J/s} \\ A \text{ ——— } 68 \cdot 10^3 \text{ J/s} \end{array} \Rightarrow A \simeq 1{,}1 \text{ m}^2$$

9 a) Vamos transformar a temperatura para a escala Celsius:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9}$$

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{451 - 32}{9} \Rightarrow \theta_C \simeq 232{,}8 \text{ °C}$$

Como o papel permanece molhado pela água, enquanto houver água a temperatura não será superior a 100 °C e, portanto, o papel não vai atingir o ponto de fulgor.

b) Não. Sem a presença da água o papel vai atingir a temperatura de fulgor e entrar em combustão.

c) Se o papel for muito espesso, a parte externa pode secar, pois a taxa de reposição de água seria menor. Isso poderia levar a parte externa a entrar em combustão.

10 a) O gelo-seco é dióxido de carbono (CO_2) congelado. À temperatura ambiente e sob pressão, o dióxido de carbono é um gás, constitui cerca de 0,035% da atmosfera e contribui para o efeito estufa. O dióxido de carbono tem uma qualidade diferente de muitos dos outros compostos encontrados na Terra. Quando o gás de dióxido de carbono é arrefecido, não se transforma em um líquido, mas salta o estado físico e torna-se um sólido.

b) Como cada grama que sublima equivale a 140 calorias subtraídas e o gelo-seco com massa de 30 g foi sublimado totalmente, foram retiradas 4 200 calorias.

11 Cada litro de água equivale a 1 kg. Sendo m_f a massa de água fria, a massa de água quente será $(4 - m_f)$.

Como $Q_{\text{cedido}} + Q_{\text{recebido}} = 0$, temos:

$(4 - m_f) \cdot c \cdot \Delta\theta_{\text{água quente}} + m_f \cdot c \cdot \Delta\theta_{\text{água fria}} = 0$

$(4 - m_f) \cdot (40 - 100) + m_f \cdot (40 - 20) = 0 \Rightarrow m_f = 3$ kg (1 L)

Como a massa total é 4 kg, temos $m_q = 1$ kg (1 L).

12 O equilíbrio térmico constitui-se em 4 processos: o primeiro é a passagem do gelo de –5 °C para 0 °C (ainda na fase sólida). O segundo processo é a passagem do gelo da fase sólida para a fase líquida a 0 °C. O terceiro processo é o equilíbrio térmico da massa de gelo que se transformou em água a uma temperatura final. O quarto processo é a passagem da água inicialmente a uma temperatura de 15 °C para a temperatura de equilíbrio da mistura. Matematicamente tem-se:

1º processo: passagem do gelo de -5 °C para 0 °C:

$Q_1 = m_g c_g \Delta\theta_g = 20 \cdot 0{,}5 \cdot (0 - (-5)) \Rightarrow Q_1 = 50$ cal

2º processo: passagem do gelo da fase sólida para a fase líquida a 0 °C:

$Q_2 = m_g \cdot L_g = 20 \cdot 80 \Rightarrow Q_2 = 1600$ cal

3º processo: passagem da água proveniente do gelo de 0 °C para a temperatura final θ_f:

$Q_3 = m_g \cdot c_{\text{água}} \cdot (\theta_f - 0) = 20 \cdot 1 \cdot \theta_f \Rightarrow Q_3 = 20 \cdot \theta_f$

4º processo: passagem da água de 15 °C para a temperatura final θ_f:

$Q_4 = m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} \cdot (\theta_f - 15) = 1000 \cdot 1 \cdot (\theta_f - 15) \Rightarrow$

$\Rightarrow Q_4 = 1000 \cdot \theta_f - 15000$

A soma dos calores trocados é nula:

$\Sigma Q = 0 \Rightarrow Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0 \Rightarrow$

$\Rightarrow 50 + 1600 + 20 \cdot \theta_f + 1000 \cdot \theta_f - 15000 = 0 \Rightarrow$

$\Rightarrow 1020 \cdot \theta_f = 15000 - 50 - 1600 = 13350 \Rightarrow \theta_f \simeq 13{,}1$ °C

A temperatura de equilíbrio é de aproximadamente 13,1 °C.

13 Esse exercício envolve diversas habilidades, com destaque para a interpretação do texto e a relação entre conceitos físicos.

a) A potência é definida como $P = \dfrac{\Delta E}{\Delta t}$.

Assim a variação de energia é:

$\Delta E = P \cdot \Delta t = 4 \cdot 10^9 \cdot 1 \Rightarrow \Delta E = 4 \cdot 10^9$ J

$\Delta E = Q$ e $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$. Então:

$4 \cdot 10^9 = m \cdot 4190 \cdot 50 \Rightarrow$

$\Rightarrow m = 1{,}9 \cdot 10^4$ kg

Assim passam $1{,}9 \cdot 10^4$ litros por segundo no sistema.

b) Para a baía temos:

$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow 4 \cdot 10^9 = m \cdot 4190 \cdot 0{,}5 \Rightarrow$

$\Rightarrow m = 1{,}9 \cdot 10^6$ kg

A fração fica: $f = \dfrac{1{,}9 \cdot 10^4}{1{,}9 \cdot 10^6} = 0{,}01 = 1\%$.

14 a) *A* e *D* são sólidos, *B* é líquido e *C* está na fase de vapor (abaixo da temperatura crítica) e *E* na fase gasosa.

b) De *A* para *B* é a fusão e de *D* para *C*, sublimação.

c) Não é possível, pois *E* está acima da temperatura crítica.

d) À pressão constante basta aquecê-lo, ou diminuir a pressão à temperatura constante.

15 Aumentando-se a pressão, a temperatura de fusão é diminuída (ver diagrama de fases de substâncias que se comportam como a água).

16 De acordo com a **tabela 2.4**, a 500 m a temperatura de ebulição da água é 98,3 °C.

17 a) Se você comprimir um gás num volume menor, as moléculas se chocarão mais frequentemente contra as paredes e aumentarão a pressão. Diminuindo o volume em 50% você dobra a pressão.

b) A pressão permanecerá constante.

18 O manômetro vai indicar: $p = 18 - 760 \Rightarrow p = -742$ mmHg. Isto é quanto a pressão interna está abaixo da atmosférica normal.

19 a) Como $h = \dfrac{p_V}{p_S}$, temos:

$h = \dfrac{12{,}25}{17{,}5} \Rightarrow h = 0{,}7$, ou $h = 70\%$

b) Uma forma simples é fazermos o cálculo considerando que a pressão parcial do vapor não variou.

Nessa abordagem, temos:

$h = \dfrac{p_V}{p_S} \Rightarrow h = \dfrac{12{,}25}{8{,}94} \Rightarrow h \simeq 1{,}37$

ou seja, atingimos o ponto de orvalho, parte do vapor se condensou, e a umidade relativa é 100%.

Rigorosamente falando, a solução deste item não é tão simples.

Se a sala estiver hermeticamente fechada (volume constante), teremos, para a pressão de vapor:

$\dfrac{p_f}{p_i} = \dfrac{T_f}{T_i} \Rightarrow \dfrac{p_f}{p_i} = \dfrac{283}{293} = 0{,}97$

A nova pressão parcial do vapor será $p_f = 0{,}97 \cdot p_i$, ou seja, $p_f = 0{,}97 \cdot 12{,}25 \Rightarrow p_f = 11{,}88$ mmHg, isto é, acima da pressão de saturação (8,94 mmHg) e, portanto, teremos atingido o ponto de orvalho. Parte do vapor se condensou e a umidade relativa é então 100%.

20 A umidade relativa é definida como sendo a razão entre a densidade de vapor e a densidade de saturação. Para 12 °C, a umidade relativa é de 75%. Assim temos:

$0{,}75 = \dfrac{\text{densidade de vapor}}{\text{densidade de saturação}}$

Para 12 °C, a densidade de saturação é de 12 g/m³. Assim temos:

densidade de vapor $= 0{,}75 \cdot 12 = 9$ g/m³

Para 24 °C, a densidade de saturação é de 24 g/m³. Dessa forma, a umidade relativa é dada por:

$h = \dfrac{\text{densidade de vapor}}{\text{densidade de saturação}} = \dfrac{9}{24} = 0{,}375 = 37{,}5\%$

A umidade relativa será de 37,5%.

Retomando

21 A partir do instante em que a água começa a ferver, a temperatura permanece constante. O tempo de cozimento não se altera com a chama baixa ou alta. A diferença é que, com a chama alta, a vaporização será mais rápida.

Resposta: alternativa **e**.

22 Considerando-se o sistema isolado, o somatório dos calores trocados é nulo.

Q_1 = calor trocado pelo chumbo ($Q = mc \cdot \Delta\theta$)

Q_2 = calor trocado pelo recipiente com as amostras ($Q = C \cdot \Delta\theta$)

Q_3 = calor trocado pela água ($Q = mc \cdot \Delta\theta$)

Observe que a temperatura inicial do calorímetro é igual à da água em seu interior, pois eles estão em equilíbrio térmico.

$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0 \Rightarrow$

$\Rightarrow 1000 \cdot 0{,}3(\theta - 80) + 20(\theta - 20) + 400 \cdot 1(\theta - 20) = 0 \Rightarrow$

$\Rightarrow 30(\theta - 80) + 20(\theta - 20) + 400(\theta - 20) = 0 \Rightarrow$

$\Rightarrow 30\theta - 2400 + 20\theta - 400 + 400\theta - 8000 = 0 \Rightarrow$

$\Rightarrow 450\theta = 10800 \Rightarrow \theta = 24\ °C$

Resposta: alternativa **d**.

23 *P*: fase sólida; *Q*: fusão; *R*: fase líquida; *S*: vaporização; *T*: vapor.

Resposta: alternativa **a**.

24 No interior da panela de pressão, a pressão do vapor da água é maior que a pressão atmosférica local. Em decorrência, a ebulição acontece em temperaturas maiores do que aconteceria com a panela aberta, o que diminui o tempo de cozimento dos alimentos.

Resposta: alternativa **b**.

25 A energia despendida é a quantidade de calor recebida pela água, assim:

$Q = mc \cdot \Delta\theta \Rightarrow$

$\Rightarrow Q = 100 \cdot 10^3\ g \cdot 1\ cal/g \cdot °C \cdot 4{,}2\ J/cal\ (32 - 24) \Rightarrow$

$\Rightarrow Q = 3\,360\,000\ J \Rightarrow Q \simeq 3\,400\,000\ J$

Resposta: alternativa **c**.

26 Como descrito na apresentação da umidade do ar, nos desertos, a baixa umidade do ar acarreta grandes variações de temperatura.

Resposta: alternativa **b**.

27 No gráfico podemos ver que a umidade do ar diminui entre as 9h e as 16h e aumenta entre 0h e 6h e entre 6h e 24h. Sabe-se que a insolação solar é maior no intervalo de 9h e 16h, tanto é que se recomenda não ficar exposto nesse intervalo de tempo sem protetor solar. Assim, a insolação é um fator que influencia na variação da umidade relativa do ar.

Resposta: alternativa **a**.

UNIDADE 2 – Energia e meio ambiente

Inicie o trabalho com essa Unidade com uma discussão sobre o meio ambiente. Incentive uma pesquisa sobre a origem da energia elétrica consumida na região. Explore diferentes soluções para os problemas ambientais e energéticos da sua cidade. Peça que os alunos pesquisem sobre os diferentes tipos de geração de energia, suas vantagens e desvantagens.

CAPÍTULO 3 – Primeira lei da Termodinâmica

A pergunta inicial deste capítulo está diretamente relacionada à primeira lei da Termodinâmica: o princípio de conservação de energia. Da energia absorvida pela ingestão dos alimentos, a que não for utilizada para a realização de trabalho fica armazenada como energia interna no organismo (sistema).

Como sugestão, apresentamos algumas questões que servirão para você avaliar as concepções dos alunos em relação ao tema:

1. O que significa realizar trabalho?
2. A expansão do milho de pipoca, pelo aquecimento, realiza trabalho?
3. Em que condições um gás realiza trabalho?
4. É possível um sistema gasoso receber energia do meio externo e sua temperatura permanecer constante?
5. O que significa uma transformação cíclica?
6. Em qual das três fases (sólida, líquida, gasosa) as substâncias são passíveis de grandes variações de volume?

Os conceitos apresentados no capítulo têm como objetivo desenvolver habilidades para:

- Ler e interpretar corretamente tabelas, gráficos, esquemas e diagramas apresentados em textos.
- Construir sentenças matemáticas e esquemas para a resolução de situações-problema.
- Identificar transformações gasosas com base nas variáveis de estado.
- Elaborar relatórios de pesquisas apresentando e discutindo dados e resultados.
- Perceber o papel desempenhado pelo conhecimento físico no desenvolvimento da tecnologia e as relações entre ciência e tecnologia ao longo da história.
- Articular, integrar e sistematizar fenômenos e teorias entre as ciências da natureza.

1. Estudo dos gases

Julgamos importante explicar para os alunos por que iniciamos o capítulo sobre a primeira lei da Termodinâmica com o estudo dos gases. Estamos preparando o terreno para o estudo das máquinas térmicas, que estão diretamente ligadas à Revolução Industrial.

Normalmente, os gases são tratados em Química no 1º ano do Ensino Médio. Nessas condições, você poderá trabalhar, em conjunto, a tabela com as principais transformações gasosas e a pesquisa solicitada na seção **Trabalho em equipe** em forma de seminário. Se isso não for possível, sugerimos comentar a tabela e seus resultados antes da pesquisa dos alunos.

Em relação à Equação de Clapeyron, sugerimos questionar os alunos sobre a diferença entre $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ e $pV = nRT$, com o objetivo de desenvolver habilidades para reconhecer equações e utilizá-las corretamente na solução de situações-problema. A primeira é bastante útil quando queremos comparar dois estados de uma mesma massa gasosa, mas sozinha não resolve o problema de um determinado estado, relacionando as variáveis macroscópicas com a quantidade de mols, o que é possível com a segunda expressão.

Física explica

- O GLP, nas condições em que é utilizado, é de fato vapor, pois pode ser liquefeito sem redução de temperatura.

2. Trabalho em Termodinâmica

Sugerimos começar detalhando o trabalho da força aplicada pelo gás, ou simplesmente, o trabalho do gás, na transformação isobárica. Pelo fato de ser o caso mais simples, a partir do qual podemos deduzir uma propriedade geral para qualquer transformação, que é a obtenção do trabalho pelo cálculo da área compreendida pelo gráfico. Ressaltando que o trabalho é motor na expansão ($\tau \simeq 0$) e resistente na compressão ($\tau < 0$), isto é, a área vai fornecer o módulo do trabalho, mas o sinal fica a cargo da análise do estudante – se é expansão ou compressão.

3. Primeira lei da Termodinâmica

Das três grandezas físicas envolvidas na primeira lei da Termodinâmica, falta discutir a energia interna nas transformações gasosas. É comum a analogia da energia interna como um tipo de poupança que tem o gás, isto é, ele pode realizar trabalho mesmo sem ter recebido calor, lançando mão de sua "poupança".

A leitura do texto da seção **Física tem história** pretende mostrar ao aluno que o conhecimento científico e tecnológico é resultado de uma construção humana e destacar a contribuição de Carnot nessa construção.

4. Transformações termodinâmicas

Como ponto de partida, sugerimos que você apresente as seguintes questões para os alunos:

- Um gás pode receber calor e não esquentar?
- Um gás pode esfriar sem ceder calor?
- Um gás pode ser aquecido sem receber calor?
- Um gás pode realizar trabalho sem receber calor?

A discussão sobre as transformações termodinâmicas vai esclarecer as razões pelas quais a resposta é "sim" para todas essas questões.

Os exercícios resolvidos foram escolhidos de forma a guiar a compreensão e a importância das mensurações nos fenômenos.

Para refletir

Na transformação adiabática variam a pressão, o volume e a temperatura. Portanto, nenhuma delas permanece constante.

Em construção

Há questões interessantes que podem ser discutidas após os estudantes lerem a biografia de Boyle. A seguir, sugerimos algumas com as possíveis respostas.

- Em que período histórico se situa o trabalho de Boyle?

O período é o Renascimento. Na Ciência, uma das características do Renascimento foi a retomada da razão, da Lógica e da Matemática, presente nos clássicos gregos para a explicação dos fenômenos naturais.

- Qual a influência das ideias de Galileu no trabalho de Boyle?

Seguindo as ideias de Galileu, Boyle procurou uma descrição matemática para a descrição das transformações gasosas.

No penúltimo parágrafo da biografia há outro fato que merece comentários: a disponibilidade de papel e da imprensa permitiu a Boyle a divulgação de suas ideias em grande escala.

Experimento

O experimento proposto nesta atividade tem como objetivo levar o aluno a refletir sobre as variáveis de estado, pressão, volume e temperatura, com base nos trabalhos de Boyle. A seguir, as possíveis respostas dos alunos:

- Sem exercer pressão sobre o êmbolo da seringa, a pressão do ar em seu interior é a pressão atmosférica.
- Comprimindo o êmbolo, a pressão aumenta, o volume diminui e a temperatura permanece constante.
- Puxando-se o êmbolo para fora, o volume do ar dentro da seringa aumenta, a pressão diminui e a temperatura permanece constante.
- Para evitar que o ar seja expelido para fora da seringa, no caso da compressão, ou sugado para dentro da seringa, no caso da expansão.
- O ar dentro da bexiga se comporta como o ar dentro da seringa.

Atividades complementares

1. (UEM-PR) Assinale o que for **correto**.

01. A variação da energia interna de um sistema físico é dada pela diferença entre o calor trocado com o meio externo ao sistema e o trabalho realizado no processo termodinâmico.
02. A energia interna de uma dada quantidade de gás perfeito é função exclusiva da temperatura desse gás.
04. As transformações termodinâmicas naturais sempre levam à conservação da quantidade de movimento e da entropia do Universo.
08 Dois corpos, em equilíbrio térmico, possuem a mesma temperatura e, nessa condição, não há troca de calor entre eles.
16. Se dois ou mais corpos trocam calor entre si até atingirem o equilíbrio termodinâmico, a soma algébrica das quantidades de calor trocadas é sempre positiva e será tanto maior quanto maior a temperatura inicial desses corpos.

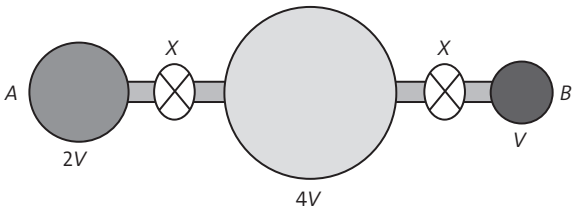
Resolução:

01. **Correto**. É a expressão da primeira lei da Termodinâmica.
02. **Correto**. Essa energia é proporcional à energia cinética média de translação das partículas desse gás.
04. Incorreto. Nos processos naturais, a entropia de um sistema fechado sempre aumenta.
08. **Correto**. O fluxo de calor ocorre quando houver diferença nas temperaturas.
16. Incorreto. Para um sistema isolado, a soma algébrica dos calores trocados é nula.

Resposta: Soma = 1 + 2 + 8 = 11

2. (Unisa-SP) Um sistema é constituído por três balões de vidro, tubos de conexão que permitem a passagem de gases entre os balões e duas válvulas representadas na ilustração por *X*. Os volumes dos balões estão indicados, sendo os volumes dos tubos de conexão desprezíveis. Inicialmente, o balão central está evacuado, as válvulas fechadas. A temperatura é mantida constante em todo o processo. O balão *A* contém *n* mols de um gás ideal, enquanto o balão *B* contém gás de mesma substância que o de *A*, mas com o dobro de mols.

Banco de imagem/Arquivo da editora



Após a abertura das válvulas, a pressão final do gás no sistema, em função da pressão inicial *p* no balão *A*, será igual a:

a) $2p$.

b) $\frac{3p}{7}$.

c) $\frac{6p}{7}$.

d) $\frac{p}{2}$.

e) p.

Resolução:

Como $pV = nRT$, temos:

$$n_A = \frac{p_A \cdot 2V}{RT}$$

Como $n_B = 2n_A$, o total de mols da mistura é:

$$n = n_A + n_B \Rightarrow n = \frac{p_A \cdot 2V}{RT} + 2\frac{p_A \cdot 2V}{RT} = 6\ \frac{p_A V}{RT}$$

Considerando agora as válvulas abertas, temos:

$pV = nRT$

$$p(2+4+1)V = \left(6\frac{p_A V}{RT}\right) \Rightarrow p = \frac{6}{7}\,p_A$$

Resposta: alternativa **c**.

3. (UEA-AM) Uma bolha de volume igual a 2 mL foi formada no fundo do oceano, em um local onde a pressão é de 4 atm. Considerando que a temperatura permaneceu constante, o volume final da bolha ao atingir a superfície do oceano, local em que a pressão é igual a 1 atm, foi de:

a) 20 mL.

b) 10 mL.

c) 8 mL.

d) 4 mL.

e) 2 mL.

Resolução:

Como a temperatura é a mesma temos:

$pV = p_0V_0$, logo $1 \cdot V = 4 \cdot 2 \Rightarrow V = 8$ mL

Resposta: alternativa **c**.

4. (IFRS) A formulação mais geral do Princípio de Conservação da Energia foi apresentada pelo cientista Hermann von Helmholtz, no ano de 1847, e em seu livro "Sobre a Conservação da Energia" ele diz que "chegamos a conclusão de que a natureza como um todo possui um estoque de energia que não pode de forma alguma ser aumentada ou reduzida; e que, por conseguinte, a quantidade de energia na natureza é tão eterna e inalterável como a quantidade de matéria". Helmholtz mostrou que este princípio se aplica a todos os fenômenos conhecidos, como os mecânicos, térmicos, elétricos, entre outros. A seguir, apresentamos quatro afirmativas que descrevem situações que envolvem análise de formas de energia e suas transformações.

I. Uma esfera metálica que está num forno quente à temperatura de 250 °C possui mais calor que outra esfera, de mesmo tamanho e material, que está num refrigerador e em equilíbrio térmico a este à temperatura de – 20 °C.

II. Ao tampar com um dos dedos a saída de ar de uma bomba de encher pneu e comprimir rapidamente o êmbolo, a energia interna do ar que foi comprimido no interior da bomba irá aumentar, o que pode ser verificado com a elevação de temperatura desse ar.

III. Durante o movimento de descida de um bloco, quando este desliza com atrito sobre uma rampa inclinada com velocidade constante, a energia potencial gravitacional do bloco é convertida em energia térmica, aquecendo as superfícies do bloco e da rampa, e em energia cinética do bloco.

IV. Numa cachoeira, onde o módulo da velocidade de escoamento da água antes e depois da queda é igual, a energia potencial gravitacional da água no alto, quando ela inicia o movimento de queda, é convertida, durante a queda, em energia cinética e, ao final da queda, em energia térmica.

Estão corretas apenas:

a) I, II e III.

b) I, II e IV.

c) I, III e IV.

d) II e III.

e) II e IV.

Resolução:

I. Incorreta. Os corpos não possuem calor. O calor é energia em trânsito.

II. **Correta**. O trabalho mecânico na compressão incrementa a energia interna do gás.

III. Incorreta. Se a velocidade é constante, não há acréscimo de energia cinética.

IV. **Correta**.

Resposta: alternativa **e**.

Resolução dos exercícios

1 Esta questão envolve uma transformação isométrica: volume constante. Como $T_0 = 27\ °C = 300$ K e $p_1 = 3$ atm, a temperatura máxima é dada por:

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p_1}{T_1} \Rightarrow \frac{1}{300} = \frac{3}{T_1} \Rightarrow T_1 = 900\ \text{K} = 627\ ^\circ\text{C}$$

2 Como o volume é constante e sendo $p_1 = 1$ atm, $T_1 = 127\ ^\circ\text{C} = 400$ K e $T_0 = 27\ ^\circ\text{C} = 300$ K, obtemos:

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p_1}{T_1} \Rightarrow \frac{p_0}{300} = \frac{1}{400} \Rightarrow p_0 = 0{,}75\ \text{atm}$$

3 a) Temos: $T_2 = \frac{1}{2} \cdot T_1$ e V = constante, logo: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$. Assim:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{\frac{1}{2} \cdot T_1} \Rightarrow p_2 = \frac{1}{2} \cdot p_1$$

b) Como $\frac{p}{T}$ = constante, o gráfico, no diagrama $p \times T$, é uma reta que passa pela origem, conforme ilustra o gráfico seguinte.

Gráfico da pressão pela temperatura

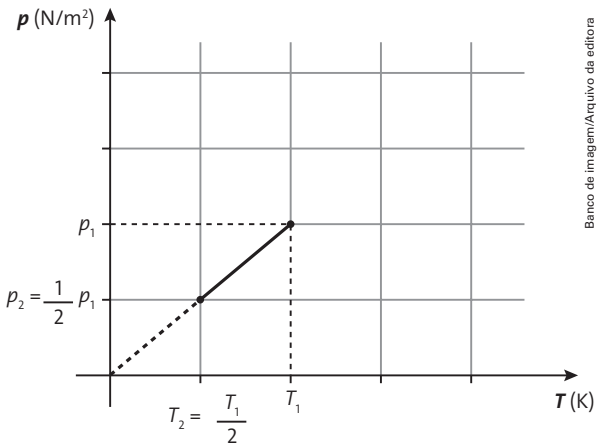


Gráfico elaborado para fins didáticos.

A pressão e a temperatura, nesse tipo de transformação, são grandezas diretamente proporcionais.

4 Como a temperatura interna é menor do que a externa, a pressão interna é menor do que a pressão externa. Nessas condições, a porta ficará sujeita a uma compressão devido à diferença de pressão. Essa diferença de pressão multiplicada pela área da porta é a força, que age na porta de fora para dentro, e que pode ser considerada no centro geométrico da porta. Para abrir a porta é necessário aplicar uma força de intensidade ligeiramente maior que a força devido à diferença de pressão.

5 a) O peso do êmbolo e a pressão atmosférica são constantes. Assim, é constante a pressão durante a transformação. A transformação é, portanto, isobárica.

b) Na transformação isobárica, o trabalho é dado por:

$$\tau = p \cdot \Delta V \Rightarrow \tau = 1{,}4 \cdot 10^5 \cdot (1{,}5 - 1{,}0) \cdot 10^{-3} \Rightarrow \tau = 70\ \text{J}$$

6 a) O trabalho do gás na transformação *AB* é positivo (expansão) e pode ser calculado numericamente pela área destacada.

Trabalho do gás na transformação *AB*

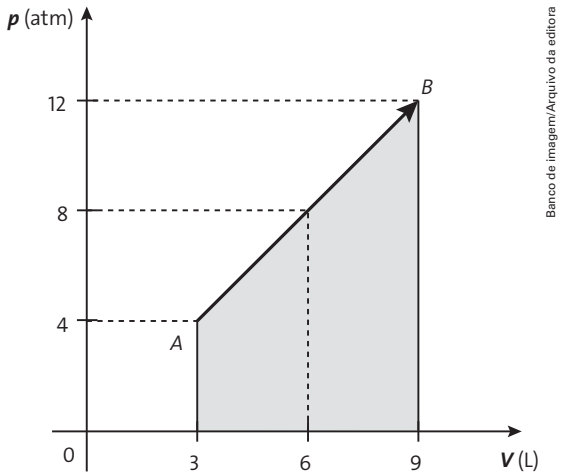


Gráfico elaborado para fins didáticos.

$$\tau_{AB} = \text{Área do trapézio} = \frac{B + b}{2} \cdot h \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{AB} = \frac{12 + 4}{2} \cdot (9 - 3) \Rightarrow \tau_{AB} = 48\ \text{atm} \cdot \text{L}$$

Na transformação *BC* o trabalho é nulo, pois não havendo variação no volume, não há deslocamento e a força que o gás aplica não realiza trabalho. Assim, $\tau_{BC} = 0$.

Na transformação *CA* o trabalho é resistente (compressão) e seu módulo é obtido pela área em destaque.

Trabalho do gás na transformação *CA*

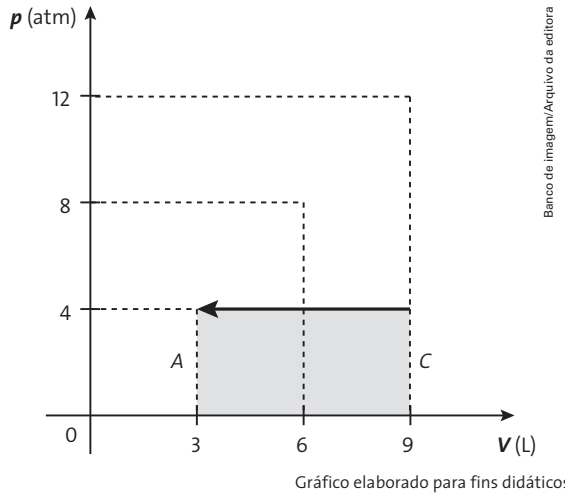


Gráfico elaborado para fins didáticos.

$|\tau_{CA}| = 6 \cdot 4 = 24$

Considerando-se o valor algébrico temos:

$\tau_{CA} = -24\ \text{atm} \cdot \text{L}$

Lembrando que $1\ \text{atm} \cdot \text{L} = 100$ J, podemos então representar os trabalhos por:

$$\begin{cases} \tau_{AB} = 4\,800\ \text{J} \\ \tau_{BC} = 0 \\ \tau_{AB} = -2\,400\ \text{J} \end{cases}$$

b) O trabalho total, na transformação *ABCA*, é a soma dos trabalhos das transformações *AB*, *BC* e *CA*. Assim, temos:

$\tau_{ABCA} = 4\,800 + 0 + (-2\,400) \Rightarrow \tau_{ABCA} = 2\,400$ J

7 A variação de energia interna é dada por:

$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = 50 \cdot 4 - 300 \Rightarrow \Delta U = -100$ J

8 Como a variação de energia interna é dada por $\Delta U = Q - \tau$, temos:

a) Se $Q > 0$, $\tau > 0$ e $Q < \tau$, então: $\Delta U < 0$. Portanto, a energia interna do gás **diminui**.

b) Se $Q > 0$, $\tau > 0$ e $Q > \tau$, então: $\Delta U > 0$. Portanto, a energia interna do gás **aumenta**.

9 a) Como a energia cinética é proporcional à temperatura absoluta e esta dobrou, a energia cinética também dobrou.

b) A energia interna é o somatório das energias cinéticas. Assim, ela também dobrou.

c) Como o recipiente é rígido, o volume é constante. Ao dobrar a temperatura absoluta, dobrou a pressão. Se, escapando gás, a pressão voltou a ser a mesma, então a quantidade de mols se reduziu à metade. Assim, a energia interna também se reduziu à metade, pois ela é proporcional ao número de partículas.

10 Na transformação isotérmica: $\Delta U = 0$. Assim, sendo $\Delta U = Q - \tau$, temos:

$0 = Q - \tau \Rightarrow Q = \tau > 0$. Portanto, o gás recebeu 200 J de calor do meio externo.

11 a) Como a transformação é isométrica, o trabalho realizado pelo gás é nulo, pois não há variação de volume. Na transformação isométrica:

$\Delta U = Q \Rightarrow \Delta U = 747$ J

b) A temperatura do gás aumenta, pois houve aumento na energia interna do gás.

12 a) Na transformação isobárica indicada no gráfico, o volume ao final é menor que o volume inicial. Nessas condições, o gás sofreu uma **compressão**.

b) O trabalho realizado pelo gás na transformação isobárica é dada por:

$\tau = p \cdot \Delta V \Rightarrow \tau = 6{,}0 \cdot 10^5 \cdot (0{,}1 - 0{,}4) \Rightarrow$

$\Rightarrow \tau = -1{,}8 \cdot 10^5$ J

c) A temperatura do gás é menor em *B* do que em *A*, pois o produto $p \cdot V$ é menor em *B* do que em *A*. Assim, a energia interna do gás diminui, pois a temperatura diminui. Portanto, a variação de energia interna é **negativa**.

13 Em uma expansão adiabática, o gás realiza trabalho ($\tau > 0$) e não troca calor com o meio externo ($Q = 0$). Nessas condições, a variação de energia interna é:

$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = -\tau$

Como $\tau > 0$, temos $\Delta U < 0$.

Portanto, o desodorante chega ao nosso corpo com uma temperatura **menor** que a do ambiente.

14 Com base no gráfico, obtemos:

Trabalho do gás no ciclo *ABCD*

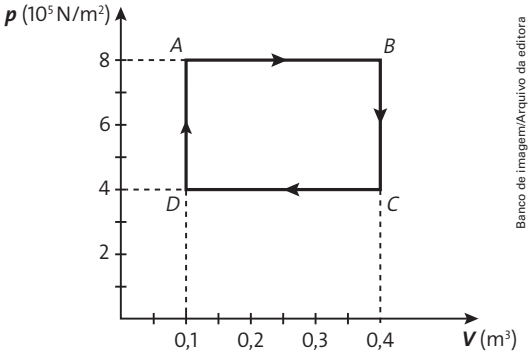


Gráfico elaborado para fins didáticos.

a) $|\tau_{ciclo}| = A_{ciclo} \Rightarrow \tau_{ciclo} = (0{,}4 - 0{,}1) \cdot (8 - 4) \cdot 10^5 \Rightarrow$

$\Rightarrow \tau_{ciclo} = 1{,}2 \cdot 10^5$ J

O trabalho é positivo, pois o ciclo é horário.

b) Após o ciclo, o gás volta ao estado inicial, logo:

$\Delta U = 0$.

c) Nas transformações cíclicas $\Sigma Q = \Sigma \tau$, pois $\Delta U = 0$, assim: $\Sigma Q = 1{,}2 \cdot 10^5$ J.

15 De acordo com o gráfico, temos:

Trabalho do gás no ciclo ABC

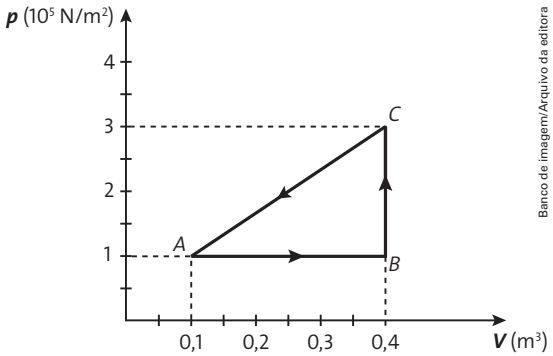


Gráfico elaborado para fins didáticos.

a) $|\tau_{ciclo}| = A_{ciclo}$ e $\Sigma \tau = \Sigma Q \Rightarrow$

$\Rightarrow |\tau_{ciclo}| = \dfrac{(0{,}4 - 0{,}1) \cdot (3 - 1) \cdot 10^5}{2} \Rightarrow$

$\Rightarrow \tau_{ciclo} = \Sigma Q = -3 \cdot 10^4$ J

b) A temperatura máxima ocorre para o máximo produto $p \cdot V$: ponto *C*.

c) O trabalho motor é na expansão, ou seja, na transformação isobárica *AB*.

Retomando

16 A resposta é **não**. Para impulsionar uma locomotiva, o gás deve realizar trabalho positivo (expansão). Na condensação, o trabalho realizado sobre o sistema é negativo. Neste caso, o gás não contribui para a propulsão. No entanto, no processo de condensação, o trabalho realizado pela atmosfera pode ser aproveitado. Por exemplo, uma garrafa plástica aberta colocada em banho-maria e logo depois fechada hermeticamente, se for rapidamente resfriada, será amassada pela pressão da atmosfera.

17 De acordo com o texto, a expansão é tão rápida que não há tempo para haver troca de calor com o meio ambiente. Isso caracteriza uma transformação adiabática.

Resposta: alternativa **b**.

18 A quantidade de calor é 900 000 cal. Sendo 1 cal = 4 J, temos:

$Q = 900\,000 \cdot 4 = 3\,600\,000 \text{ J} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ J}$

Como a quantidade de calor deve ser igual ao trabalho, a altura h é dada por:

$\tau = m \cdot g \cdot h \Rightarrow 3{,}6 \cdot 10^6 = 60 \cdot 10 \cdot h \Rightarrow h = 6\,000 \text{ m}$

Resposta: alternativa **d**.

19 Como a temperatura final é a mesma que a inicial, temos:

$pV = p_0V_0$, logo $p \cdot 40 = 1{,}0 \cdot 10^5 \cdot 60 \Rightarrow p = 1{,}5 \cdot 10^5$ Pa.

Resposta: alternativa **d**.

20 A pressão absoluta no pneu é a indicada pelo manômetro acrescida da pressão atmosférica, logo: $p_0 = 27{,}0 + 14{,}7 \Rightarrow$
$\Rightarrow p_0 = 41{,}7$ psi.

Como o volume é constante, temos (com as temperaturas em Kelvin):

$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0} \Rightarrow \frac{p}{37+273} = \frac{41{,}7}{273+27} \Rightarrow \frac{p}{310} = \frac{41{,}7}{300} \Rightarrow$

$\Rightarrow p \simeq 43{,}1$ psi

A nova pressão manométrica é obtida subtraindo-se a pressão atmosférica, logo:

$p_f = 43{,}1 - 14{,}7 = 28{,}4$ psi

Resposta: alternativa **d**.

CAPÍTULO 4 – Segunda lei da Termodinâmica

A escolha da pergunta inicial tem a finalidade de alertar o estudante para o tema de dissipação da energia mecânica: as irreversibilidades.

Acreditamos que essa discussão possa ser realizada em grupos de alunos e é possível solicitar aos grupos textos que destaquem as irreversibilidades nos fenômenos do dia a dia. Por exemplo, em uma xícara de café com leite, qual é probabilidade de todo o café ficar de um lado e o leite do outro?

1. Segunda lei da Termodinâmica

Uma noção sobre as máquinas térmicas já foi trabalhada no fim do capítulo anterior, ao falarmos das transformações cíclicas. Assim, é possível começar discutindo a importância de a máquina ser cíclica, para ser utilizada continuamente.

A questão apresentada no **Para refletir** pode motivar a discussão do problema da conversão em trabalho e de como a ideia de "Moto perpétuo" foi objeto de curiosidade.

Para refletir

Não é possível a conversão integral de calor em trabalho mecânico, pois no processo de conversão de energia térmica para mecânica, ocorrem perdas por radiação e convecção para o meio externo.

A classificação das máquinas, de acordo com a finalidade de cada uma, pode ser apresentada, inicialmente:

máquinas térmicas
- motor térmico
- trocadores de calor
  - refrigerador
  - bomba de calor

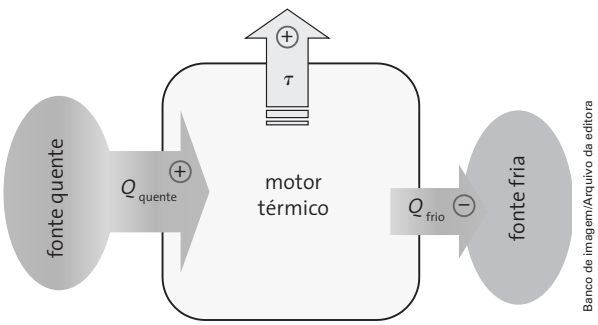
Você pode, então, pedir exemplos de máquinas térmicas e deixar para o final a discussão da bomba de calor. Essa não é, pelo menos em nosso país, uma máquina muito comum no cotidiano.

Os alunos deverão falar sobre motores de automóveis, ônibus, tratores, e sobre refrigeradores, *freezers*, aparelhos de ar condicionado.

Pode ser interessante convidar os alunos para discutir nossa atmosfera como uma grande máquina térmica. A água, aquecida e vaporizada pelo calor solar, sobe para a atmosfera e depois se precipita, irrigando plantações e enchendo as represas.

2. Motor térmico

Para a discussão deste tópico, de grande valor prático e responsável por grande parte do desenvolvimento tecnológico atual, acreditamos ser interessante iniciar com o diagrama:



Banco de imagem/Arquivo da editora

Diagrama de um motor térmico.

Assim, é possível discutir quais são as fontes no caso do motor de um automóvel a álcool, por exemplo:

- fonte quente: queima do álcool;
- fonte fria: atmosfera;
- trabalho mecânico: movimento das rodas.

O conceito de rendimento pode ser explicado com um exemplo bem simples, por analogia: sugerimos que você pergunte qual foi o rendimento quando explicamos a terceira lei de Newton a 100 alunos mas apenas 70 entenderam. Resposta: 70%.

Já a potência pode ser apresentada como outra medida de desempenho: em quanto tempo foi feita determinada tarefa?

Uma discussão qualitativa sobre potência e rendimento pode utilizar como exemplo os motores de Fórmula 1, de grande potência, mas consumo muito alto, ou seja, baixo rendimento. Já os grandes motores navais, a *diesel*, são motores de alta potência e de alto rendimento. Os carros populares, com potências relativamente baixas, têm bom rendimento.

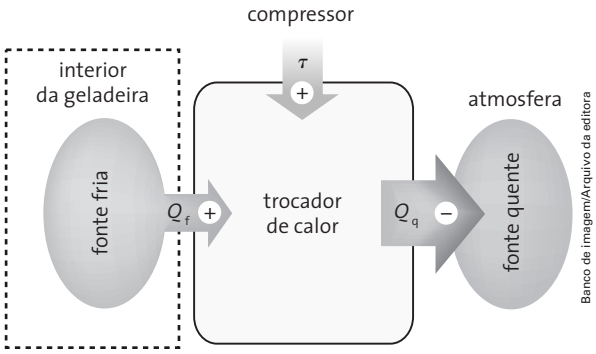
O Exercício resolvido 1 é um exemplo detalhado para avaliação das potências total, útil e dissipada, com dados próximos à realidade. A opção de apresentar a unidade hp foi de ordem prática, para desenvolver as habilidades de conversão de unidades e de familiarização com a linguagem prática, muito usada na engenharia.

3. Trocadores de calor

Este assunto pode ser iniciado a partir de uma pergunta: como são as trocas de calor de uma geladeira? Uma conclusão possível é: a geladeira é um refrigerador dos alimentos em seu interior, mas é um aquecedor da cozinha.

Assim, você pode conversar com os alunos sobre o fato de que, às vezes, é conveniente provocar algumas trocas de calor.

O diagrama a seguir pode ser esboçado na lousa e sua discussão pode levar os alunos ao desenvolvimento de habilidades relativas à expressão de fenômenos cotidianos com os códigos da Física.



Fluxos de calor e trabalho em um refrigerador.

Um fato interessante a ser discutido é que nos refrigeradores a razão entre a energia despendida e a quantidade de calor retirada é normalmente maior do que a unidade. Assim usa-se o termo eficiência (ε), em vez de rendimento.

O mesmo diagrama da geladeira pode ser utilizado para o entendimento da bomba de calor.

A discussão pode ser realizada sugerindo que os alunos o vejam do ponto de vista de quem está fora dela. Sob esse ponto de vista, o compressor está forçando um fluxo de calor do frio para o quente, aquecendo a atmosfera.

A comparação da eficiência da máquina quando funciona como refrigerador ou bomba de calor ($\varepsilon_{aquec.} = \varepsilon_{refrig.} + 1$) é importante, pois mostra claramente que nas bombas de calor a eficiência é sempre maior do que 100%.

Um comentário final pode ser relativo ao uso da energia: por que, sendo a bomba de calor tão eficiente, não é tão amplamente usada?

Para ser acionada, a bomba de calor requer energia elétrica. Caso essa energia venha de uma usina termoelétrica, como nos países com pouco potencial hidrelétrico, é mais econômico utilizar diretamente o combustível para o aquecimento. Esse é o caso de muitos países do leste europeu. Esse comentário permite propor uma breve discussão sobre a matriz energética dos diversos países e suas implicações na vida diária da população.

Física explica

O tema, irreversibilidade, já abordado inicialmente, pode ser retomado e sua relação com a vida e envelhecimento é um tópico que acreditamos ser de interesse.

Exemplo de resposta: Misturar água e álcool é um processo irreversível, porém, como o álcool tem temperatura de ebulição menor do que a água, podemos separá-los aumentando a temperatura da mistura até o ponto de ebulição do álcool. O processo é, então, irreversível e remediável. Outros exemplos são a gravidade e a chuva.

4. O ciclo de Carnot

Sugerimos que, ao iniciar este item, você incentive os alunos a buscar, em pesquisa na internet e em livros, ideias sobre como as máquinas térmicas provocaram a Revolução Industrial, a partir da construção da máquina a vapor.

Equipes podem ser formadas para a apresentação de seminários, que podem aprimorar as habilidades de comunicação nos códigos da Física.

Esse início de trabalho pode levar a questionamentos sobre o uso da energia térmica nos diversos tipos de atividades humanas. Talvez seja natural para o aluno, nesse momento, pensar em formas de extrair o máximo de energia possível em certo processo.

Aparece, então, a discussão sobre o limite máximo de desempenho que se pode obter das máquinas. Você pode, então, explicar que Carnot demonstrou que nenhum motor térmico poderia render mais do que um motor reversível.

Retoma-se, então, o questionamento: o que é um motor reversível?

Esta é uma discussão conceitual de grande relevância: fornecido um determinado estado para o sistema, o que vai acontecer depois?

Com o exemplo do pêndulo ideal, é possível conjecturar que ele pode estar subindo ou descendo. Ou seja, a subida e a descida são processos reversíveis. Em qualquer um dos estados (subida ou descida) o fenômeno pode acontecer em um sentido ou em outro.

Para o caso das expansões ou compressões gasosas, o sentido é determinado pela diferença das pressões. Para que fossem rigorosamente reversíveis, as pressões seriam iguais, mas isso seria um estado de equilíbrio.

O mesmo argumento, agora para a variável temperatura, vale para as trocas de calor.

A discussão pode ser finalizada com esta ideia: se for apresentado o gráfico da transformação, cada ponto corresponde a um estado de equilíbrio e, portanto, ela é reversível. Reciprocamente, se a transformação for reversível, pode ser representada em um diagrama $p \times V$.

O Teorema de Carnot é um dos monumentos da capacidade de abstração, uso da lógica e da compreensão da Natureza, do ponto de vista humano, mas sua prova envolve várias etapas de conteúdo conceitual denso:

1. Nenhum motor térmico cíclico, que opere entre duas temperaturas, tem rendimento maior que o motor de Carnot.
2. Todos os motores térmicos cíclicos reversíveis que trabalhem entre as mesmas fontes têm o mesmo rendimento.

   Nenhum motor térmico cíclico (movido a gás, molas, elásticos, etc.) trabalhando entre duas fontes térmicas de temperaturas T_q e T_f rende mais que:

   $$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

Sugerimos que cada um dos quatro comentários que se seguem à prova do Teorema de Carnot sejam discutidos à exaustão.

Além disso, nos parece importante enfatizar o fato de muitas pessoas pensarem que as máquinas térmicas não rendem 100% por causa das forças dissipativas, o que é um erro.

Mesmo a máquina ideal (a de Carnot), trabalhando com duas fontes térmicas, renderia $\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q}$, como decorrência da segunda lei.

Um exemplo detalhado (exercício resolvido 2), com dados próximos ao que acontece em um motor a gasolina real, é apresentado para desenvolver as habilidades e competências relativas ao uso de princípios físicos em situações relativas à tecnologia.

Talvez, neste momento, poder-se-ia perguntar: se não existe o motor ideal, para que serve o teorema de Carnot?

Uma resposta possível seria: Para mostrar quanto uma máquina está distante do limite máximo de rendimento, ou seja, quanto é passível de aprimoramentos.

Para arrematar tão importante seção, é possível discutir como as eficiências do refrigerador e da bomba de calor de Carnot podem ser obtidas, quando se sabe que, no ciclo de Carnot: $\left|\frac{Q_f}{Q_q}\right| = \frac{T_f}{T_q}$.

Dada a importância da segunda lei da Termodinâmica e sua dificuldade de formulação, diferentes enunciados têm sido utilizados para expressá-la. Por essa razão, sugerimos três propostas para o enunciado da segunda lei da Termodinâmica. Acreditamos ser produtivo discutir sua equivalência, visando o desenvolvimento das habilidades e competências relativas à generalização de conceitos e sua interpretação.

Física explica

A leitura do texto da seção pode ser utilizada para estabelecer que o zero do gás perfeito é o limite inferior de temperatura para todos os corpos do Universo (não apenas os gases), conclusão que decorre do Teorema de Carnot.

1. De acordo com o texto, em termos de rendimento de motores térmicos, se existissem temperaturas inferiores a 0 K, então uma máquina térmica cíclica poderia render mais de 100%.
2. Ele demonstrou que nenhuma máquina térmica renderia mais do que uma reversível e ele demonstrou que todas as reversíveis têm o mesmo rendimento. Como todas têm o mesmo rendimento, nenhuma renderia mais do que a máquina de Carnot.

5. Motores de combustão interna

Este é um tópico que pode ser muito atraente para os alunos, uma vez que trata do funcionamento de motores de veículos, fato do cotidiano e objeto de curiosidade.

Os principais tipos de motores nos veículos em geral usam o ciclo Otto (**Física explica**) e o ciclo *Diesel*. Um fato interessante a ser discutido é como a taxa de compressão influencia no rendimento do motor.

O detalhamento de aspectos técnicos, como taxa de compressão e torque, é feito para fornecer informações que podem ser importantes na vida futura de alguns alunos e fazer a conexão com a realidade dos motores automotivos.

Por esse motivo, se houver tempo, recomenda-se aos alunos que façam, em equipe, pesquisas em revistas, *sites* e jornais especializados sobre as características dos motores de combustão interna dos automóveis e utilitários mais comuns. Além das informações técnicas, dois pontos merecem destaque:

1. Por que não utilizar o ciclo *Diesel* para todos os veículos de motor com combustão interna? Quais as vantagens e desvantagens de um ciclo em relação ao outro? Qual a participação do governo brasileiro na utilização de *diesel*, etanol e gasolina?
2. Um dos problemas ambientais referente aos motores de combustão interna está relacionado à emissão de gases poluentes. Em sua opinião, quais medidas devem ser tomadas para minimizar o problema?

Você pode aproveitar esse trabalho para discutir o conceito de torque de um motor. A publicidade sobre desempenho dos veículos em geral tem foco exclusivamente na potência. Pior ainda, ela fala somente da potência máxima, mas os motores geralmente demoram muito até atingir esse pico.

Rendimento e torque também são raramente citados na publicidade. O comprador só vai perceber a importância desses parâmetros quando estiver dirigindo ou reabastecendo o veículo.

Uma questão econômica, ambiental e social importante é: se o ciclo *Diesel* é tão mais eficiente, por que não utilizá-lo em todos os veículos?

No livro apresentamos algumas razões pelas quais isso não acontece. Mostramos também o papel da caixa de câmbio nos veículos, que controla o torque entregue às rodas motrizes.

Em construção

Sugerimos uma atividade de interpretação de texto. Após a leitura, a sala pode ser dividida em pequenas equipes que serão responsáveis pela resposta (discussão) de alguma das perguntas que sugerimos a seguir. As respostas podem ser apresentadas pela equipe ou escritas em um texto breve. Todo o processo pode ser aproveitado como parte da avaliação, tanto para medir o envolvimento dos alunos como também para que você possa verificar a compreensão que tiveram do tema.

Sugestão de respostas para as questões da seção:

1. O ciclo de Carnot é importante para as máquinas térmicas, pois é o ciclo que apresenta o maior rendimento possível.
2. As máquinas térmicas eram importantes para a Revolução Industrial, pois nessa época houve um aumento no uso de máquinas térmicas e procurava-se que elas fossem o mais eficientes possível.

A seguir, sugestões de questões complementares.

a) Qual foi a característica do período em que nasceu Carnot?
   Foi o período da Revolução Francesa (1789-1799), com a queda da monarquia, do poder do clero e da nobreza. A revolução aboliu a servidão e os direitos feudais e proclamou os princípios universais preconizados pelos pensadores iluministas: Liberdade, Igualdade e Fraternidade.
b) Por que boa parte dos cientistas do começo do século XIX voltou suas atenções para a Termodinâmica?
   Em virtude do avanço vertiginoso na utilização de máquinas térmicas.
c) Carnot morreu precocemente, aos 36 anos, o que não era incomum na época. Qual era um dos grandes problemas de saúde pública de então?
   Um dos mais graves problemas de saúde pública nos aglomerados urbanos eram as doenças infecciosas. Carnot foi vítima de cólera.
d) Que país dominava a produção de máquinas térmicas no começo do século XIX?
   Como descrito no texto da biografia, Carnot se preocupava com a supremacia da rival Inglaterra nesse setor.

Experimento

Experimentos sobre a segunda lei da Termodinâmica são sempre difíceis de conceber e realizar. Entretanto, apresentamos a chamada "catraca-lingueta", que pode ser feita com os alunos a partir de uma montagem simples.

Respostas esperadas:

1. Não haverá movimento do eixo. O eixo só teria alguma movimentação se a lingueta tivesse uma massa comparável com a massa das moléculas de ar que colidem com as pás.

2. Não, pelas razões expostas no item 1.
3. O propósito seria a total conversão de energia térmica em trabalho mecânico.
4. Como o experimento não logra sucesso, não há violação da segunda lei da Termodinâmica.

Atividades complementares

A seguir, apresentamos sugestões de exercícios, com a respectiva resolução, que podem servir para avaliações ou complementação do trabalho.

1. Um trocador de calor retira, a cada 2 segundos, 4 000 kJ da fonte fria *A*, enviando 5 000 kJ para a fonte quente *B*.

a) Se esse trocador de calor estiver funcionando como refrigerador de *A*, qual será a sua eficiência?

b) Se esse trocador de calor estiver funcionando como uma bomba de calor que aquece *B*, qual será sua eficiência?

c) Qual é a potência útil do compressor dessa máquina?

Resolução:

a) Como $|Q_q| = |Q_f| + |\tau|$, temos:

$5\,000 = 4\,000 + |\tau| \Rightarrow |\tau| = 1\,000$ kJ

A eficiência pode ser obtida por $\varepsilon_{refrig.} = \dfrac{|Q_f|}{|\tau|}$, logo:

$\varepsilon_{refrig.} = \dfrac{4\,000}{1000} = 400\%$

b) $\varepsilon_{aquec.} = \varepsilon_{refrig.} + 1 \Rightarrow \varepsilon_{aquec.} = 500\%$

c) A potência útil do compressor pode ser obtida por:

$P = \dfrac{|\tau|}{\Delta t} = \dfrac{1000}{2} \Rightarrow P = 500$ W

2. Um trocador de calor opera de forma que a temperatura da fonte fria é de −13 °C (260 K), enquanto a da fonte quente é de 27 °C (300 K). Quais serão as eficiências desse trocador se:

a) ele estiver operando como um refrigerador de Carnot?

b) estiver operando como um aquecedor termodinâmico de Carnot?

Resolução:

a) $\varepsilon_{refrig.} = \dfrac{T_f}{T_q - T_f} \Rightarrow \varepsilon_{refrig.} = \dfrac{260}{300 - 260} \Rightarrow$

$\Rightarrow \varepsilon_{refrig.} = 650\%$

b) $\varepsilon_{aquec.} = \varepsilon_{refrig.} + 1 \Rightarrow \varepsilon_{aquec.} = 750\%$

Resolução dos exercícios

1 I. A energia térmica adquirida pelas mãos não pode ser convertida em mecânica, provocando movimento das mãos.

II. Não é possível que a tinta se separe da água espontaneamente, uma vez dissolvida. Essa ação requer energia mecânica adicional para filtragem.

III. Não é possível "devolver" a energia térmica trocada pelos corpos durante o processo.

2 Como a máquina está recebendo calor (solar) e gerando energia mecânica (a energia potencial das águas nas hidrelétricas), ela está funcionando como um motor térmico.

3 a) O interior do cômodo seria aquecido e a refrigeração passaria ao ambiente externo.

b) Nesse caso, o aparelho estaria funcionando como um aquecedor termodinâmico, ou seja, uma bomba de calor.

4 Não, pois é necessário trabalho mecânico para comprimir o ar, ou seja, dispender energia ao sistema. Parte dessa energia será liberada à medida que o gás se expande.

5 Trata-se da aplicação direta do enunciado da segunda lei da Termodinâmica.

Resposta: alternativa **c**.

6 a) $P = \dfrac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow \Delta E = P \cdot \Delta t$

Em um minuto (60 s) o motor efetua 6 000 rotações, logo:

$6\,000 \cdot \Delta E = 45 \cdot 10^3 \cdot 60$, em que ΔE é a energia liberada a cada volta.

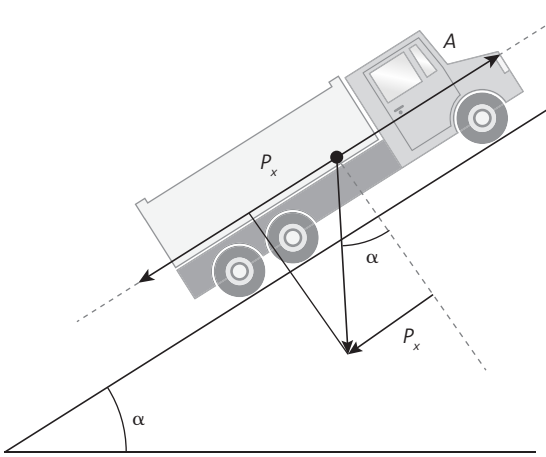
Assim:

$\Delta E = \dfrac{45 \cdot 10^3 \cdot 60}{6\,000} \Rightarrow \Delta E = 450$ J

b) $P = F \cdot v \Rightarrow 45 \cdot 10^3 = F \cdot 30 \Rightarrow F = 1{,}5 \cdot 10^3$ N

c) Diminuiria a intensidade das forças resistivas, em cada velocidade, com redução do consumo e proporcionando um valor de velocidade máxima maior.

7 a) A força resultante contrária ao movimento e a componente da força peso na direção do plano inclinado (P_x), conforme mostra a figura seguinte:



Formato/Arquivo da editora

Representação sem escala e em cores fantasia das forças em um caminhão subindo uma rampa.

$P = m \cdot g = 20 \cdot 10^3 \cdot 10 = 2 \cdot 10^5$ N

$P_x = P \cdot \text{sen}\,\alpha = A$, em que A é a força motriz.

Assim:

$A = 2 \cdot 10^5 \cdot 0{,}1 \Rightarrow A = 2 \cdot 10^4$ N

$P = A \cdot v \Rightarrow P = 2{,}0 \cdot 10^4 \cdot 10 \Rightarrow P = 2{,}0 \cdot 10^5$ W $\simeq 270$ hp

b) $\eta = \dfrac{P_u}{P_t} \Rightarrow 0{,}30 = \dfrac{2 \cdot 10^5}{P_t} \Rightarrow P_t = 6{,}7 \cdot 10^5$ W

c) Em 1 s, a energia "gasta" é $6{,}7 \cdot 10^5$ J. Nesse intervalo de tempo, o caminhão percorre 10 m. Assim, o consumo de energia por metro é:

$$\frac{\Delta E}{\Delta s} = \frac{6{,}7 \cdot 10^5}{10} \Rightarrow \frac{\Delta E}{\Delta s} = 6{,}7 \cdot 10^4 \ \frac{\text{J}}{\text{m}} = 6{,}7 \cdot 10^7 \ \frac{\text{J}}{\text{km}}.$$

Conforme o poder calorífico do combustível utilizado, pode-se então obter o consumo por quilômetro.

8 $Q_q = \tau + Q_f \Rightarrow 800 = \tau + 600 \Rightarrow \tau = 200$ J

$$P_u = \frac{\tau}{\Delta t} \Rightarrow P_u = \frac{200}{1} = 200 \text{ W}$$

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow \Delta E = P \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta E = 200 \cdot 10 \Rightarrow \Delta E = 2\,000 \text{ J}$$

$$\eta = \frac{\tau}{Q_q} \cdot 100\% = \frac{200}{800} \cdot 100\% \Rightarrow \eta = 25\%$$

a) A energia útil é de 200 J.

b) A potência útil é de 2 000 W.

c) O rendimento é de 25%.

9 a) A potência em Watt é: $P = 72 \cdot 735 \simeq 53$ kW.

Em 1 min = 60 s, a energia liberada é:
$\Delta E/\text{min} = P \cdot \Delta\tau = 52\,920 \cdot 60 \simeq 3{,}2 \cdot 10^6$ J

Como são 5 250 voltas/min, temos: $\Delta E/\text{volta} \simeq 600$ J.

b) $\eta = \frac{P_u}{P_t} \Rightarrow 0{,}28 = \frac{53}{P_t} \Rightarrow P_t \simeq 189$ kW

c) $P_d = P_t - P_u \Rightarrow P_d = 189 - 53 = 136$ kW

d) Como 1 hp = 746 W e 1 cv = 735 W, temos:

$$P_u = 72 \cdot \frac{735}{746} \simeq 71 \text{ hp}$$

10 Nos refrigeradores, o calor é transmitido do corpo mais frio para o mais quente de maneira forçada.

Resposta: alternativa **b**.

11 Não. Considerando o conjunto geladeira-compressor, ele recebe energia e libera calor.

12 a) $P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow P_u = 3\,500$ W

b) Como a eficiência é 300%, a potência do compressor é:

$$P_d = \frac{3\,500 \text{ W}}{3} = 1167 \text{ W}.$$

Para o ambiente externo, a potência de calor é, então, $1167 + 3\,500 = 4\,667$ W.

c) Como $\varepsilon_{\text{aquec.}} = \varepsilon_{\text{refrig.}} + 1$, temos:

$\varepsilon_{\text{aquec.}} = 300\% + 100\% = 400\%$

13 a) Falsa. No trecho *AB*, o volume aumenta e, portanto, o gás realiza trabalho. Como não há variação de energia interna (isotérmica), toda energia recebida na forma de calor é transferida ao meio na forma de trabalho.

b) Falsa. No trecho *BC*, o volume aumenta e, portanto, é uma expansão adiabática. O gás realiza trabalho e não troca calor.

c) Falsa. No trecho *CD*, o volume diminui e, portanto, é uma compressão isotérmica e o gás recebe trabalho e cede calor.

d) **Verdadeira**. No trecho *DA*, o volume diminui e, portanto, é uma compressão adiabática. O gás recebe trabalho e não troca calor.

Resposta: alternativa **d**.

14 A relação entre o calor retirado da fonte quente e o calor cedido para a fonte fria é: $\frac{100}{25} = 4$.

A relação entre a temperatura da fonte quente e a da fonte fria é: $\frac{200}{100} = 2$.

Como essas relações são diferentes, as informações não são verídicas.

15 a) O trabalho pode ser obtido considerando a área compreendida pelo ciclo, fazendo a respectiva mudança de unidades:

$$\tau = (6 - 2) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot (8 - 4) \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \Rightarrow \tau = 1\,600 \text{ J}$$

b) O gás recebe calor na transformação *DA*, isométrica, e na transformação *AB*, isobárica. Esses calores podem ser calculados por:

$Q_{DA} = n \cdot C_V \cdot \Delta_T = n \cdot \frac{3}{2} \cdot R \cdot \Delta\text{T} = \frac{3}{2} \cdot V \cdot \Delta p$, pois $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$

$$Q_{DA} = \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot (8 - 4) \cdot 10^5 \Rightarrow Q_{DA} = 1\,200 \text{ J}$$

$$Q_{AB} = n \cdot C_p \cdot \Delta T = n \cdot \frac{5}{2} \cdot R \cdot \Delta T = \frac{5}{2} \cdot p_A \cdot \Delta V \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_{AB} = \frac{5}{2} \cdot 8 \cdot 10^5 \cdot (6 - 4) \cdot 10^{-3} \Rightarrow Q_{AB} = 8\,000 \text{ J}$$

Assim, o calor total recebido é:

$Q_r = 8\,000 + 1\,200 \Rightarrow Q_r = 9\,200$ J

c) O rendimento pode ser obtido por $\eta = \frac{\tau}{Q_r}$, logo:

$$\eta = \frac{1\,600}{9\,200} \simeq 17\%$$

d) Como $p \cdot V \cdot = n \cdot R \cdot T$, em que o produto $p \cdot V$ for mínimo, temos a menor temperatura; assim a temperatura mínima do ciclo é no ponto *D*.

$$\frac{P_D \cdot V_D}{T_D} = \frac{P_B \cdot V_B}{T_B} \Rightarrow \frac{4 \cdot 2}{T_D} = \frac{8 \cdot 6}{1200} \Rightarrow T_D = 200 \text{ K}$$

A temperatura máxima é em *B*, pois nesse ponto é máximo o produto $p \cdot V$.

Um motor de Carnot que trabalhasse entre essas duas temperaturas renderia

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{200}{1200} = \frac{5}{6} \simeq 83\%$$

16 a) Primeiro vamos obter o rendimento que teria um motor de Carnot, observando que

$T_f = 127 + 273 = 400$ K e $T_q = 327 + 273 = 600$ K. Temos:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{400}{600} \Rightarrow \eta_C = \frac{1}{3} \simeq 33{,}3\%$$

Como rendimento da turbina é a metade (50%),

$$\eta_T = \frac{1}{6} \simeq 16{,}7\%$$

b) $\eta = \frac{P_u}{P_t} \Rightarrow \frac{1}{6} = \frac{60 \text{ MW}}{P_t} \Rightarrow P_t = 360$ MW

17 a) Por leitura direta no gráfico, a potência máxima é aproximadamente 55 cv, a 5 500 rpm.

b) O torque máximo é aproximadamente 13 m · kgf, a 2 200 rpm.

18 a) De acordo com gráfico, aproximadamente 670 N · m a 2 000 rpm.

b) A potência máxima (<225 kW) ocorre a 4 000 rpm, quando o torque é cerca de 530 N · m.

19 a) De acordo com a tabela fornecida, obtemos a potência por $P = M \cdot \omega = M \cdot f \cdot 0{,}105$, em que f é a frequência em rpm.

Potências e rotações por minuto de um motor de ciclo Otto

Rotação (rpm)	**Torque** (N · m)	**P** (kW)	**P** (hp)
1500	135,96	21,36	28,67
2000	146,05	30,59	41,06
2500	151,82	39,75	53,35
3000	158,41	49,76	66,80
3500	162,40	59,52	79,90
4000	164,59	68,94	92,54
4500	165,61	78,04	104,75
5000	162,17	84,91	113,97
5500	149,96	86,37	115,93
6000	128,00	80,43	107,96

Tabela elaborada para fins didáticos.

b) 4500 rpm.

c) Porque a perda relativa de torque foi maior que o ganho com o aumento de rotação.

Retomando

20 Os princípios da Termodinâmica tiveram sua gênese na Inglaterra e na Escócia, respectivamente, com Thomas Newcomen e James Watt, no século XVIII.

A máquina a vapor, criada originalmente para acionar bombas hidráulicas em minas de carvão, foi adaptada posteriormente como dispositivo propulsor de barcos a vapor (Robert Fulton, em 1807) e locomotivas a vapor (George Stephenson, em 1814.)

A primeira Revolução Industrial (séculos XVIII e XIX) foi capitaneada tecnologicamente pela máquina a vapor, provocando também profundos desdobramentos econômicos e sociais na Europa e no resto do mundo.

Resposta: alternativa **c**.

21 Para o motor proposto, a relação entre o calor absorvido pela fonte fria e o calor produzido pela fonte quente deve ser 0,15. Assim: $0{,}15 = \frac{300}{T_q} \Rightarrow T_q = 2000\,K$

Portanto, o projeto é inviável.

22 Vamos converter as temperaturas para a escala Kelvin:

$T_f = 27 + 273 = 300$ K e $T_q = 227 + 273 = 500$ K

$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_q} = 1 - \frac{300}{500} \Rightarrow \eta_{Carnot} = 40\%$

Resposta: alternativa **c**.

23 Trecho 1: Expansão isotérmica, calor e trabalho diferentes de zero e positivos.

Trecho 2: Expansão adiabática, trabalho positivo e calor nulo.

Trecho 3: Compressão isotérmica, calor e trabalho negativos.

Trecho 4: Compressão adiabática, trabalho negativo e calor nulo.

Resposta: alternativa **c**.

24 (01) Errada.

$T_f = -21 + 273 = 252$ K e $T_q = 357 + 273 = 630$ K

$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_q} = 1 - \frac{252}{630} \Rightarrow \eta_{Carnot} = 60\%$

(02) **Correta**.

Como a potência útil é 3 000 W, em um segundo a energia útil será 3 000 J.

$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{E_{útil}}{E_{total}} \Rightarrow 0{,}6 = \frac{3000}{E_{total}} \Rightarrow E_{total} = 5000\,J$

Dessa forma a energia dissipada será: $E_{dissipada} = 2000$ J.

Como temos 5 ciclos/s, em cada ciclo a energia dissipada é de 400 J, que é fornecida para a fonte fria.

(04) **Correta**.

Conforme resolução do item anterior.

(08) **Correta**.

A energia total, por ciclo, é 1000 J. Como a dissipada é 400 J, a útil por ciclo é 600 J.

(16) **Correta**.

O rendimento de Carnot pode ser escrito:

$\eta_{Carnot} = \frac{T_q - T_f}{T_q}$

Assim, se a diferença (numerador) for reduzida à metade, mas a fonte quente permanecer com a mesma temperatura, o rendimento se reduz à metade.

Resposta: Soma = 2 + 4 + 8 + 16 = 30

25 Se você tiver tempo, procure o professor de História para um trabalho conjunto sobre o desenvolvimento tecnológico, cultural e social que as máquinas a vapor trouxeram.

CAPÍTULO 5 – Fontes de energia e impactos ambientais

A abertura deste capítulo traz a reflexão para o nosso dia a dia: por que poluímos? Esse tema pode ser trabalhado de várias maneiras; sugerimos a elaboração de um texto com as respostas dos alunos e sugestões de formas para diminuir a poluição.

1. A energia que provém do Sol

Apresentamos aqui a suprema fonte de energia para o nosso planeta – a estrela Sol.

O valor de 1400 W/m² é a intensidade que chega às altas camadas da atmosfera de nosso planeta, mas a insolação local varia de região para região, como expõe o texto, e também com o tempo (ao longo do dia e conforme a época do ano).

Destacamos algumas formas para aproveitamento da energia solar:

- aquecimento da água, no lugar dos chuveiros elétricos, grandes consumidores de energia elétrica;
- evaporação da água na secagem de roupas, grãos, etc.;
- na cultura de vegetais, transformando-a em energia química pela fotossíntese, para posterior produção de combustível, como o etanol, por exemplo;
- conversão direta em energia elétrica por meio de grandes placas coletoras com células fotovoltaicas;
- indiretamente, pela água evaporada que retorna ao solo e é armazenada em represas nas hidrelétricas.

Trabalho em equipe

1. De acordo com o gráfico, a menor insolação ocorre no mês 6 (junho). A causa é a inclinação dos raios solares, mais expressiva no inverno.

2. Para obter a intensidade da radiação em W/m^2, devemos dividir o valor apontado no gráfico pelo intervalo de tempo em que a energia foi acumulada, isto é: $R = \frac{\Delta E}{\Delta t}$. Pelo gráfico, a energia acumulada ao longo de um dia ao final do mês 12 é cerca de 23 MJ, e como 1 h = 3 600 s, temos:

   $$R = \frac{23 \cdot 10^6}{10 \cdot 3\,600} \Rightarrow R \simeq 640 \frac{W}{m^2}$$

3. O percentual é obtido fazendo-se:

   $$p = \frac{640}{1400} \cdot 100\% \Rightarrow p \simeq 46\%.$$

   Essa perda ocorre porque parte da energia solar que chega ao nosso planeta é refletida e parte é absorvida na própria atmosfera.

Aquecedor solar

Neste ponto, é interessante relembrar as formas de transmissão da energia térmica, discutidas no capítulo 1 deste volume, e o efeito estufa, devido às placas de vidro.

Sugerimos que você comente também a circulação automática, por convecção, chamada comercialmente de sifão térmico.

Apresentamos a modalidade de aquecimento parabólico pelo fato de ter utilização mais restrita: situações em que se desejam altas temperaturas em uma pequena região.

Para refletir

Usando-se o aquecedor solar poupamos energia elétrica nos chuveiros. O uso das garrafas PET contribui para a redução da quantidade de lixo.

Células fotovoltaicas

Optamos por discutir mais detalhadamente os diodos, embora, provavelmente, os alunos ainda não tenham estudado eletricidade. Pela maneira que o assunto está exposto, eles vão entender a ideia de todo o processo.

No próprio livro, apontamos que o altíssimo grau de pureza do silício e a exata quantidade de dopagem exigem ambientes hermeticamente fechados, pois algumas partículas de poeira podem comprometer a produção de um dia inteiro. Inicialmente de custo quase proibitivo para uso comercial em larga escala, a produção de células fotovoltaicas vem dobrando a cada dois anos, desde 2002.

Com o aumento de escala, certamente teremos uma redução no custo desse tipo de captação de energia solar. É uma boa perspectiva futura, principalmente em países como o nosso, cuja insolação é intensa em praticamente todo o território em qualquer época do ano.

Discutimos em seguida o relativamente alto rendimento das células fotovoltaicas hoje em dia e as aplicações que têm na tecnologia espacial.

2. Combustíveis fósseis

Pelo teorema de Carnot sabemos que quanto maior for a temperatura da fonte quente, maior será o rendimento do motor térmico. A queima de derivados de petróleo possibilita temperaturas muito mais altas do que as das máquinas a vapor. Os motores ficaram menores e mais eficientes e, finalmente, tivemos o advento do automóvel: o mais voraz dos consumidores de combustíveis fósseis.

Aproveitamos para discutir outras formas de combustíveis fósseis, como o carvão mineral e o gás natural.

Procuramos também mostrar a importância dos combustíveis, desde a geração de energia, na produção de cimento, na siderurgia, até a produção de seus resíduos (piche) na pavimentação.

Física tem História

Comentamos a importância dos combustíveis fósseis, sua exploração e a relação com a emissão de dióxido de carbono na atmosfera ao longo dos anos. Apresentamos um gráfico que mostra a emissão de dióxido de carbono de origem fóssil em função dos anos.

Pela análise do gráfico, entre 1800 e 1850, a emissão de dióxido de carbono foi muito pequena. Entre 1850 e 1900, a emissão cresceu devido à primeira Revolução Industrial. Entre 1900 e 1950, a emissão de dióxido de carbono continuou a aumentar bastante, consequência do motor a combustão. De 1950 até 2000 notamos um crescimento ainda maior na emissão de CO_2, pois a sociedade passou a ser bastante dependente de combustíveis fósseis.

Consumo e reservas

Comentamos o processo de formação do petróleo a partir da matéria orgânica, o fluxo de produção e as estimativas de seu esgotamento. Essa é uma preocupação recorrente quanto aos combustíveis fósseis.

Apontamos a recente descoberta de jazidas no pré-sal. Você pode fazer uma conta rápida com os alunos: as estimativas de reservas nesse novo campo correspondem a praticamente 2% das reservas mundiais atualmente conhecidas, o que não é pouca coisa. O calor de combustão já foi discutido na calorimetria (capítulo 2) e o retomamos aqui, com o intuito de comparar os vários tipos de combustível.

3. Biocombustíveis

Começamos comentando que hoje o termo biocombustível remete, na maioria das vezes, a combustíveis obtidos de vegetais, como milho, cana-de-açúcar e mamona. Comece comentando a grande vantagem dos biocombustíveis: são renováveis.

Etanol

É possível fazer um trabalho interdisciplinar com Biologia, Geografia e Química. O que é fermentação? Qual é a área agricultável de que dispomos? Como ocorre a destilação? Todos esses fatores estão relacionados à produção do etanol.

Apontamos dados do IBGE sobre a produtividade da cana-de-açúcar e a sequência de processos para a obtenção desse combustível. O texto a seguir, publicado na *Folha de S.Paulo* em 20 de setembro de 2009, pode ser utilizado para discussão, comparação de eficiência desse combustível com os demais e perspectivas futuras.

A força de nosso etanol

O etanol, combustível brasileiro, é motivo de orgulho para o País. Mesmo em meio à crise mundial, nossa produção não recuou: as vendas no mercado interno passaram de 9,101 bilhões nos primeiros 6 meses de 2008 para 10,713 bilhões no mesmo período de 2009, um salto de 17,7%.

Tal vigor se deve a vários fatores, dos quais o mais importante são as décadas de esforço e talento de brasileiros investidos nessa área. Nosso etanol é um combustível de alto desempenho e viável econômica, ambiental e socialmente. Não precisa de subsídios, e sua produção vem sendo aperfeiçoada por empresas e pesquisadores de nosso país, nos diversos elos de sua cadeia produtiva.

Seus competidores são os hidrocarbonetos e outros biocombustíveis, como o feito a partir do milho nos EUA. Tem vantagens sobre ambos e poderia se expandir pelo mundo não fossem as barreiras comerciais.

O etanol de cana é sustentável por definição. O CO_2 emitido pelo uso do combustível renovável no motor de um carro já foi compensado pela quantidade do mesmo gás absorvida pela planta durante seu crescimento. E é uma das energias renováveis que menos demanda a utilização de energia fóssil para sua produção.

A emissão de CO_2 pelo etanol de cana é 89% menor que a da gasolina, ao passo que no caso do etanol de beterraba, usado em alguns países europeus, tal redução é de 46%, e no de milho, de apenas 31%. O etanol de milho americano é totalmente dependente de subsídio público e, ao taxar a importação do etanol brasileiro, os Estados Unidos prejudicam simultaneamente nossa economia, sua própria economia e o combate à crise climática global.

Vez por outra acusam o Brasil de tratar mal os trabalhadores do setor. Alguns países usam tal pretexto para impedir a venda de nosso etanol lá fora. Mas as condições nos canaviais, que de fato já foram ruins, mudaram.

Hoje, os contratos de trabalho incluem transporte, saúde, alojamentos, alimentação, equipamentos de proteção individual e até mesmo a requalificação, pois a mecanização do plantio e do corte da cana avança e acabará por modernizar radicalmente o trabalho na área. Adicionalmente, via cogeração, nossas usinas produzem energia elétrica tão limpa como a de origem hídrica e tende a crescer a produção dos chamados plásticos verdes, cuja matéria-prima, o etanol, substitui a nafta e o gás natural.

Cedo ou tarde, os biocombustíveis ocuparão o lugar dos hidrocarbonetos como locomotivas da economia mundial. Quando esse dia chegar, estaremos prontos para ocupar o lugar que nos cabe.

Fonte: ODEBRECHT, Emílio. *Folha de S.Paulo*. Disponível em: <www1.folha.uol.com.br/fsp/opiniao/fz2009200906.htm>. Acesso em: abr. 2016.

Biodiesel

A obtenção de óleo a partir de vegetais é um processo conhecido há milênios. Basta dar como exemplo o azeite de oliva, citado desde a Grécia antiga. Em geral, esses óleos são pouco voláteis, o que permite que sejam usados em motores com altas taxas de compressão (e, portanto, maior rendimento), que é o caso do ciclo *Diesel*.

Começamos então relembrando essa vantagem dos motores *diesel* e a razão pela qual se utilizam processos químicos para transformar metanol em óleo para o ciclo *Diesel*. Esse é um processo muito usado na União Europeia, onde praticamente metade dos automóveis utiliza esse ciclo.

Citamos os vários vegetais que, no Brasil, têm sido utilizados na produção do *biodiesel* e terminamos salientando que o *biodiesel* não é de fato uma novidade, pois o primeiro motor, apresentado por Rudolf Diesel no fim do século XIX, era movido a óleo de amendoim. Naquele tempo o petróleo era muito caro.

Outro assunto que pode ser explorado ainda no item **Biocombustíveis** é o biogás. Os biodigestores são uma boa alternativa para reciclagem de lixo orgânico, ao mesmo tempo em que neles podemos obter energia pelo biogás. Promova uma pesquisa sobre um modelo de biodigestor e como pode ser utilizado em pequenas propriedades rurais.

Física explica

A proposta desse texto é mostrar como a ciência busca e pode prover alternativas para as demandas futuras de energia, imitando o processo de produção de energia de nossa estrela Sol. Explique que existem e já foram testadas bombas nucleares de fusão, mas que esses processos são fontes de energia fora de controle, nocivas, bélicas, e que demandam uma bomba nuclear para ativação das altas temperaturas que irão prover a fusão. A seguir, as respostas para as atividades da seção.

a) Comparando-se as duas instalações, temos:

$$A_{\text{Itaipu}} = \frac{12\,000 \text{ MW}}{135\,000 \text{ hectare}} = 0{,}089 \frac{\text{MW}}{\text{hectare}}$$

$$A_{\text{ITER}} = \frac{500 \text{ MW}}{150 \text{ hectare}} = 2{,}778 \frac{\text{MW}}{\text{hectare}}$$

Assim, $\frac{A_{\text{ITER}}}{A_{\text{Itaipu}}} = \frac{2{,}778}{0{,}089} \simeq 31$. O aproveitamento do ITER, em termos de área, é cerca de 31 vezes melhor do que o de Itaipu.

b) Por ser um gás neutro, pouco reativo e não inflamável, existem várias utilizações do gás hélio, desde o enchimento de balões de festa, equipamentos de ressonância magnética, produção de *chips* de computador e equipamentos de mergulho. Sua obtenção é feita, principalmente, a partir do gás natural.

4. Fontes alternativas de energia

Iniciamos o tópico enfatizando que o consumo de combustíveis fósseis, de certa forma, é o gasto rápido de uma poupança acumulada por centenas de milhões de anos que, em um intervalo de tempo relativamente curto, se esgotará. Consideramos oportuna a apresentação da analogia financeira, por tornar mais acessível o comentário inicial.

Embora, percentualmente, as fontes alternativas de energia tenham ainda uma participação muito pequena, sua utilização vem crescendo ano a ano.

Neste item, tratamos da energia eólica. Mostramos os modernos rotores (os novos cata-ventos) e exemplificamos como em alguns países, como a Alemanha, por exemplo, essa forma de aproveitamento de energia já tem grande participação na produção total. Comentamos a desvantagem – os períodos de calmaria – e como pode ser minimizada.

Há outros dois tipos de fontes alternativas de energia que podem se trabalhados em sala de aula: a energia das marés e a energia geotérmica. Sugere-se que você promova uma pesquisa

sobre as vantagens e desvantagens dessas fontes alternativas de energia.

A energia das marés é proveniente de geradores flutuantes que aproveitam a energia das ondas do mar. Leia mais sobre isso no *site* (em inglês) da Universidade do Oregon. Disponível em: <http://eecs.oregonstate.edu/wesrf/>. Acesso em: abr. 2016.

A energia geotérmica é oriunda do calor proveniente do interior da Terra. A temperatura do solo vai aumentando com a profundidade (cerca 0,03 °C/m) e isso pode ser aproveitado como fonte térmica. Esse gradiente de temperatura por si só não se mostra muito aproveitável, pois, para conseguirmos um aumento de temperatura de 30 °C, precisaríamos de um poço de 1 km, que seria muito dispendioso. Você pode fazer essa conta com os alunos.

Ocorre que, em alguns locais, águas vulcânicas das profundezas emergem à superfície e a energia pode ser aproveitada sem necessidade de perfuração de poços.

Outra situação em que é viável esse aproveitamento é nos países com inverno muito rigoroso. O subsolo, tendo a neve como cobertura isolante, tem temperatura bem maior que a ambiente, e essa diferença pode ser explorada. Pesquise com os alunos o nível de produção geotérmica de vários países.

5. Impactos ambientais

Escolhemos, para o texto inicial deste tópico, palavras do astrofísico, escritor e divulgador científico Carl Sagan. Sugerimos que você recomende aos alunos uma leitura atenta dessa parte inicial. Destaque o parágrafo final.

Os estudos científicos do meio ambiente seguem como alerta, mas ao mesmo tempo, ao identificar as causas de mudanças ambientais, também apontam as correções de rota que devem ser feitas.

Um dos principais objetivos deste tópico é mostrar como a Ciência, irmanada com as preocupações sociais e humanitárias, pode nos auxiliar na resolução dos problemas ambientais. Isto não está escrito explicitamente no livro do aluno. Deixamos essa tarefa para você.

Neste capítulo, em especial, apresentamos ao final dos comentários uma proposta interdisciplinar com um artigo científico, da forma como foi publicado na revista *Science*, em fevereiro de 2009, abordando o papel do vapor de água no efeito estufa, considerando os *feedbacks* positivo e negativo. Essa é uma sugestão para ser trabalhada em conjunto com o professor de Inglês, para que os alunos vejam o que é uma publicação científica, como se sustenta em referências, e de que modo é escrita.

O que mantém o planeta habitável

Iniciamos discutindo a temperatura de nosso planeta e destacando a importância da atmosfera em seu controle.

Descrevemos a atmosfera, sua composição e as variações de pressão e temperatura conforme se varia a altitude, com gráficos ilustrativos.

A seguir, explicamos a importância do efeito estufa, que permite temperaturas médias maiores para a Terra, pois alguns gases retêm a radiação que se perderia para o espaço. A partir desse ponto, explicamos por que esses gases retêm a saída da energia térmica, mas não retêm a entrada: porque a maior parte da energia térmica entra na faixa de comprimentos de onda pequenos e a retenção ocorre para comprimentos de onda bem maiores (infravermelho). Em suma, pelo fato de a emissividade (ε) não ser constante para todas as faixas de comprimento de onda.

Acompanhe com os alunos o gráfico. Destaque a diferença entre a radiação recebida na alta atmosfera e a que chega ao nível do mar. Aproveite para destacar a importância do O_3, que absorve boa parte da radiação ultravioleta.

Comportamento da temperatura prevista (sem o efeito estufa), em função do albedo

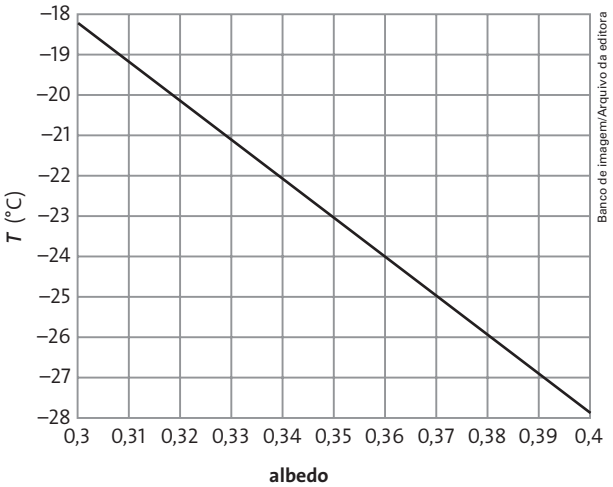


Gráfico elaborado para fins didáticos.

Como comentado na introdução, na atividade adicional, incluímos um artigo científico que trata exatamente da questão do *feedback* do vapor de água, com análise da parte negativa (bloqueio da radiação que entra) e da positiva (bloqueio da radiação que sai, o que aumenta a quantidade de vapor).

Física tem História

Comentamos um aspecto histórico na descoberta do efeito estufa e aproveitamos para apresentar um diagrama, com os percentuais de radiação absorvidos e refletidos.

Efeito estufa e aquecimento global

Onde procurar dados confiáveis sobre as questões climáticas e perspectivas para o futuro?

Existe uma infinidade de publicações, muitas sem respaldo científico e frequentemente alarmistas. Certamente essas não são boas fontes.

Comente com os alunos que, em português, temos o *site* do Ministério do Meio Ambiente, com muitas informações locais e algumas internacionais também. Disponível em: <www.mma.gov.br/>. Acesso em: abr. 2016.

Para uma pesquisa mais completa e global, há um importante órgão internacional, composto de cientistas de todo o mundo que se dedicam à pesquisa e ao monitoramento das mudanças climáticas em nosso planeta, denominado IPCC, International Panel on Climate Change (Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas), estabelecido pelas Nações Unidas e pela Organização Meteorológica Mundial em 1988, laureado com o prêmio Nobel da Paz em 2007. *Site* em inglês disponível em: <http://www.ipcc.ch/>. Acesso em: abr. 2016.

Boa parte das informações necessárias à apresentação deste capítulo foi obtida nesta fonte.

Em seguida, explicamos como os cientistas trabalham com cenários em suas perspectivas para o futuro, com dados de outro órgão de prestígio internacional, o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers – Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica) e também como esses cientistas podem obter dados sobre a composição da atmosfera da Terra em um passado remoto.

Nível do mar

É hora de lembrar um pouco as aulas de hidrostática. A constância do nível de água em um recipiente que tem gelo flutuante derretendo pode ser mostrada em sala de aula. Comece a aula colocando duas pedras de gelo em um recipiente. Em seguida, preencha-o com água até quase transbordar. Prossiga com a aula e deixe o gelo derretendo. Ao final da aula, o copo estará quase transbordando, como no começo, mas sem derramar uma gota sequer. Esse experimento é importante para mostrar como, sem conhecimentos básicos de Física, muita bobagem pode ser dita a respeito do nível dos oceanos.

Relembre agora o fenômeno da dilatação térmica.

Em seguida, apresente as perspectivas futuras para o nível dos oceanos considerando o cenário médio GT1 do IPCC, descrito na figura 5.27 do capítulo. Leia com os alunos o comentário no parágrafo final.

Para refletir

O derretimento do gelo flutuante (calotas polares) contribuiria significativamente para a elevação do nível dos oceanos. Os fatores mais relevantes para a elevação seriam o derretimento do gelo das cordilheiras e da Groenlândia, além da dilatação térmica da água.

6. A camada de ozônio

É comum a ideia de que a camada de ozônio é uma fina película em nossa atmosfera. Começamos esclarecendo esse mal-entendido com as concentrações de O_3 em ppm (partes por milhão) ao longo da atmosfera.

A seguir, apresentamos a escala Dobson, para medidas de concentração de ozônio, e o pioneirismo do cientista que deu nome a essa escala.

Mostramos também como fatores antropogênicos, principalmente os CFC, podem interromper o ciclo do O_3. Este tópico pode ser tema de um trabalho interdisciplinar com Química e Biologia.

7. Poluição

Este item visa apresentar o que se entende por poluição, suas causas e os principais poluentes. É relativamente consensual que as principais causas de poluição, como apontado pelo Ministério do Meio Ambiente, são:

- rápido crescimento populacional, industrial e econômico;
- concentração populacional e industrial;
- hábitos da população.

Poluição atmosférica

Como descrito no livro, a poluição atmosférica se refere ao lançamento de substâncias no ar que podem trazer efeitos nocivos à saúde humana e danos aos recursos naturais, seres vivos e ecossistemas.

Apresentamos os principais poluentes, com destaque para a combustão dos hidrocarbonetos. É uma boa hora para relembrar os estudos da Termodinâmica. O motor ideal (de Carnot) levaria um tempo infinito para desenvolver um ciclo, ou seja, teria potência nula. À medida que queremos mais potência, vamos abrindo mão do rendimento. Nesse ponto, é importante a regulamentação de órgãos governamentais.

Principais poluentes atmosféricos

Aqui, comentamos os padrões adotados para avaliar a qualidade do ar, de acordo com a resolução do Conama, de 1990, e os principais poluentes. Sugerimos um **Trabalho em equipe** sobre alguns poluentes. A participação do professor de Química pode ser de grande ajuda.

Física explica

Continuamos o tópico com o texto dessa seção, sobre a qualidade do ar, que pode ser trabalhado como uma atividade. Ao final da leitura do texto, apresente aos alunos as questões a seguir.

- As medidas de concentração de poluentes em determinado local apresentam os valores da tabela:

Concentração de poluentes

MP_{10} ($\mu g/m^3$)	O_3 ($\mu g/m^3$)	CO (ppm)	NO_2 ($\mu g/m^3$)	SO_2 ($\mu g/m^3$)
350	100	2	55	35

Tabela elaborada para fins didáticos.

a) Com base nos critérios da Cetesb, como seria classificada a qualidade do ar nesse local?

De acordo com os critérios da Cetesb, para os poluentes MP_{10}, O_3, CO, NO_2, e SO_2, as qualidades são péssima, má, inadequada, regular e boa, respectivamente. Como a qualidade é determinada pelo pior índice, ela é **péssima**.

b) Qual seria a faixa de concentração de monóxido de carbono para que o índice de qualidade do ar fosse considerado péssimo?

Maior do que 30 ppm.

c) Pesquise sobre quais são as complicações descritas para o ser humano decorrentes da baixa umidade do ar e que precauções devemos tomar.

Complicações respiratórias devido ao ressecamento das mucosas, o que provoca sangramento pelo nariz, ressecamento da pele e irritação dos olhos. As precauções, se a umidade relativa for menor do que 12%, são: determinar a suspensão de atividades que exijam aglomerações de pessoas em recintos fechados; manter umidificados os ambientes internos, principalmente quartos de crianças, hospitais, etc. Além dessas medidas, é recomendável usar colírio de soro fisiológico ou água boricada para os olhos e narinas e beber muita água.

Inversão térmica

Voltamos a discutir o fenômeno da inversão térmica, já comentado no capítulo 1, mas agora com mais detalhes, além de seu impacto na dispersão dos poluentes.

Poluição das águas e dos solos

Os poluentes não são só lançados na atmosfera. Há resíduos industriais que vão para as águas e o solo. Tratamos aqui brevemente o assunto que, normalmente, é explorado com mais profundidade na Biologia.

8. Biocombustíveis e usinas nucleares

Como descrito no livro, juntamos os biocombustíveis e as usinas nucleares na mesma seção, pois ambos os processos de produção de energia são alternativas para reduzir o efeito estufa.

Biocombustíveis

Iniciamos com a pergunta: Seria possível captar o CO_2 do ar, emitido pela queima de um combustível, e transformá-lo novamente em combustível, utilizando somente energia solar?

E a respondemos descrevendo sucintamente o processo de fotossíntese. Os estudantes verão, ou já viram, em detalhes o assunto em Biologia.

Apontamos então três fatores altamente positivos dos biocombustíveis:

- redução de vapor de água, que contribui para o efeito estufa;
- redução do gás estufa dióxido de carbono;
- produção de O_2.

Em seguida, citamos uma das críticas sobre os biocombustíveis: o fato de ocuparem áreas anteriormente destinadas à agricultura alimentar, com consequente elevação do preço dos alimentos. Esclarecemos que isso, no máximo, é parcialmente verdadeiro.

Usinas nucleares

Começamos esclarecendo que as usinas de fissão nuclear não produzem CO_2, CO, óxidos nitrosos nem fuligem de carbono.

Apresentamos o grave problema do lixo radioativo e algumas alternativas para reduzi-lo, como é feito na França.

Defender a energia nuclear é uma postura que poucos teriam coragem de assumir. Mas o fato é que, em relação às usinas termoelétricas, que despejam milhões de toneladas de poluentes e gases estufa na atmosfera, elas são muito mais limpas. A nosso ver, a questão deve ser tratada principalmente sob o aspecto científico, com o controle civil dessas atividades.

Em 2007, dois cientistas norte-americanos, Alan Herbst e George Hopley, publicaram um profundo estudo da matriz energética atual, em um livro intitulado *Nuclear Energy Now*. Em sua capa, eles apontam: Por que chegou a era da mais mal compreendida fonte de energia do mundo?

O livro destaca que o problema, em vez de ser analisado cientificamente, é tratado sempre sob o aspecto emotivo. Destaca também como o governo francês conseguiu o apoio da população para esse tipo de energia, com a campanha: "Nós não temos petróleo, nós não temos carvão, mas temos ideias". Vale a pena ser lido.

A página da Nuclebrás na internet aponta que a radiação que recebe uma residência a 100 m da Usina de Angra é menor do que uma pessoa recebe a 2 m de sua televisão. Disponível em: <www.nuclep.gov.br/>. Acesso em: abr. 2016.

Ao final, indicamos uma esperança para o futuro, os reatores a fusão, com o projeto ITER, já citado no capítulo anterior.

O mundo sustentável

Ressaltamos aqui as ações básicas propostas pelo protocolo de Kyoto:

- reformar os setores de energia e transportes;
- promover o uso de fontes energéticas renováveis;
- limitar as emissões de metano no processamento de resíduos;
- proteger florestas e outros absorvedores de carbono.

Não somente as fontes de energia são limitadas. As reservas de alumínio, ferro, cobre, enfim, a mineração em geral, tudo isso é esgotável. Apresentamos o texto do jornalista ambiental André Trigueiro, autor do livro *Mundo sustentável*, no qual ele destaca os três Rs:

- reduzir;
- reutilizar;
- reciclar.

A meta é atingir um equilíbrio dinâmico em nosso planeta, no qual as gerações futuras tenham à disposição o que temos hoje, ou quem sabe mais, pois há ainda muita exclusão. Do que precisamos? Água, clima habitável, energia, alimentação, transportes, moradia, educação e qualidade de vida.

Em construção

Terminamos o tópico com a biografia do grande físico Hans Beth, que se destacou pelo trabalho com energia nuclear e os mecanismos que explicam a produção de energia no interior de estrelas. A seguir sugerimos uma pesquisa sobre o processo de fusão de hidrogênio que ocorre no interior do Sol. Tal pesquisa pode ser usada como método de avaliação. Podem ser utilizados trabalhos escritos.

Um *site* que pode servir como fonte, mantido por professores da UFRGS, é: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node10.htm>. Acesso em: abr. 2016.

Aconselhamos que você não indique esse *site* para os alunos, mas apenas se baseie nele, pois o conteúdo é de complexidade acima da exigida para alunos do Ensino Médio.

Atividade complementar

Um artigo científico

Sugerimos ao professor uma atividade sobre o artigo a seguir, juntamente com os professores de Física, de Biologia, de Inglês e de Química. Ao final do artigo, uma atividade sugerida para os alunos é montar um pequeno artigo científico baseado no artigo abaixo. O artigo deverá conter uma pequena introdução, texto argumentativo e uma conclusão. Isso irá estimular os alunos a pesquisar e a basear suas conclusões em dados.

A Matter of Humidity

Andrew E. Dessler[1] and Steven C. Sherwood[2]

The water vapor feedback is the process whereby an initial warming of the planet, caused, for example, by an increase in atmospheric carbon dioxide, leads to an increase in the humidity

of the atmosphere. Because water vapor is itself a greenhouse gas, this increase in humidity causes additional warming. The water vapor feedback has long been expected to strongly amplify climate changes because of the expectation that the atmosphere's relative humidity would remain roughly constant—meaning that the specific humidity would increase at the rate of the equilibrium vapor pressure, which rises rapidly with temperature. However, observational evidence has been harder to come by, and the effect has been controversial. Much of that controversy can now be laid to rest, thanks to new observations and better theoretical understanding.

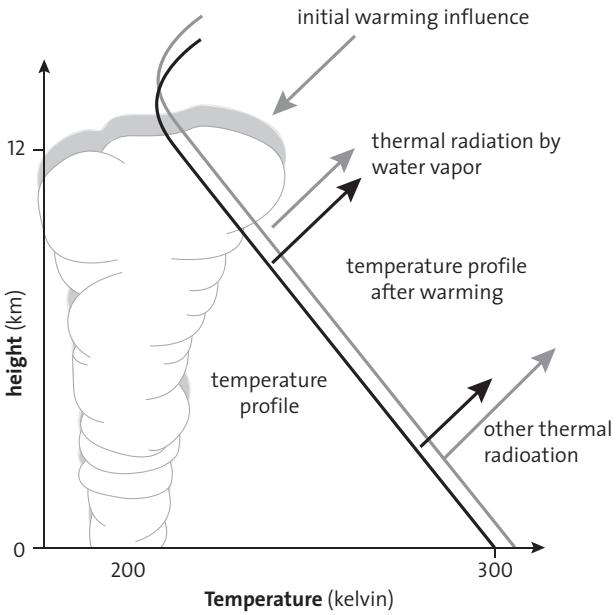
In the 1990s, there was little observational or theoretical understanding of atmospheric humidity and how it varied with global climate. As a result, debate raged over whether the water vapor feedback would really occur, with some very influential proposals that it would not (1). In particular, many believed that atmospheric humidity and the water vapor feedback were controlled by processes—such as the details of cloud dynamics and microphysical processes—that are not sufficiently well understood and inadequately represented in climate models.

Successive reports from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) have suggested increasing confidence in our understanding of the water vapor feedback, but they have remained cautious in defending its magnitude. However, recent advances have placed the traditional view of the water vapor feedback on a stronger footing than is widely appreciated.

The water vapor feedback mainly results from changes in humidity in the tropical upper troposphere (2), where temperatures are far below that of the surface and the vapor is above most of the cloud cover. The distribution of humidity in this region is well reproduced by "large-scale control" models, in which air leaves stormy regions in a saturated condition, but with negligible ice or liquid content. Water vapor is thereafter transported by the large-scale circulation, which conserves the specific humidity (the ratio of the mass of water vapor to the total mass in a unit volume of air), except during subsequent saturation events, when loss of water occurs instantaneously to prevent supersaturation. Despite the simplicity of this idea, which entirely neglects detailed microphysics and other small-scale processes, such models accurately reproduce the observed water vapor distribution for the mid and upper troposphere (3, 4). One recent study (5) estimated the uncertainty in the water vapor feedback associated with microscale process behavior at less than 5%, as a result of the overwhelming control of humidity by the large-scale wind field.

Thus, the water vapor feedback is essentially controlled by the large-scale dynamics and the saturation specific humidity in the outflow of the tropical deep convective systems. Convective outflow temperature should, on average, warm along with the mean atmosphere, thus producing the feedback (6, 7).

Given these considerations, there are good reasons to expect global climate models to accurately simulate the water vapor feedback: The large-scale wind and temperature fields that mainly control the humidity are explicitly calculated from the basic fluid equations, unlike small-scale processes that must be represented by crude parameterizations.



Banco de imagem/Arquivo da editora

Schematic of the water vapor feedback.
Because thermal emission to space by water vapor does not increase, more warming is needed to balance a given energy input.

Although the water vapor feedback is strong in all global climate models, its magnitude varies somewhat due to differences among the models in the amount of upper tropospheric warming (and hence the increase in specific humidity) per unit of surface warming. The spread among models in the water vapor feedback is, however, largely compensated by an opposite spread in the "lapse-rate feedback," a negative feedback that occurs because a warmer atmosphere radiates more power to space, thereby reducing net surface warming. As a result, the sum of the two feedbacks is insensitive to errors in predicted warming of the upper troposphere, and to quantify the sum accurately, one only needs to know how relative humidity (the ratio of specific humidity to that in a saturated condition) changes as the climate warms. The sum of the feedbacks is also smaller than the water vapor feedback—about half the magnitude—and more consistent among climate models (8), because no model predicts substantial and systematic changes in relative humidity.

Despite these advances, observational evidence is crucial to determine whether models really capture the important aspects of the water vapor feedback. Such evidence is now available from satellite observations of the response of atmospheric humidity (and its impacts on planetary radiation) to a number of climate variations. Observations during the seasonal cycle, the El Niño cycle, the sudden cooling after the 1991 eruption of Mount Pinatubo, and the gradual warming over recent decades all show atmospheric humidity changing in ways consistent with those predicted by global climate models, implying a strong and positive water vapor feedback (9-13). A strong and positive water vapor feedback is also necessary for models to explain the magnitude of past natural climate variations (14).

Both observations and models suggest that the magnitude of the water vapor feedback is similar to that obtained if the atmosphere held relative humidity constant everywhere. This should not be taken to mean that relative humidity will remain exactly the same everywhere. Regional variations of relative

humidity are seen in all observed climate variations and in model simulations of future climate, but have a negligible net impact on the global feedback (15).

Thus, although there continues to be some uncertainty about its exact magnitude, the water vapor feedback is virtually certain to be strongly positive, with most evidence supporting a magnitude of 1,5 to 2,0 W/m²/K, sufficient to roughly double the warming that would otherwise occur. To date, observational records are too short to pin down the exact size of the water vapor feedback in response to long-term warming from anthropogenic greenhouse gases. However, it seems unlikely that the water vapor feedback in response to long-term warming would behave differently from that observed in response to shorter-time scale climate variations. There remain many uncertainties in our simulations of the climate, but evidence for the water vapor feedback—and the large future climate warming it implies—is now strong.

1. R. S. Lindzen, Bull. Am. Meteor. Soc. **71**, 288 (1990).

2. I. M. Held, B. J. Soden, Ann. Rev. Energy Environ. **25**, 441 (2000).

3. R. T. Pierrehumbert, H. Brogniez, R. Roca, in The Global Circulation of the Atmosphere, T. Schneider, A. H. Sobel, Eds. Princeton Univ. Press, Princeton (2007), pp. 143-218.

4. I. Folkins, K. K. Kelly, E. M. Weinstock, J. Geophys. Res. **107**, 4736 (2002).

5. S. C. Sherwood, C. L. Meyer, J. Climate **19**, 6278 (2006).

6. D. L. Hartmann, K. Larson, Geophys. Res. Lett. **29**, 1951 (2002).

7. K. Minschwaner, A. E. Dessler, J. Climate **17**, 1272 (2004).

8. B. J. Soden, I. M. Held, J. Climate **19**, 3354 (2006).

9. B. J. Soden, R. T. Wetherald, G. L. Stenchikov, A. Robok, Science **296**, 727 (2002).

10. P. M. D. Forster, M. Collins, Climate Dyn. **23**, 207 (2004).

11. B. J. Soden, D. L. Jackson, V. Ramaswamy, M. D. Schwarzkopf, X. Huang, Science **310**, 841 (2005).

12. A. E. Dessler, P. Yang, Z. Zhang, Geophys. Res. Lett. **35**, L20 704 (2008).

13. A. K. Inamdar, V. Ramanathan, J. Geophys. Res. **103**, 32177 (1998).

14. A. Hall, S. Manabe, J. Climate **12**, 2327 (1999).

15. We thank T. Schneider, P. O'Gorman, and P. Forster for their comments on this perspective. This work was supported by NASA grant NNX08AR27G to Texas A&M University.

10.1126/science.1171264

[1]Texas A&M University, College Station, TX 77 843, USA. E-mail: adessler@tamu.edu

[2]Climate Change Research Centre, University of New South Wales, Sydney, Australia. E-mail: s.sherwood@unsw.edu.au

Science 20 February 2 009: Vol. 323. no. 5 917, pp. 1020-1021
DOI: 10.1126/science.1171264

A seguir apresentamos o texto traduzido pelo autor.

Uma questão de umidade

Andrew E. Dessler e Steven C. Sherwood

Retroalimentação do vapor de água é o processo pelo qual um aquecimento inicial do planeta, causado, por exemplo, por um aumento no dióxido de carbono da atmosfera, leva a um aumento na umidade da atmosfera. Por que o vapor de água é por si só um gás de efeito estufa, esse aumento de umidade causa aquecimento adicional. Espera-se que a retroalimentação do vapor de água amplifique fortemente as mudanças climáticas devido à expectativa de que a umidade relativa da atmosfera permaneça aproximadamente constante – significando que a umidade específica aumentaria na mesma taxa da pressão de vapor de equilíbrio, que aumenta rapidamente com a temperatura. Entretanto, evidências observacionais têm sido difíceis de obter e o efeito passou a ser considerado controverso. Boa parte dessa controvérsia pode ser posta de lado, graças a novas observações e melhor entendimento teórico.

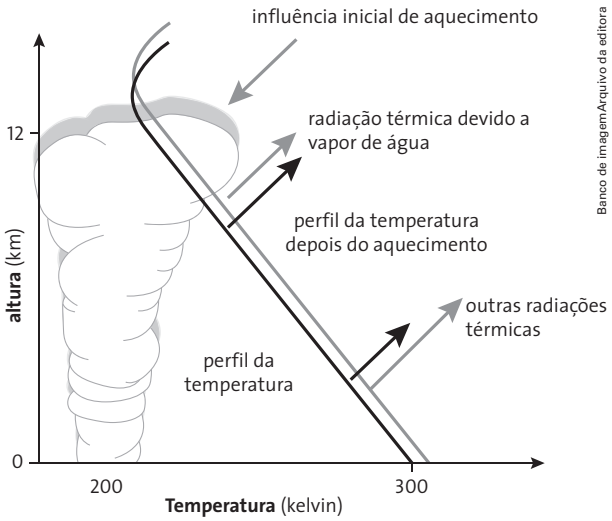
Nos anos 1990, havia pouco entendimento observacional ou teórico da umidade atmosférica e como ela varia com o clima global. Como resultado, o debate sobre se a retroalimentação do vapor de água realmente ocorreria, com várias propostas influentes de que ele não ocorreria. Particularmente, muitos acreditavam que a umidade atmosférica e a retroalimentação do vapor de água eram controlados por processos – como os detalhes sobre a dinâmica das nuvens e dos processos da física de partículas – que não são suficientemente bem entendidos e adequadamente representados nos modelos climáticos.

Relatórios sucessivos do Painel Intergovernamental de Mudança Climática (IPCC) sugeriram aumento na confiabilidade de nosso entendimento da retroalimentação de vapor de água, mas ainda são cuidadosos ao defender sua magnitude. Entretanto, avanços recentes deram à visão tradicional da retroalimentação de vapor de água uma posição mais forte do que é a amplamente aceita.

A retroalimentação de vapor de água resulta, principalmente, de mudanças na umidade na troposfera tropical superior, onde as temperaturas são bastante inferiores às da superfície e o vapor está acima da maior parte da cobertura de nuvens. A distribuição da umidade nessa região é bem reproduzida pelos modelos de controle em grande escala, nos quais o ar deixa as regiões de tempestade em condição de saturação, mas com pouco conteúdo de gelo ou de líquido. Depois disso, o vapor de água é transportado por circulação em grande escala, que conserva a umidade específica (razão entre a massa de vapor de água e a massa total em uma unidade de volume de ar), exceto durante os eventos subsequentes de saturação, quando a perda de água ocorre instantaneamente e evita a supersaturação. Apesar da simplicidade dessa ideia, que desconsidera totalmente detalhes da física de partículas e outros processos de pequena escala, tais modelos reproduzem precisamente a distribuição observada de vapor de água para a troposfera média e superior. Um estudo recente estimou a incerteza na retroalimentação do vapor de água associada ao comportamento de processos em microescala inferior a 5%, como um resultado do incrível controle da umidade pelo campo de ventos de grande escala.

Assim, a retroalimentação de vapor de água é essencialmente controlada pela dinâmica de grande escala e pela saturação da umidade específica no fluxo de saída dos sistemas tropicais profundamente convectivos. Fluxo de saída convectivo deve, na média, esquentar ao longo da atmosfera média, e produz, assim, a retroalimentação.

Feitas essas considerações, há boas razões para esperar que modelos climáticos globais simulem com precisão a retroalimentação de vapor de água: os ventos de grande escala e os campos de temperatura que controlam, principalmente, a umidade são calculados explicitamente das equações básicas de fluidos, diferentemente dos processos de pequena escala, que podem ser representados por parâmetros simples.



Banco de imagem/Arquivo da editora

Esquema da retroalimentação do vapor de água.
Como a emissão térmica para o espaço decorrente de vapor de água não aumenta, maior aquecimento é necessário para balancear a entrada de energia.

Apesar de a retroalimentação do vapor de água ser forte em todos modelos climáticos, sua magnitude varia razoavelmente devido às diferenças entre os modelos no grau de aquecimento da troposfera superior (e portanto o aumento da umidade específica) por unidade de superfície aquecida. A variabilidade entre os modelos de retroalimentação de vapor de água é, entretanto, grandemente compensada por uma variabilidade oposta na "taxa de retroalimentação", uma retroalimentação negativa que ocorre porque a atmosfera mais quente irradia maior potência para o espaço e reduz o aquecimento total de superfície. Como resultado, a soma das duas retroalimentações não é afetada por erros na previsão do aquecimento da troposfera superior e, para fazer a soma precisamente, é preciso saber somente como a umidade relativa (razão entre a umidade específica e a umidade na condição de saturação) muda à medida que o clima aquece. A soma das retroalimentações é também menor que a retroalimentação de vapor de água – cerca de metade da magnitude – e mais consistente entre os modelos climáticos, pois nenhum modelo prediz mudanças substanciais e sistemáticas na umidade relativa.

Apesar desses avanços, evidências observacionais são cruciais para determinar se os modelos realmente captam os aspectos importantes da retroalimentação do vapor de água. Tal evidência está, agora, disponível em observações via satélite da reação da umidade atmosférica (e seus impactos na radiação planetária) para diversas variações climáticas. Observações durante um ciclo sazonal, o ciclo El Niño, o resfriamento repentino depois da erupção do vulcão Pinatubo em 1991, e o aquecimento gradual ao longo das décadas recentes mostram que a umidade atmosférica muda de acordo com o previsto pelos modelos climáticos globais, o que implica uma retroalimentação de vapor de água forte e positiva. Retroalimentação forte e positiva é também necessária para explicar as variações climáticas naturais, ocorridas no passado.

Observações e modelos sugerem que a magnitude da retroalimentação de vapor de água é similar àquela que seria obtida se a umidade relativa fosse constante em todos lugares. Isso não significa que a umidade relativa permaneça constante em toda parte. Variações regionais da umidade relativa são observadas na natureza e em simulações de clima futuro, mas têm pouco impacto na retroalimentação global.

Assim, apesar de ainda haver incerteza sobre sua magnitude exata, a retroalimentação de vapor de água é forte e positiva, e evidências indicam uma magnitude de 1,5 a 2,0 $W/m^2/K$, suficiente para praticamente dobrar o aquecimento que ocorreria de outra forma. Para finalizar, os registros observacionais são ainda escassos para que se possa estimar o exato valor da retroalimentação de vapor de água, reação prolongada em consequência de gases de efeito estufa, por ação antropocêntrica. Entretanto, parece que a retroalimentação de vapor de água deve ter comportamentos diferentes como reações a variações climáticas verificadas em períodos mais curtos. Há, ainda, muitas incertezas em nossas simulações climáticas, mas agora há forte evidências da influência da retroalimentação de vapor de água no aquecimento global.

Resolução dos exercícios

1 A superfície absorve 50%, mas devolve para a atmosfera 14% (que ficam retidos por efeito estufa), 6% na convecção e 24% pela formação de vapor de água, o que totaliza 44%.

Sem contar o efeito estufa, teríamos 30%, que é mais da metade.

Resposta: alternativa **d**.

2 I. **Falsa.** É comum o uso de reservatório metálico, mas com uma camada isolante, para reter a energia térmica da água aquecida.

II. **Verdadeira.** Essa é a função do vidro.

III. **Verdadeira.**

Resposta: alternativa **e**.

3 a) Como a densidade da gasolina é 0,7 g/cm^3, 1 litro de gasolina (1 000 cm^3) tem 700 g.

O calor de combustão apresentado na tabela é 47,3 kJ/g, logo, a energia despendida será:

$$\Delta E = 47{,}3\ \frac{kJ}{g} \cdot 700\ g \Rightarrow \Delta E = 33{,}11 \cdot 10^6\ J \simeq 3{,}3 \cdot 10^7\ J$$

b) Para obtermos a massa de álcool (em gramas) necessária para gerar a mesma quantidade de energia, escrevemos:

$$m = \frac{33{,}11 \cdot 10^6}{29{,}7 \cdot 10^3} \Rightarrow m \simeq 1\,115\ g$$

O volume, em litros, é:

$$V = \frac{m}{d} \Rightarrow V = \frac{1{,}115}{0{,}8} \Rightarrow V \simeq 1{,}39\ L$$

4 O gráfico **b** representa melhor a relação entre a velocidade do vento e a energia elétrica gerada sob as condições de funcionamento descritas no enunciado.

Resposta: alternativa **b**.

5 O ar é menos denso à medida que a altitude aumenta. Com ar menos denso, menor será a quantidade de movimento transferida às pás.

Resposta: alternativa **a**.

6 De acordo com o enunciado, aos domingos a demanda se reduz em 40%, ou seja, a potência fornecida deve ser 60% do que seria nos dias úteis.

I. **Correta.** Essa é uma forma de fornecer os 60%.

II. **Correta.** Essa é outra forma. Considerando a condição apresentada, teríamos o percentual:

$p = 0{,}5 \cdot 100\% + 0{,}5 \cdot 20\% = 60\%$.

III. **Correta.** Como são 24 turbinas, o percentual obtido seria:

$$p = \frac{14 \cdot 100\% + 1 \cdot 40\%}{24} = 60\%$$

Resposta: alternativa **e**.

7 De acordo com o texto, anualmente, a Terra acumula $1{,}6 \cdot 10^{22}$ J. Cada quilograma de gelo utiliza $3{,}2 \cdot 10^5$ J para fusão.
1 trilhão de toneladas $= 10^{12}$ toneladas $= 10^{15}$ kg
Podemos montar a proporção:

$$\begin{matrix} 1\text{ kg} & \text{———} & 3{,}2 \cdot 10^5\text{ J} \\ x \cdot 10^{15} & \text{———} & 1{,}6 \cdot 10^{22}\text{ J} \end{matrix} \Rightarrow x = 50$$

Resposta: alternativa **b**.

8 Os processos tecnológicos de dessalinização da água do mar são muito caros, por isso não são usados em larga escala. As demais alternativas são incorretas.

Resposta: alternativa **a**.

9 Entre as alternativas apresentadas, a que não apresenta emissão de gases causadores do aquecimento global é o vento.
Resposta: alternativa **e**.

10 Proteção contra radiações eletromagnéticas nocivas à vida, principalmente a UV-B.

11 O dióxido de carbono é a causa principal do aumento da temperatura atmosférica, que causa mudança climática, portanto a redução da quantidade emitida desse gás terá como maior efeito a redução do impacto das atividades humanas no meio ambiente.

12 Os principais são: CO, CO_2 (estufa), óxidos nitrosos e sulforosos, material particulado (fuligem de carbono).

13 A proporção de O_2 na mistura e a rapidez da reação são fatores contribuintes. Para reduzir o mau aproveitamento deve-se trabalhar com misturas mais pobres (menos combustível em relação à quantidade de ar) e menores rotações.

14 Ocorre quando uma camada de ar quente se sobrepõe a uma camada de ar frio, impedindo o movimento ascendente do ar, uma vez que o ar abaixo dessa camada fica mais frio – portanto, mais pesado –, e os poluentes se mantêm próximos da superfície. Em um local com grande concentração de gases tóxicos, a inversão é um fator importante a se considerar, uma vez que dificulta a dispersão dos poluentes.

15 As fontes dos poluentes que deram origem à chuva ácida podem ser:
- gases de escapamento de carros;
- as emissões de gás das fábricas;
- a queima de combustíveis fósseis, tais como petróleo e carvão;
- os gases provenientes de vulcões ou outras fontes semelhantes.

16 Os átomos do mármore e do vinagre se reorganizam para formar novas substâncias, que não estarão presentes após a secagem. Portanto, haverá menos mármore na amostra final, ou seja, menos do que 2 gramas.
Resposta: alternativa **a**.

17 Não é rigorosamente correta a afirmação. O fato é que o carro a álcool também emite CO_2, mas ele é reabsorvido no crescimento da cana-de-açúcar, sendo ecologicamente mais correto, apesar de também emitir o gás.

18 O "lixo atômico", em grande parte, é formado por substâncias radioativas que se caracterizam pela emissão de ondas eletromagnéticas de alta energia. Por esse motivo, essas radiações são nocivas ao meio ambiente e à saúde humana. O período de emissão dessas radiações pode atingir milhares de anos e, até o momento, não há tecnologia para interrompê-lo.

Resposta: alternativa **a**.

19 Em relação às afirmativas, pode-se dizer:

I. Nas reações de fissão, não ocorre a liberação de CO_2 e óxidos de enxofre e nitrogênio, os principais responsáveis pelo efeito estufa e pela chuva ácida.

II. Como os combustíveis utilizados em usinas nucleares são radioativos, sempre há riscos para o meio ambiente e para os seres vivos, em caso de acidente.

Evidentemente, há riscos para o ambiente e para os seres vivos sempre que um acidente acontece em alguma obra de engenharia. O progresso tecnológico proporcionou mecanismos de prevenção de falhas que permitem a operação de usinas termonucleares, com segurança, em vários países. Assim, o primeiro argumento é claramente válido e o segundo, passível de discussão mais apurada.

Resposta: alternativa **d**.

20 Reciclagem do papel, que reduz a quantidade de árvores derrubadas para sua produção.
Reciclagem do alumínio, vidros e baterias.
Aproveitamento do lixo orgânico na produção de gás.

Retomando

21 I. **Incorreta**, pois se trata da primeira fração de energia solar bloqueada através da atmosfera.

II. **Incorreta**, pois representa o percentual de energia absorvida pela atmosfera.

III. **Incorreta**, visto que indica o percentual de energia absorvido por elementos que compõem o meio atmosférico.

IV. **Incorreta**, pois representa a energia liberada e circulante no sistema atmosférico.

V. **Correto**, pois é a única alternativa com elemento relacionado ao mecanismo de evaporação (vapor de água), pela absorção de energia solar para promover a passagem da água no estado líquido (contida no reservatório de uma usina hidroelétrica) para o estado de vapor emitido na atmosfera.

Resposta: alternativa **e**.

22 Dos 71 kW oferecidos ao motor para queima, são desperdiçados 56,8 kW, logo, o percentual de perda é: $\frac{56{,}8}{71} \cdot 100\% = 80\%$

Resposta: alternativa **a**.

23 Os três processos não emitem gases estufa, mas dependem das condições climáticas: sazonalidade das chuvas, alteração nos ventos e insolação, para hidrelétricas, eólicas e fotovoltaicas, respectivamente.
Resposta: alternativa **a**.

UNIDADE 3 – Ondulatória

CAPÍTULO 6 – Ondas mecânicas

Como este capítulo é o primeiro relativo à parte de Ondas e Óptica, sugerimos que você inicie-o ressaltando a evolução das tecnologias de informação e da comunicação por meio de exemplos. Nesse sentido, o texto seguinte pode auxiliá-lo nessa tarefa.

> A carta de Pero Vaz de Caminha (1450?-1500), datada de 1º de maio de 1500, é considerada o primeiro documento escrito da História do Brasil. Levada a Lisboa de navio, demorou cerca de 40 dias para chegar às mãos de D. Manuel. Hoje, com os modernos aviões, essa carta chegaria ao seu destino em cerca de 10 horas. Mas essa comunicação poderia ser feita pela internet; nesse caso, em alguns segundos as informações estariam em Lisboa.
>
> Na Copa do Mundo de Futebol, realizada no Brasil em 1950, somente os brasileiros que estavam nos estádios ou que tinham acesso ao rádio puderam acompanhar os jogos, nos quais os locutores esportivos, com suas transmissões empolgadas, conseguiam a proeza de transformar palavras em imagens. Em 2012, os Jogos Olímpicos realizados em Londres, na Inglaterra, foram assistidos "ao vivo e em cores" por todo o mundo, em tempo real.
>
> Com esses dois exemplos, queremos mostrar que vivemos em um mundo interligado devido à evolução das tecnologias da informação e da comunicação. A integração da televisão via satélite, do celular e da internet, é a grande responsável pelo "encurtamento das distâncias" e pela aproximação entre os povos, com reflexos sociais, econômicos e políticos.
>
> Pode-se considerar como ponto de partida dessa revolução o dia 24 de maio de 1844, quando Samuel Morse (1791-1872) enviou de Washington para Baltimore, nos Estados Unidos, a primeira mensagem por telégrafo. Com o desenvolvimento da eletricidade e a descoberta das ondas eletromagnéticas foi possível a transmissão sem fios. No século XIX, a invenção do rádio, com as conversões de ondas sonoras em ondas eletromagnéticas e o envio dessas ondas pelo espaço, foi um passo enorme para a chamada globalização. Hoje, com as fibras ópticas, com as antenas transmissoras e receptoras, com as transmissões via cabo e com os satélites, os cientistas implantaram uma verdadeira revolução digital que, cada vez mais, tem influenciado o modo de vida das pessoas.
>
> Não podemos esquecer que, por trás de todo esse desenvolvimento tecnológico, estão alguns princípios físicos que, ao longo dos anos, foram descobertos e evoluíram até o estágio conhecido nos dias atuais.

1. Movimentos oscilatórios

Sugerimos que você faça, em sala de aula, a montagem de um pêndulo simples, conforme descrito na seção *Experimento*, para mostrar quais grandezas influem no período do pêndulo.

Não vemos necessidade em demonstrar a equação do período do pêndulo, mas, se você julgar interessante, poderá utilizar o desenvolvimento que se encontra nas páginas 52 e 53 do livro *Física II: Termodinâmica e ondas*, 12. ed., de Young, Hugh D. e outros, publicado por Addison Wesley, em 2008.

Temos ainda, neste tópico, o sistema massa-mola. É importante salientar os princípios básicos que deram origem a construção dos relógios náuticos que funcionam independentemente das oscilações dos navios e das variações da aceleração da gravidade.

As mesmas considerações que fizemos para a equação do período do pêndulo simples são válidas para a equação do período do sistema massa-mola, ou seja, não vemos necessidade de demonstração para os alunos. Mas, se você achar conveniente, sugerimos consultar as páginas 41 a 43 do mesmo livro citado anteriormente.

No fechamento deste tópico, sugerimos alguns comentários sobre a determinação da longitude na época das Grandes Navegações e as deficiências apresentadas pelos relógios construídos com base nas leis do pêndulo simples. Nesse sentido, o livro *Longitude*, de Dava Sobel, 2. edição, Rio de Janeiro: Ediouro, 1997, se mostra um bom material para os alunos conhecerem a história de John Harrison e sua luta para resolver o maior problema das explorações marítimas do século XVIII: a determinação da longitude.

Para refletir

A energia potencial gravitacional é máxima nos extremos da oscilação e a energia cinética é máxima no ponto médio da oscilação (ponto mais baixo da trajetória).

Física explica

Após a leitura do texto apresentado nesta seção, você poderá sugerir aos alunos a leitura do livro *O pêndulo:* Leon Foucault e o triunfo da ciência, de Amir Aczel, do qual apresentamos um pequeno trecho no livro. Com a leitura, os alunos terão oportunidade de compreender o conhecimento científico e o tecnológico como resultados de uma construção humana, inseridos em um processo histórico e social.

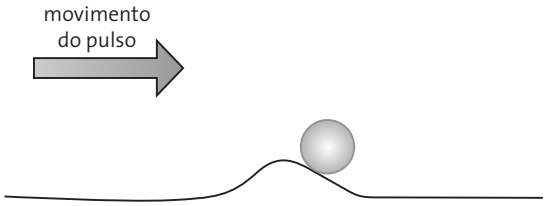
- A energia potencial é máxima nos pontos mais altos da trajetória, nesse caso, nos pontos *A* e *B*. A energia cinética é máxima no ponto mais baixo da trajetória, no ponto *O*, onde ele adquire sua maior velocidade.

2. Propagação ondulatória

Neste tópico, iniciamos o **estudo das ondas** propriamente dito. Uma dúvida frequente entre os alunos diz respeito ao fato de as ondas transportarem energia sem transporte de matéria. Para isso, utilizamos dois exemplos: as "olas" e a folha colocada na água que oscila para cima e para baixo com a passagem de uma onda, sem se deslocar ao longo da propagação ondulatória.

Uma pergunta interessante e frequente quando iniciamos o estudo da ondulatória é sobre o movimento dos surfistas nas ondas do mar. Se as ondas não transportam matéria, como se move o surfista? O texto seguinte poderá ser útil na explicação do fenômeno.

> Vamos considerar um tapete bem longo e estreito (passadeira) no qual colocamos uma bola de futebol. Uma das extremidades dessa passadeira está presa e você segura na outra extremidade. Com a passadeira bem pouco esticada, produza um pulso na extremidade.
>
> A figura seguinte mostra um instante em que a bola está sendo erguida pela energia do pulso.



Banco de imagem/ Arquivo da editora

Bola sendo erguida pela energia do pulso.

Como a bola está em uma descida, ela desce. Não pela ação do pulso, mas sim pela ação da gravidade. Se o pulso for suficientemente lento, à medida que a bola vai descendo, ela vai novamente sendo erguida com a energia do pulso que a encontra, e continua descendo por ação da gravidade, sucessivamente.

No entanto, se a velocidade do pulso for muito alta, quando a bola estiver começando a descida, o pulso vai embora e ela (bola) permanece praticamente no mesmo lugar. Lembrando que a velocidade do pulso aumenta com o aumento da tração, você pode conseguir essa situação produzindo o pulso com a passadeira bem esticada.

Os surfistas se defrontam com uma situação muito parecida. Eles querem estar sempre na descida, escorregando pela onda, mas para isso precisam ser rápidos para não deixar a onda passar por eles, caso contrário, terão de esperar por outra.

EpicStockMedia Shutterstock/Glow Images



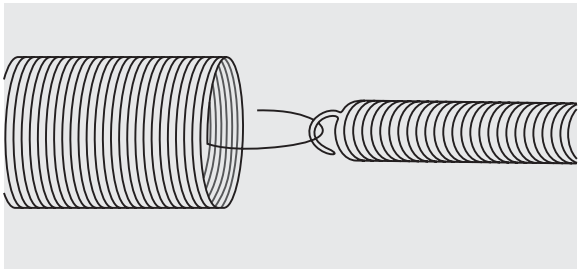
Surfista aproveitando para escorregar pela "rampa" de água criada pela onda.

Uma evidência de que o surfista **não** está sendo transportado pela onda é o rastro que a prancha deixa atrás de si, ao se mover em relação à água.

Sugerimos um comentário detalhado sobre cada uma das grandezas características de uma onda (elongação, amplitude, frequência, período, comprimento de onda e velocidade) e sobre a equação fundamental da ondulatória: $v = \lambda f$. Esses conceitos serão fundamentais para o entendimento dos fenômenos ondulatórios que serão tratados nos tópicos seguintes.

3. Reflexão, refração e difração de ondas

Como ponto de partida, sugerimos que você faça a demonstração prática dos fenômenos de reflexão e de refração de ondas utilizando para isso duas molas espirais. Por exemplo, uma com 10 cm de comprimento (sem distensão) e 7 cm de diâmetro (mola leve) e outra com 1,7 m de comprimento (sem distensão) e 2,5 cm de diâmetro (mola pesada) unidas pelas extremidades, conforme mostra a figura.



Banco de imagem/Arquivo da editora

Esquema para a demonstração da reflexão e refração de ondas com molas.

Posicione as molas no piso da sala e com a extremidade da mola pesada presa em uma parede (ou um aluno segurando) puxe a outra extremidade até as molas atingirem juntas um comprimento de aproximadamente 5,0 m. Produzindo pulsos (paralelos ao piso) transversais na extremidade da mola leve, observe a reflexão e a refração do pulso ao atingir a junção das duas molas (meios diferentes). Repita o procedimento produzindo, agora, o pulso na extremidade da mola pesada.

Você deve observar que, quando o pulso se propaga da mola leve para a mola pesada, a reflexão é com inversão de fase (sentido invertido) e, quando o pulso se propaga da mola pesada para a mola leve, a reflexão é sem inversão de fase. Em ambos os casos, o pulso refratado não sofre inversão de fase.

Na difração, solicite aos alunos que respondam o exercício 12 antes de apresentar os conceitos. Em nosso cotidiano, a difração das ondas sonoras é mais acentuada do que a das ondas eletromagnéticas, devido ao comprimento de onda das ondas sonoras ser da ordem das fendas, ou obstáculos. Como o comprimento de onda da luz (onda eletromagnética) é muito menor do que as dimensões dos obstáculos, a difração da luz é praticamente imperceptível.

Física explica

Nos comentários sobre as ondas do mar, sugerimos que você destaque as ondas denominadas *tsunami* (*tsu* = onda e *nami* = porto). Para isso, o artigo "Tsunami: Que onda é essa?", de Marcus L. Santos, do Instituto de Física da Universidade de Brasília, publicado pela revista *Física na Escola*, volume 6, n. 2, de 2005, constitui um bom material de apoio.

Em relação à questão formulada no final do texto "Quais as providências que devem ser tomadas para que vidas sejam poupadas na passagem de um *tsunami*?", sugerimos que você reúna os alunos em grupos e solicite um relatório escrito com as opiniões do grupo.

4. Interferência de ondas

Na realidade, uma onda não interfere na propagação da outra; o que acontece quando duas ondas se encontram é uma **superposição**. O termo interferência foi mantido por coerência com a literatura mundial.

Para exemplificar as interferências (construtiva, destrutiva e parcial), você poderá utilizar a mola leve já citada. Com a mola esticada até 5,0 m aproximadamente, duas pessoas produzem, simultaneamente, pulsos sem concordância de fase ou em oposição de fase; os pulsos propagam-se na mola, se superpõem e, em seguida, continuam a propagação sem que um tenha interferido no outro.



Banco de imagem/ Arquivo da editora

Esquema da posição das pessoas e da mola.

5. Ondas estacionárias

As **ondas estacionárias** são fundamentais no estudo dos instrumentos musicais, que trataremos no próximo capítulo. Você poderá mostrar a formação de ondas estacionárias com a mola leve já citada. Com a mola colocada no chão, com uma extremidade presa (na parede ou por um aluno), produza oscilações transversais movendo a extremidade da mola para a esquerda e para a direita, paralela ao piso.

Aumentando a frequência de vibração da mola, você poderá obter ondas estacionárias com um número maior de nós e ventres.

6. Ressonância

Os exemplos citados no texto são suficientes para o entendimento desse fenômeno. Mas sugerimos que você comente também outros exemplos como o aquecimento de alimentos hidratados.

Em construção

Após a leitura da biografia de Huyghens, certamente os alunos não terão dúvidas para responder a questão proposta. A importância de Huyghens para a Ondulatória está relacionada ao seu trabalho mais conhecido, relativo à propagação ondulatória, com as frentes de ondas, conceito-chave no entendimento dos fenômenos de reflexão e refração das ondas.

Experimento

Embora você já tenha mostrado no início do capítulo quais as grandezas que influem no período de um pêndulo, julgamos importante essa investigação por parte dos alunos.

Na atividade, eles poderão calcular o valor da aceleração da gravidade no local e comparar com o valor que normalmente é apresentado nos livros e na literatura em geral.

A seguir, apresentamos alguns comentários sobre as questões formuladas na atividade:

1. Medindo-se o intervalo de tempo (Δt) para 10 oscilações completas, o período do pêndulo é dado por: $T = \frac{\Delta t}{10}$.
2. O objetivo de se medir o tempo para 10 oscilações completas é aumentar a precisão das medidas no experimento.
3. O período do pêndulo não varia com a amplitude nem com a massa do pêndulo. Em relação ao comprimento, quanto maior o comprimento do fio do pêndulo, maior o período de oscilação.
4. Resposta pessoal.

Atividades complementares

1. (Enem) Em um dia de chuva muito forte, constatou-se uma goteira sobre o centro de uma piscina coberta, formando um padrão de ondas circulares. Nessa situação, observou-se que caíam duas gotas a cada segundo. A distância entre duas cristas consecutivas era de 25 cm e cada uma delas se aproximava da borda da piscina com velocidade de 1,0 m/s. Após algum tempo a chuva diminuiu e a goteira passou a cair uma vez por segundo. Com a diminuição da chuva, a distância entre as cristas e a velocidade de propagação da onda se tornaram, respectivamente,

a) maior que 25 cm e maior que 1,0 m/s.

b) maior que 25 cm e igual a 1,0 m/s.

c) menor que 25 cm e menor que 1,0 m/s.

d) menor que 25 cm e igual a 1,0 m/s.

e) igual a 25 cm e igual a 1,0 m/s.

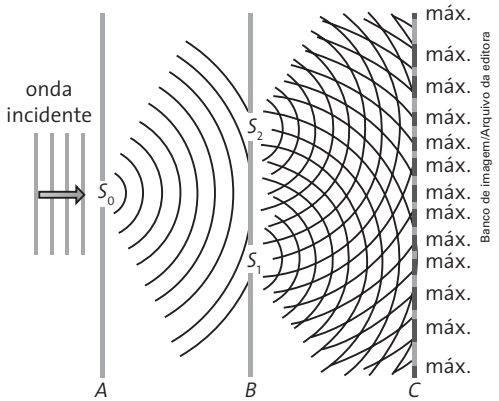
Resolução:

O meio de propagação das ondas não se altera. Portanto, a velocidade permanece a mesma, ou seja, 1 m/s.

Na equação $v = \lambda f$, v é constante e f diminui; portanto, λ aumenta e fica maior que 25 cm.

Resposta: alternativa **b**.

2. (Uece) Na figura, C é um anteparo e S_0, S_1 e S_2 são fendas nos obstáculos A e B.



Banco de imagem/Arquivo da editora

Assinale a alternativa que contém os fenômenos ópticos esquematizados na figura.

a) Reflexão e difração.

b) Difração e interferência.

c) Polarização e interferência.

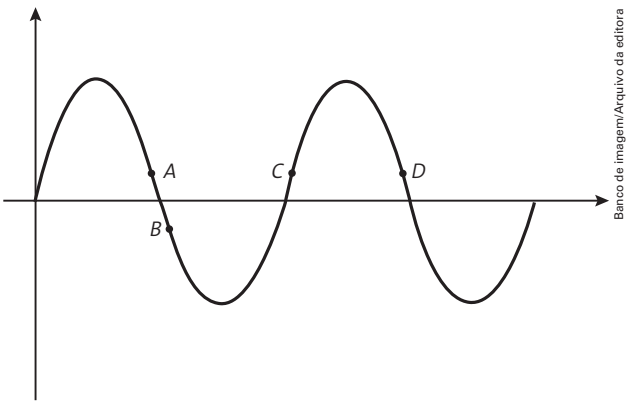
d) Reflexão e interferência.

Resolução:

Nas fendas, S_0, S_1 e S_2, a onda sofre difração e, após a difração nas fendas S_1 e S_2, as ondas se superpõem, ou seja, sofrem interferência.

Resposta: alternativa **b**.

3. (UEM-PR) O diagrama abaixo ilustra uma onda periódica.



Banco de imagem/Arquivo da editora

Quais pontos estão em fase entre si?

a) *A* e *C*

b) *A* e *D*

c) *B* e *C*

d) *C* e *D*

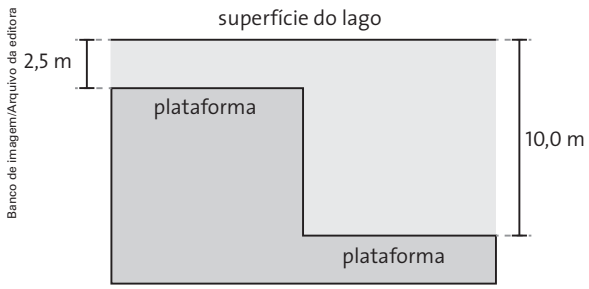
e) *A* e *B*

Resolução:

Na onda periódica mostrada na figura, os pontos que estão em fase são: *A* e *D*.

Resposta: alternativa **b**.

4. (Vunesp-SP) Considere um lago onde a velocidade de propagação das ondas na superfície não dependa do comprimento de onda, mas apenas da profundidade. Essa relação pode ser dada por $v = \sqrt{g \cdot d}$, em que g é a aceleração da gravidade e d é profundidade. Duas regiões desse lago têm diferentes profundidades, como ilustrado na figura.



Banco de imagem/Arquivo da editora

O fundo do lago é formado por extensas plataformas planas em dois níveis; um degrau separa uma região com 2,5 m de profundidade e a outra com 10 m de profundidade. Uma onda plana, com comprimento de onda λ, forma-se na superfície da região rasa do lago e propaga-se para a direita, passando pelo desnível. Considerando que a onda em ambas as regiões possui a mesma frequência, pode-se dizer que o comprimento de onda na região mais profunda é:

a) $\frac{\lambda}{2}$

b) 2λ

c) λ

d) $\frac{3\lambda}{2}$

e) $\frac{2\lambda}{3}$

Resolução:

Sendo $v = \lambda \cdot f$ e $v = \sqrt{g \cdot d}$, temos: $\lambda \cdot f = \sqrt{g \cdot d}$.

Aplicando essa relação para as duas profundidades e lembrando que a frequência não se altera, obtemos:

$\lambda_1 \cdot f = \sqrt{g \cdot d_1}$ e $\lambda_2 \cdot f = \sqrt{g \cdot d_2}$

d_1 é a profundidade da parte rasa; d_2 é a profundidade da parte funda; λ_1 é o comprimento de onda na parte rasa e λ_2 é o comprimento de onda na parte funda. Efetuando a divisão entre as expressões e substituindo os valores numéricos, obtemos:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} \Rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \sqrt{\frac{2,5}{10}} \Rightarrow \lambda_2 = \sqrt{4} \cdot \lambda_1 \Rightarrow \lambda_2 = 2 \cdot \lambda_1$$

Resposta: alternativa **b**.

Resolução dos exercícios

1 a) De acordo com a expressão $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ do período do pêndulo, se diminuirmos o comprimento ℓ do pêndulo, o período também diminuirá. Sendo a frequência o inverso do período, então a frequência aumentará. Vejamos um exemplo: como o período depende da raiz quadrada do comprimento ℓ do pêndulo, se o comprimento for reduzido a $\frac{1}{4}$ do valor original, o período será reduzido a $\frac{1}{2}$ do valor original e a frequência será o dobro da anterior.

b) De acordo com a expressão acima, o período não depende da massa do pêndulo. Assim, se aumentarmos a massa do pêndulo, o período não se altera e o mesmo acontece com a frequência.

c) Sendo o período inversamente proporcional à aceleração da gravidade, ele diminuirá se a gravidade for maior, ao passo que a frequência aumentará.

2 O aumento da temperatura média de 10 °C para 30 °C provoca um aumento no comprimento do pêndulo. Esse aumento provoca um aumento no seu período, conforme equação mostrada no exercício 1. Com o aumento do período, o relógio passa a atrasar.

3 Analisando as afirmativas, temos:

I. **Certo**. O período do sistema massa-mola vale:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \Rightarrow T = 2 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{4}{100}} \Rightarrow T = 1,2\ s$$

II. **Errado**. O período será o mesmo.

III. **Errado**. O período será o mesmo.

4 a) O intervalo de tempo medido, para 10 oscilações completas, foi de 62,8 s. Então, o período do sistema (tempo para 1 oscilação completa) é de:

$$T = \frac{62,8}{10} = 6,28\ s$$

Sendo a constante elástica da mola igual a 2,0 N/m e considerando $\pi = 3,14$, obtemos a massa do corpo oscilante:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \Rightarrow 6,28 = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{m}{2}} \Rightarrow m = 2,0\ kg$$

b) O resultado obtido é confiável, pois o período do pêndulo não depende da amplitude.

5 Como o período na Terra é menor, e o período é inversamente proporcional à aceleração da gravidade, conclui-se que a gravidade na Lua é menor do que a gravidade na Terra.

6 Se a criança diminui o intervalo de tempo entre as batidas, ela aumenta a frequência da fonte que produz as ondas que continuam a se propagar com a mesma velocidade, pois esta depende do meio de propagação. Como a velocidade permanece a mesma e a frequência aumenta, então o comprimento de onda diminui.

Resposta: alternativa **d**.

7 a) A amplitude e o comprimento de onda são obtidos diretamente na figura dada. Assim, temos:
$A = 10$ cm e $\lambda = 40$ cm.

b) Como o período da onda é 0,5 s, então, a frequência vale:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{0,5} \Rightarrow f = 2,0 \text{ Hz}$$

E a velocidade de propagação da onda vale:

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow v = 40 \cdot 2,0 \Rightarrow v = 80$ cm/s $= 0,80$ m/s

8 a) Na figura dada, observamos que o comprimento de onda é 20 cm $=$ 0,20 m. Como a velocidade da onda é 2,0 m/s, sua frequência vale:

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow 2,0 = 0,20 \cdot f \Rightarrow f = 10$ Hz

Como a frequência da onda é igual à frequência da fonte, então, a frequência do funil vale 10 Hz.

b) O período de oscilação do funil é dado por:

$$T = \frac{1}{f} \Rightarrow T = \frac{1}{10} \Rightarrow T = 0,1 \text{ s}$$

9 Observe na figura dada que a distância entre dois picos, que corresponde ao comprimento de onda, vale 20 mm. Sendo a velocidade da onda igual a 25 mm/s, a frequência dos batimentos cardíacos vale:

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow 25 = 20 \cdot f \Rightarrow f = 1,25$ batimento/segundo

Em batimentos por minuto:

$f = 1,25 \cdot 60 \Rightarrow f = 75$ batimentos/minuto (bpm)

10 a) Sendo o intervalo de tempo entre e emissão e a recepção igual a 0,2 s, então, o tempo para a onda ir do navio até o objeto submerso é 0,1 s. Assim, a profundidade em que se encontra o objeto é dada por:

$d = v \cdot \Delta t \Rightarrow d = 1480 \cdot 0,1 \Rightarrow d = 148$ m

b) O comprimento de onda é obtido na expressão:

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow 1480 = \lambda \cdot 260 \Rightarrow \lambda = 5,7$ m

11 a) Observe na figura que o comprimento de onda (distância entre duas cristas sucessivas) na região 2 é maior do que na região 1. Então, a velocidade da onda na região 2 é maior do que na região 1.

b) A frequência é a mesma nas duas regiões.

12 O fato de ouvirmos o som da televisão ligada na sala ao lado, mas não vermos a imagem, é explicado pelo fenômeno da difração, a propriedade das ondas de contornarem obstáculos.

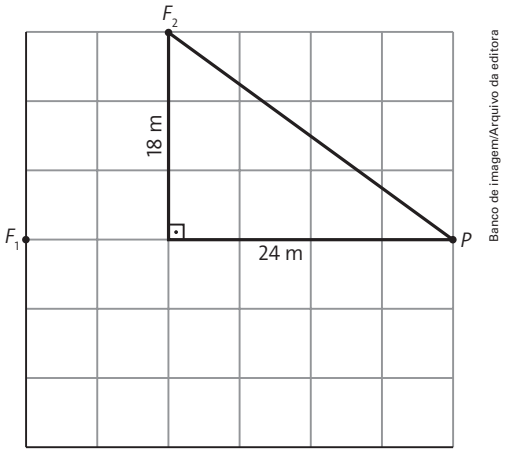
13 Analisando as afirmativas, concluímos que:

I. Errada. Na superposição dos pulsos haverá uma interferência destrutiva.

II. **Correta**. Em 2,0 s, estarão superpostos e a interferência será destrutiva.

III. Errada. Após 8,0 s, a velocidade de cada pulso é 2,0 m/s, mas não haverá inversão de fase, ou seja, um pulso não interfere na propagação do outro.

14 De acordo com a escala da figura, a distância da fonte F_1 ao ponto P é 36 m. E a distância da fonte F_2 ao ponto P é obtida com base na seguinte figura:



Banco de imagem/Arquivo da editora

$F_2P = \sqrt{(18)^2 + (24)^2} \Rightarrow F_2P = 30$ m

Nessas condições, a diferença de percurso do som das fontes ao ponto P é:

$d = F_1P - F_2P \Rightarrow d = 36 - 30 \Rightarrow d = 6,0$ m

Sendo $\lambda = 2,0$ m, a relação $\frac{d}{\lambda} = \frac{6,0}{2,0} = 3$. Portanto, a interferência é **construtiva**.

15 A afirmativa que caracteriza uma onda estacionária é a III: Os pontos denominados nós, e que são consecutivos, estão separados entre si por uma distância igual a meio comprimento de onda.

16 a) De acordo com os dados, a distância entre dois nós consecutivos é 12 cm. Essa distância corresponde à metade do comprimento de onda. Portanto, temos:

$\lambda = 2 \cdot 12 \Rightarrow \lambda = 24$ cm

b) Sendo a frequência da fonte igual a 100 Hz, a velocidade da onda no fio é:

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow v = 24 \cdot 100 \Rightarrow v = 2400$ cm/s $= 24$ m/s

17 a) Os vórtices da turbulência do vento produziram vibrações ressonantes com as vibrações da ponte.

b) Ressonância do circuito de recepção.

18 Ao soprarmos, provocamos a oscilação da coluna de ar que se encontra acima da superfície da água na garrafa.

Resposta: alternativa **a**.

Retomando

19 Sendo $v = \sqrt{g \cdot h}$ para as profundidades de 4000 m e 10 m, temos:

$v_i = \sqrt{4000 \cdot 10} \Rightarrow v_i = 200$ m/s

$v_f = \sqrt{10 \cdot 10} \Rightarrow v_f = 10$ m/s

Como $E = k \cdot v \cdot A^2$ e como não há perda de energia, escrevemos:

$E_i = E_f \Rightarrow k \cdot v_i \cdot A_i^2 = k \cdot v_f \cdot A_f^2 \Rightarrow 200 \cdot (1)^2 = 10 \cdot A_f^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow A_f = \sqrt{20} = 4,5$ m

20 Como a velocidade da onda depende da profundidade, a onda vai sofrendo sucessivas refrações.

Resposta: alternativa **c**.

21 Se antes ele ouvia bem a nota de 440 Hz, os sons estavam chegando em concordância de fase. A distância ℓ de afastamento, para que as ondas fiquem em oposição de fase, deve ser um número ímpar de meios comprimento de onda.

$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{330}{440} \Rightarrow \lambda = 0{,}75\,\text{m}$$

$$\frac{\lambda}{2} = 0{,}375 \Rightarrow \frac{\lambda}{2} \simeq 38\,\text{cm}$$

Os múltiplos de ordem ímpar desse valor também são soluções.

Resposta: alternativa **a**.

CAPÍTULO 7 – Acústica

Iniciamos um novo capítulo e, mais uma vez, teremos a oportunidade de trabalhar as competências relativas ao estabelecimento de leis físicas que expliquem fenômenos cotidianos que, normalmente, são atrativos para os alunos, despertando-lhes a curiosidade.

A frase inicial apresentada pretende introduzir a ideia de timbre e o texto a seguir pode ser usado como apoio para um primeiro encontro com a Acústica.

A orquestra sinfônica

Embora a apresentação da orquestra sinfônica começasse somente às 20h, às 19h todos os alunos já estavam presentes na quadra esportiva que havia sido preparada especialmente para o evento.

O professor de Física, responsável pela vinda da orquestra, fez alguns comentários a respeito da apresentação. Começou com a concha acústica que abriga a orquestra e tem uma parte aberta voltada para a plateia, cuja finalidade é refletir o som dos instrumentos musicais para o público, evitando que sua intensidade decaia rapidamente, como ocorre nas apresentações ao ar livre. Para a montagem da concha acústica, o professor contou com a colaboração de um engenheiro especializado em acústica, que analisou a absorção do som, o isolamento sonoro, as reverberações e os ecos.

Em seguida, o professor voltou seus comentários para os instrumentos da orquestra. Basicamente, uma orquestra sinfônica é composta por cinco classes de instrumentos: os instrumentos de corda (violino, viola, violoncelo, harpa); os instrumentos denominados de madeira (flauta, oboé, clarinete, fagote); os metais (trompete, trombone, tuba); os instrumentos de percussão (tímpano, triângulo, bumbo, prato) e os instrumentos de teclas (piano, órgão).

Em virtude da complexidade das obras executadas pela orquestra, a figura do maestro, ou regente, torna-se indispensável. Ele é o responsável direto pela coordenação de todas as etapas do espetáculo, do ensaio à apresentação. Para isso, é preciso que conheça previamente toda a obra a ser executada, pois dele depende o andamento, as junções dos vários instrumentos, a marcação do tempo e as entradas de solistas em determinados trechos.

Finalmente, o professor solicitou uma atenção especial de todos os alunos para o timbre de cada instrumento. Essa é a característica que nos permite identificar cada um dos vários instrumentos que compõem a orquestra, mesmo que os sons por eles emitidos sejam simultâneos, com a mesma frequência e com a mesma intensidade. Isso só é possível porque instrumentos diferentes produzem, em nosso sistema auditivo, sensações diferentes.

Sugerimos que os alunos sejam divididos em equipes para produzir uma pequena resposta à pergunta formulada na frase inicial, desenvolvendo suas habilidades de expressar os fenômenos físicos em linguagem habitual.

1. Sons, ultrassons e infrassons

Sugerimos que você inicie ressaltando as qualidades e a importância da audição para os animais como meio de comunicação e de sobrevivência.

Para a classificação das ondas sonoras em sons audíveis, infrassom e ultrassom, usamos como referência a sensibilidade da audição humana. Neste ponto, se julgar interessante, você pode comentar a constituição da anatomia da orelha humana e o processo desde a entrada de um som no canal auditivo até a percepção do impulso elétrico no cérebro.

Outro ponto que pode ser destacado diz respeito à velocidade do som nos diferentes meios e a equação fundamental da ondulatória. Na refração do som, o exemplo da mudança de velocidade com a temperatura pode ser utilizado.

Dois pontos que podem ser comentados como motivadores:

- o infrassom, utilizado por alguns animais;
- o ultrassom, com suas aplicações nos diagnósticos médicos.

2. Reverberação e eco

Todos nós conhecemos os fenômenos de reverberação e eco e com eles brincamos, mesmo sem entendê-los completamente. Neste tópico, podemos tentar reconstruir as brincadeiras e verificar quais são as possíveis causas dos fenômenos.

Para isso, o entendimento do conceito denominado remanescência é importante. Trata-se de uma ideia relativamente simples, mas com nome complicado.

Caso você considere adequado, os alunos podem ser convidados a tentar explicar a equação $\Delta t = \frac{2d}{v_{som}}$ como referência para obtenção do eco.

3. Intensidade, altura e timbre

Neste tópico, apresentamos as qualidades do som, diretamente ligadas à nossa percepção auditiva: intensidade, altura e timbre.

Caso julgue interessante, você pode iniciar distinguindo intensidade de altura. Mostre que a linguagem cotidiana é diferente da linguagem da Física.

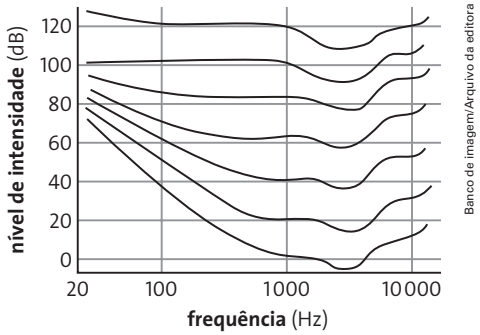
Ilustre esse fato pedindo a eles que pensem como é o som emitido por um "baixo". Pode, também, falar da escala de vozes no canto lírico: barítono, tenor, soprano e contralto.

Um vídeo de um pequeno trecho de uma ópera (como "Barbeiro de Sevilha") pode mostrar, com clareza, o conceito de altura.

Sobre a intensidade, pode ser interessante comentar a relação logarítmica entre a intensidade e o nível de intensidade (nível sonoro), o limiar da audição e o limiar da dor.

Se julgar necessário, poderá completar o gráfico mostrado no texto com a figura seguinte, que mostra o nível de intensidade em função da frequência de sons que provocam a mesma sensação de sonoridade.

Relação entre o nível de intensidade e a frequência do som



Fonte: TIPLER, Paul A. *Física*: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. v. 1, 4 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. p. 427.

A curva inferior corresponde ao limiar de audição de apenas 1% da população e está abaixo do limiar da maioria. A segunda curva corresponde, aproximadamente, ao limiar de audição de cerca de 50% da população.

O exercício resolvido 1 mostra uma aplicação numérica que envolve a análise do gráfico nível sonoro × frequência, mostrado no texto, em uma tentativa de desenvolver a competência de leitura e interpretação de fenômenos físicos, expressos por gráficos.

Finalmente, o conceito de timbre, tratado desde o início do capítulo, pode ser apresentado formalmente. Você pode aproveitar o momento para estabelecer os conceitos de som fundamental e harmônicos. Uma dúvida que normalmente surge diz respeito ao fato de como dois instrumentos diferentes podem tocar a mesma nota se em cada um deles ela é o resultado da combinação do som fundamental com diferentes números de harmônicos.

Acreditamos ser importante deixar claro que a frequência da nota é determinada pelo som fundamental. A composição desse som com diferentes harmônicos não muda a frequência da nota, mas produz uma sensação sonora diferente, ou seja, o timbre é diferente.

Como **trabalho em equipe**, indicamos que, antes de você comentar sobre o timbre da voz, leve um gravador (sugerimos o do aparelho celular) para a sala de aula e peça a alguns alunos que gravem uma mesma frase. Em seguida, deixe-os ouvir as gravações e identifique o dono da voz. É comum um aluno não identificar sua própria voz.

Para refletir

Na Física, para designar a intensidade do som, usamos os adjetivos forte ou fraco. A altura está relacionada às frequências, que determinam se os sons são mais graves ou agudos.

4. Cordas vibrantes

Com este tópico, iniciamos o estudo dos instrumentos musicais, assunto que normalmente desperta o interesse dos alunos. Em primeiro lugar, podemos apresentar os instrumentos de cordas, nos quais o som musical é produzido pela vibração de uma corda fixa em suas extremidades.

Após os comentários e a apresentação gráfica do som fundamental e dos harmônicos, se o professor dispuser de um violão e de um osciloscópio, os alunos poderão visualizar a composição dos harmônicos na tela do osciloscópio quando uma corda do violão é posta a oscilar. Se você não souber tocar violão, poderá pedir a um aluno que saiba tocar ou convidar uma pessoa.

Sugerimos que a tabela 7.3 seja analisada detalhadamente com os seguintes comentários sobre o que acontece com a frequência do som se variarmos:

- a tensão na corda vibrante;
- o comprimento da parte vibrante da corda;
- o diâmetro da corda.

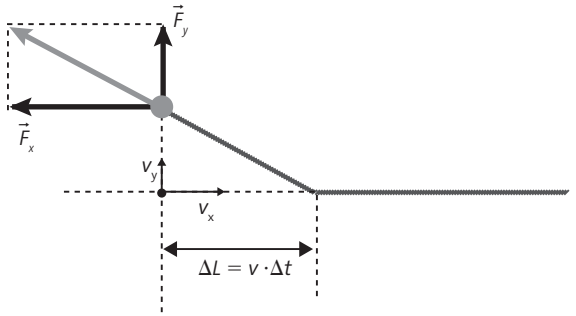
No exercício resolvido 2, mostramos uma aplicação numérica utilizando uma nota musical de frequência 440 Hz.

Para refletir

Para obter a velocidade de um pulso que se propaga ao longo de uma corda, vamos aplicar o teorema do impulso.

Na figura seguinte, a extremidade esquerda da corda de densidade linear μ foi puxada para cima uniformemente com uma força de intensidade F_x.

A corda estava sujeita a uma tração $T = F_x$ e a porção de corda que subiu no intervalo de tempo Δt tem massa $\Delta m = \mu \cdot \Delta L$.



Por semelhança de triângulos, obtemos:

$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{v_y}{v_x} \Rightarrow v_y = v\frac{F_y}{F_x} \quad (I)$$

Pois v_y é a velocidade v com que a perturbação está se propagando na corda. Pelo teorema do impulso, aplicado na direção vertical, temos:

$$I_{Fy} = F_y \cdot \Delta t = \Delta m \cdot v_y$$

Substituindo-se nessa última igualdade a componente da velocidade v_y pelo obtido em (I) e lembrando que $\Delta m = \mu \cdot \Delta L$, temos:

$$F_y \cdot \Delta t = \mu \cdot \Delta L \cdot v\frac{F_y}{F_x} \Rightarrow \frac{T}{\mu} = v \cdot \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

Como $\frac{\Delta L}{\Delta t} = v$, que é a velocidade de propagação do pulso, podemos escrever: $v^2 = \frac{T}{\mu} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$.

5. Tubos sonoros

Neste tópico, completamos o estudo dos instrumentos musicais com os instrumentos de sopro, nos quais uma coluna de ar é posta a vibrar. Antes de comentar os tubos sonoros, acreditamos que cabe uma discussão sobre o estabelecimento das condições que devem ser obedecidas para a obtenção dos sons fundamentais e harmônicos.

Você pode mostrar que, no tubo aberto, a formação de ondas estacionárias segue os mesmos padrões vistos nas cordas vibrantes; podemos obter todos os harmônicos, tanto os pares como os ímpares.

Por outro lado, nos tubos fechados, podemos somente obter os harmônicos ímpares. Nesse sentido, é importante comentar em detalhes a tabela 7.4.

No exercício resolvido 3, mostramos que a possibilidade de um mesmo instrumento (apito do juiz de futebol) funcionar como um tubo sonoro aberto ou fechado, a critério do instrumentista.

O encerramento deste tópico pode incluir alguns comentários sobre os instrumentos de percussão, nos quais o som é produzido pela vibração de uma membrana esticada.

Física explica

Neste item pode ser desenvolvida a ideia de como podemos assobiar melodias, e como os lábios, controlados pelo cérebro, são capazes de executar uma melodia.

Resposta da questão:

- Porque a razão entre as frequências é a mesma, embora a segunda sequência seja mais aguda.

6. Efeito Doppler

Este é um tópico de grande interesse, uma vez que o uso dos princípios aqui desenvolvidos proporcionou técnicas muito precisas de diagnóstico, aprimorou o atendimento médico e, consequentemente, melhorou a qualidade de vida.

Uma abordagem inicial do assunto pode tratar da ideia relativa às ondas do mar, explicada no livro do aluno. O exemplo da sirene da ambulância pode, também, ser bastante ilustrativo.

Assim, acreditamos ser interessante enfocar o problema e estabelecer modelos para as variações de frequência referentes ao movimento relativo entre fonte e observador.

Os diversos casos (fonte em movimento – observador em repouso; fonte em repouso – observador em movimento; fonte e observador em movimento) podem ser discutidos, e acreditamos que a ênfase deva ser no raciocínio dedutivo, em cada caso.

O exercício resolvido 4 permite o desenvolvimento das habilidades relativas à expressão de fenômenos cotidianos por leis físicas.

Física explica

Esse item pode ser utilizado para incentivar os alunos a pesquisar o tema nos diversos meios disponíveis. O trabalho resultante pode ser apresentado na forma escrita ou em um seminário. A seguir, algumas sugestões de respostas para as atividades.

1. É o fenômeno da reflexão de ondas.
2. Porque o movimento das paredes dos vasos provoca mudanças nas frequências das ondas refletidas.

Em construção

Neste capítulo prestamos nossa homenagem ao filósofo, matemático e astrônomo grego Pitágoras. Certamente, todos os alunos conhecem o "teorema de Pitágoras", mas poucos conhecem os trabalhos de Pitágoras no campo da música. É um bom momento para trabalhar isso.

Você pode recomendar uma pesquisa nos meios de informação para a contextualização histórica dos trabalhos de Pitágoras e como suas contribuições influenciaram a vida em sociedade.

Experimento

A atividade prática proposta busca explorar as oscilações em uma corda fixa em suas extremidades, como acontece normalmente nos instrumentos de corda.

Acreditamos ser produtivo optar por uma análise qualitativa, sem impor aos alunos uma série de cálculos. Em relação às questões propostas, você pode fazer as seguintes observações:

1. Alterando-se a frequência do vibrador, obtém-se um harmônico diferente na corda, ou seja, aumentando a frequência, aumenta o numero de nós obtidos na onda estacionária; diminuindo a frequência, diminui o número de nós na onda estacionária.
2. Variando-se a tensão na corda, a velocidade de propagação da onda na corda varia e, consequentemente, varia a frequência da onda.
3. Em uma corda mais fina, o número de nós na corda é maior do que em uma corda mais grossa, desde que elas tenham o mesmo comprimento e a frequência do vibrador seja a mesma.
4. A velocidade de propagação da onda na corda variou, pois a tensão foi alterada durante os ensaios.
5. Quanto maior o número de nós obtidos na onda estacionária, menor o comprimento de onda.

Atividades complementares

Um tópico de bastante interesse para os alunos é relativo às notas musicais, que pode ser explorado como tarefa extra ou como discussão em aula ou, até mesmo, em uma feira de ciências. O texto a seguir pode servir como apoio para isso.

Notas musicais

As notas musicais produzidas pelos instrumentos musicais são ondas sonoras com frequências bem definidas. Isso significa dizer que cada nota musical tem uma frequência predeterminada.

Por exemplo, tornando o piano com base, a nota dó central (dó4) tem uma frequência de 261,63 Hz. Essa será sempre a frequência dessa nota dó, quer ela seja tocada no piano, no violino ou em qualquer outro instrumento musical. O que muda de um instrumento para outro é o número de harmônicos presentes no som, o que dá um timbre diferente para cada instrumento. Mas não podemos esquecer que a frequência do som é determinada pela frequência do modo fundamental, o primeiro harmônico.

Um outro ponto a ser considerado é que, em alguns instrumentos, como no violino, se consegue uma variação contínua de frequência, dentro de um dado intervalo. A não existência de trastes no violino permite ao músico deslocar o dedo continuamente ao longo de uma corda.

Por outro lado, a existência de trastes no violão impõe a condição de uma variação discreta de frequências, ou seja, somente algumas frequências são possíveis dentro do intervalo considerado. O mesmo ocorre no piano, que dispõe, em média, de 88 teclas, cada uma das quais com uma frequência preestabelecida.



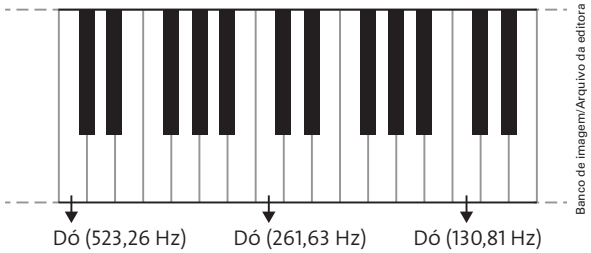
DigiCake/shutterstock/Glow Image

Teclas de um piano.

Os nomes das sete notas musicais (dó, ré, mi, fá, sol, lá, si) são atribuídos a um professor italiano de música do século XI, o monge beneditino Guido de Arezzo (990-1050), com base em um hino em homenagem a São João: *Ut queantlaxis / Ressonarefibris / Mira gestorum / Famulituorum / Solve polutti / Labiireatum / Sancteloannes* (para que teus servos / possam exaltar / a plenos pulmões / as maravilhas dos teus milagres / perdoa a falta / do lábio impuro / ó São João).

No século XVII, o Ut foi substituído por Dó (iniciais de *Dominus*) e, juntamente com as demais, permanece até hoje. Uma sequência de oito notas, dó, ré, mi, fá, sol, lá, si, dó é denominada gama. Observe que, em uma gama, a nota dó inicia e fecha a sequência. Um detalhe importante é que a frequência da nota dó que fecha a sequência é sempre o dobro da frequência da nota dó que inicia.

Voltemos ao exemplo do piano. A nota dó central possui uma frequência de 261,63 Hz. Então, o dó que completa a gama, à direita, possui frequência de 523,26 Hz. Por outro lado, o dó que inicia a gama, à esquerda, possui frequência de 130,81 Hz (261,63 ÷ 2), conforme mostra a figura.



Representação de duas gamas em um piano.

Na figura, que representa duas gamas, as frequências das notas da gama da esquerda são menores do que as frequências das notas gama da direita. Na gama da esquerda, os sons são mais graves.

Podemos notar, também, que a frequência de qualquer nota na gama da direita é o dobro da frequência da mesma nota na gama da esquerda. Veja os exemplos:

Sol (esquerda): 195,99 Hz

Sol (direita): $2 \cdot 195{,}99 = 391{,}98$ Hz;

Lá (esquerda): 220 Hz

Lá (direita): $2 \cdot 220 = 440$ Hz.

O intervalo entre duas notas de mesmo nome em gamas consecutivas é denominado oitava, pois ele compreende oito notas.

Complementando o assunto "Notas musicais", alguns exercícios podem ser propostos. A seguir, propomos dois, com sua respectiva resolução:

1. Uma nota musical possui uma frequência de 1000 Hz. Qual é a frequência de uma nota musical que está uma oitava:

a) acima dela? b) abaixo dela?

Resolução:

a) A frequência da nota musical dada é 1000 Hz. Assim, a frequência de uma nota que se encontra uma oitava acima será o dobro da anterior, ou seja, 2000 Hz.

b) A frequência de uma nota que uma oitava abaixo será a metade da anterior, ou seja, 500 Hz.

2. No teclado de um piano existem 8 teclas que emitem a nota dó, identificadas como dó1, dó2, dó3, dó4, dó5, dó6, dó7 e dó8.

a) Sendo a frequência da nota dó4 igual a 260 Hz, aproximadamente, determine a frequência das outras notas dó.

b) Qual dessas notas dó é a mais aguda e qual a mais grave?

Resolução:

a) Se a nota dó4 possui frequência $f_4 = 260$ Hz, aproximadamente, então as outras dó nas oitavas superiores possuem frequências dadas por:

$\text{dó5}: f_5 = 2 \cdot f_4 = 2 \cdot 260 \Rightarrow f_5 = 520$ Hz

$\text{dó6}: f_6 = 2 \cdot f_5 = 2 \cdot 520 \Rightarrow f_6 = 1040$ Hz

$\text{dó7}: f_7 = 2 \cdot f_6 = 2 \cdot 1040 \Rightarrow f_7 = 2080$ Hz

$\text{dó8}: f_8 = 2 \cdot f_7 = 2 \cdot 2080 \Rightarrow f_8 = 4160$ Hz

E as notas dó nas oitavas inferiores:

$$\text{dó3}: f_3 = \frac{1}{2} \cdot f_4 = \frac{260}{2} \Rightarrow f_3 = 130 \text{ Hz}$$

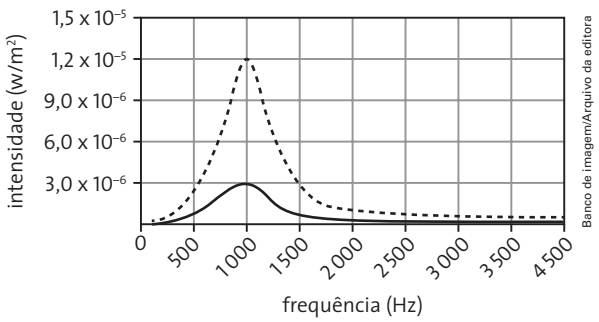
$$\text{dó2}: f_2 = \frac{1}{2} \cdot f_3 = \frac{130}{2} \Rightarrow f_2 = 65 \text{ Hz}$$

$$\text{dó1}: f_1 = \frac{1}{2} \cdot f_2 = \frac{65}{2} \Rightarrow f_1 = 32{,}5 \text{ Hz}$$

b) A nota mais aguda é dó8 (maior frequência) e a mais grave é dó1 (menor frequência).

Alguns exercícios extras podem ser utilizados para tarefas e para avaliação. A seguir, propomos alguns, acompanhados da solução.

3. (Unicamp-SP) O ruído sonoro nas proximidades de rodovias resulta predominantemente da compressão do ar pelos pneus de veículos que trafegam a altas velocidades. O uso de asfalto emborrachado pode reduzir significativamente esse ruído. O gráfico a seguir mostra duas curvas de intensidade do ruído sonoro em função da frequência, uma para asfalto comum e outra para asfalto emborrachado.



a) As intensidades da figura foram obtidas a uma distância $r = 10$ m da rodovia. Considere que a intensidade do ruído sonoro é dada por $I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$, em que P é a potência de emissão do ruído. Calcule P na frequência de 1000 Hz para o caso do asfalto emborrachado.

b) Uma possível explicação para a origem do pico em torno de 1000 Hz é que as ranhuras longitudinais dos pneus em contato com o solo funcionam como tubos sonoros abertos nas extremidades. O modo fundamental de vibração em um tubo aberto ocorre quando o comprimento de onda é igual ao dobro do comprimento do tubo. Considerando que a frequência fundamental de vibração seja 1000 Hz, qual deve ser o comprimento do tubo? A velocidade de propagação do som no ar é $v = 340$ m/s.

Resolução:

a) De acordo com o texto, o asfalto emborrachado pode reduzir significativamente a intensidade do ruído. Assim, para uma frequência de 1000 Hz, obtemos, na curva de menor pico, o valor da intensidade: $3{,}0 \cdot 10^{-6}$ W/m². Com base na relação dada, que relaciona a intensidade e a potência e adotando $\pi = 3$, obtemos o valor da potência:

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} \Rightarrow 3{,}0 \cdot 10^{-6} = \frac{P}{4 \cdot 3 \cdot 10^2} \Rightarrow P = 3{,}6 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

b) De acordo com a equação fundamental da ondulatória e conforme informação do enunciado deste item, obtemos o comprimento do tubo:

$v = \lambda \cdot f$ e $\lambda = 2 \cdot L$

Dessas equações, deduzimos que:

$v = 2 \cdot L \cdot f \Rightarrow 340 = 2 \cdot L \cdot 1000 \Rightarrow L = 0{,}17$ m

4. (Uece) Uma corda de 90 cm é presa por suas extremidades, em suportes fixos, como mostra a figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Assinale a alternativa que contém os três comprimentos de ondas mais longos possíveis para as ondas estacionárias nesta corda, em centímetros.

a) 90, 60 e 30

b) 180, 90 e 60

c) 120, 90 e 60

d) 120, 60 e 30

Resolução:

Em uma corda vibrante, o comprimento de onda correspondente ao modo fundamental (1º harmônico) é o dobro do comprimento da corda. Assim:

$\lambda_1 = 2 \cdot L \Rightarrow \lambda_1 = 2 \cdot 90 \Rightarrow \lambda_1 = 180$ cm

O comprimento de onda correspondente ao segundo harmônico é dado por:

$\lambda_2 = L = 90 \Rightarrow \lambda_2 = 90$ cm

E, para o terceiro harmônico, o comprimento de onda é:

$\lambda_3 = 2 \cdot \frac{L}{3} \Rightarrow \lambda_3 = 2 \cdot \frac{90}{3}$ $\lambda_3 = 60$ cm

Resposta: alternativa **b**.

5. (UFPA) No trabalho de restauração de um antigo piano, um músico observa que se faz necessário substituir uma de suas cordas. Ao efetuar a troca, fixando rigidamente a corda pelas duas extremidades ao piano, ele verifica que as frequências de 840 Hz, 1050 Hz e 1260 Hz são três frequências de ressonâncias sucessivas dos harmônicos gerados na corda.

Se a velocidade de propagação de uma onda transversal na corda for 210 m/s, pode-se afirmar que o comprimento da corda, colocada no piano, em cm, é:

a) 100 d) 50

b) 90 e)30

c) 60

Resolução:

A frequência de uma onda em uma corda é dada por:

$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L}$

Para uma frequência de 840 Hz, o harmônico é n e, para uma frequência de 1050 Hz, o harmônico é $n + 1$. Assim, temos:

$840 = \frac{n \cdot 210}{2 \cdot L} \Rightarrow n = 8 \cdot L$

E, para a frequência de 1050 Hz:

$1050 = \frac{(n+1) \cdot 210}{2 \cdot L} \Rightarrow n = 10 \cdot L - 1$

Igualando as duas expressões, obtemos o comprimento L da corda:

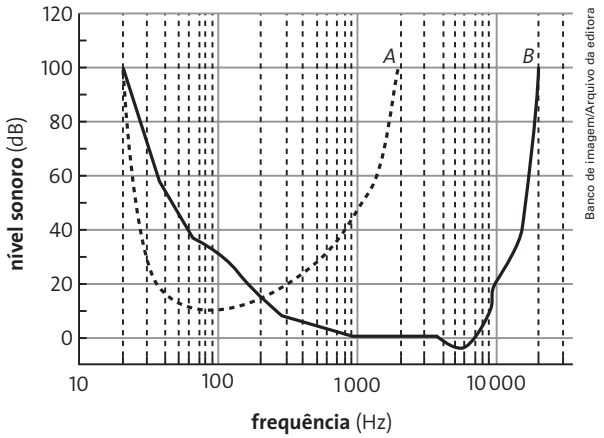
$8 \cdot L = 10 \cdot L - 1 \Rightarrow L = 0{,}50$ m (50 cm).

Resposta: alternativa **d**.

6. (Unicamp-SP) É usual medirmos o nível de uma fonte sonora em decibels (dB). O nível em dB é relacionado à intensidade I da fonte pela fórmula:

Nível sonoro (dB) $= 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0}$, em que $I_0 = 10^{-12}$ W/m² é um valor padrão de intensidade muito próximo do limite de audibilidade humana.

Os níveis sonoros necessários para uma pessoa ouvir variam de indivíduo para indivíduo. No gráfico abaixo estes níveis estão representados em função da frequência do som para os dois indivíduos, *A* e *B*. O nível sonoro acima do qual um ser humano começa a sentir dor é aproximadamente 120 dB, independente da frequência.



Banco de imagem/Arquivo da editora

a) Que frequência o indivíduo *A* consegue ouvir melhor que o indivíduo *B*?

b) Qual a intensidade de frequência I mínima de um som (em W/m²) que causa dor em um ser humano?

c) Um beija-flor bate as asas 100 vezes por segundo, emitindo um ruído que atinge o ouvinte com um nível de 10 dB. Quantas vezes a intensidade I deste ruído precisa ser amplificada para ser audível pelo indivíduo?

Resolução:

a) No gráfico dado na questão, podemos observar que de 20 Hz a 200 Hz, o indivíduo *A* percebe sons de níveis sonoros menores que o indivíduo *B*, o que nos leva a concluir que nesse intervalo, *A* ouve melhor que *B*.

b) Impondo que $10 \cdot \log \frac{I}{10^{-12}} = 120$, obtemos:

$\log I - \log (10^{-12}) = \frac{120}{10} \Rightarrow \log I - (-12) = 12 \Rightarrow$

$\Rightarrow \log I = 0 \Rightarrow I = 1$ W/m²

c) De acordo com o gráfico, na frequência de 100 Hz, o nível sonoro mínimo audível para o indivíduo *B* é 30 dB. Sendo I_1 a intensidade correspondente a 10 dB e I_2 a intensidade correspondente a 30 dB, na equação $\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$, obtemos:

$10 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{10^{-12}} \Rightarrow I_1 = 10^{-11}$ W/m²

$30 = 10 \cdot \log \frac{I_2}{10^{-12}} \Rightarrow I_2 = 10^{-9}$ W/m²

Portanto a relação $\frac{I_2}{I_1}$ vale:

$\frac{I_2}{I_1} = \frac{10^{-9}}{10^{-11}} = 10^2$, ou seja, a intensidade precisa ser ampliada 100 vezes.

Resolução dos exercícios

1 Nesta primeira questão, são dados: $v_{som} = 330$ m/s e $f = 1000$ Hz. Analisando as afirmativas, temos:

I. **Correta**. De acordo com a equação fundamental da ondulatória: $v = \lambda \cdot f$

$330 = \lambda \cdot 1000 \Rightarrow \lambda = 0{,}33 \text{ m} = 33 \text{ cm}$

II. **Correta**. A frequência da onda é igual à frequência da fonte. Portanto, continua sendo 1000 Hz.

III. Incorreta. Na água, a velocidade do som é maior do que no ar (330 m/s), como a frequência é a mesma, o comprimento de onda na água é **maior** do que no ar (33 cm).

IV. **Correta**. De acordo com a tabela 7.1, a velocidade do som na água é 1480 m/s. Como a frequência continua igual a 1000 Hz, o comprimento de onda na água vale:

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow 1480 = \lambda \cdot 1000 \Rightarrow \lambda = 1{,}48 \text{ m}$

2 A atitude do índio é correta porque, de acordo com a tabela 7.1, a velocidade do som no ferro é 5130 m/s e no ar (15 °C) é 340 m/s. Comparando-se os valores, observamos que o som produzido pelo trem através dos trilhos de ferro chega ao índio muito antes do que através do ar.

3 A leitura do gráfico indica que o período do sinal proveniente do apito é 20 μs. Logo, a frequência é de

$$\frac{1}{20 \cdot 10^{-6}} = 50\,000 \text{ Hz}$$

Observando a tabela fornecida, concluímos que o apito pode ser ouvido apenas por gatos e morcegos.

Alternativa **d**.

4 O tamanho do menor inseto que o morcego consegue detectar é igual ao comprimento de onda do chilro emitido pelo morcego. Assim, temos:

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow 300 = \lambda \cdot 60\,000 \Rightarrow \lambda = 0{,}005 \text{ m} = 5 \text{ mm}$

5 O método é considerado válido devido à alta velocidade da luz, em relação a do som. Tomando o momento em que se vê o relâmpago como o "instante zero", uma vez que a velocidade da luz é quase instantânea para uma distância próxima, cada segundo passado corresponderá aproximadamente a 300 m percorridos pelo som, dado que a velocidade do som no ar é aproximadamente 300 m/s. Devido a isso, podemos calcular de forma satisfatória a distância de uma tempestade com base na diferença de tempo entre o relâmpago que vemos e o trovão que se segue.

6 De acordo com os dados, o som demora 0,1 s para ir até o fundo da caverna e voltar ao mergulhador. Portanto, o som demora 0,05 s na ida e 0,05 s na volta. Nessas condições, a profundidade da caverna é:

$h = v_{som} \cdot \Delta t \Rightarrow h = 1400 \cdot 0{,}05 \Rightarrow h = 70 \text{ m}$

7 a) O som que a pessoa ouve **não** corresponde exatamente à marretada que ela vê. Vejamos por quê. A pessoa *A* dá uma marretada a cada 1,0 s. Assim, se o som demorar 1,0 s para ir até a pessoa *B*, quando a pessoa *A* der a marretada seguinte, a pessoa *B* verá essa marretada e ouvirá o som da marretada anterior, simultaneamente. Se o som demorar 2,0 s para ir de *A* até *B*, ela verá uma marretada e o som corresponde a duas marretadas anteriores, e assim o fenômeno se repete desde que o intervalo de tempo gasto pelo som de *A* até *B* seja múltiplo de 1,0 s. Devido ao valor da velocidade da luz (300 000 km/s), estamos desprezando o intervalo de tempo gasto pela luz para ir de *A* até *B*.

b) A distância mínima entre as pessoas corresponde à situação na qual o som demora 1,0 s para ir de *A* até *B*. Portanto, essa distância mínima vale:

$d = v_{som} \cdot \Delta t \Rightarrow d = 340 \cdot 1{,}0 \Rightarrow d = 340 \text{ m}$

8 a) Nesta questão, procuramos ressaltar a relação logarítmica entre a intensidade e o nível sonoro de uma onda. Assim, quando a intensidade do som é multiplicada por 100, o nível sonoro aumenta 20 dB, conforme demonstração a seguir.

Sendo: $I = 100 \cdot I_0$

Substituindo na equação que nos dá o nível sonoro em função das intensidades do som, I e I_0, temos:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \Rightarrow \beta = 10 \cdot \log \frac{100 \cdot I_0}{I_0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \beta = 10 \cdot \log 10^2 \Rightarrow \beta = 10 \cdot 2 \Rightarrow \beta = 20 \text{ dB}$$

Assim, se I_0 corresponde a 0 dB, então I corresponderá a 20 dB; se I_0 corresponde a 30 dB, então I corresponderá a 50 dB.

Poderíamos ter usado diretamente a tabela 7.2 para responder à questão. Observe os seguintes valores da intensidade: 10^{-1} W/m^2; 10^{-3} W/m^2 e 10^{-5} W/m^2. O primeiro é 100 vezes o segundo e este, 100 vezes o terceiro. A diferença entre os níveis sonoros correspondentes é igual a 20 dB.

b) Não é o triplo, mas aumenta proporcionalmente, conforme aumenta o nível sonoro.

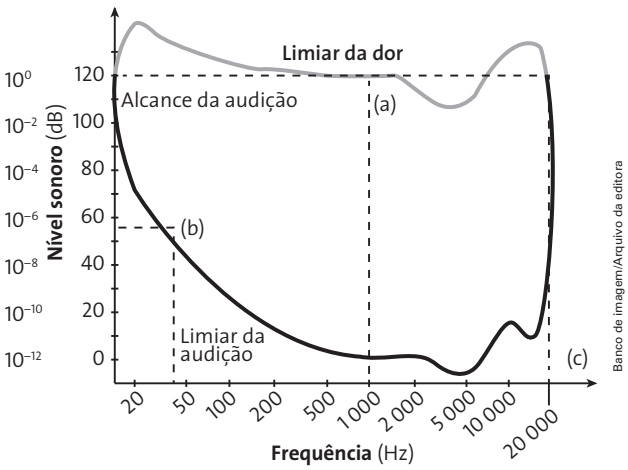
9 a) Na figura, observe a linha cinza que corresponde ao limiar da dor: ela apresenta pequenas oscilações em torno do valor de 120 dB. Assim, constata-se que o valor máximo do nível sonoro ocorre para uma frequência próxima de 1000 Hz.

b) Acompanhe, na figura, o comportamento da linha preta correspondente ao limiar da audição. Para uma frequência de 40 Hz, o valor do nível sonoro correspondente é aproximadamente 55 dB.

c) De acordo com a figura 7.11, um som de frequência próxima de 20 000 Hz tem nível sonoro de 120 dB. Consultando a tabela 7.2, vemos que esse nível sonoro corresponde a um som de intensidade da ordem de 10^0 W/m^2.

Os resultados dos itens **a**, **b** e **c** estão indicados na figura seguinte.

Relação entre o nível sonoro intensidade sonora e a frequência do som



Banco de imagem/Arquivo da editora

10 De acordo com os dados, se um terremoto de magnitude 4 é 10 vezes mais intenso do que um de magnitude 3 e 100 vezes mais intenso do que um outro de magnitude 2, concluímos que um aumento de uma unidade na magnitude de um terremoto significa uma intensidade 10 vezes maior que a anterior. Então, um terremoto de magnitude 6 será:

- 10 vezes mais intenso que um terremoto de magnitude 5;
- 100 vezes mais intenso que um terremoto de magnitude 4;
- 1000 vezes mais intenso que um terremoto de magnitude 3;
- 10000 vezes mais intenso que um terremoto de magnitude 2.

11 A altura de um som está diretamente relacionada à frequência do som: quanto mais alto for o som, maior será sua frequência.

Por outro lado, um som forte ou fraco está relacionado à intensidade do som: quanto mais forte o som, maior sua intensidade.

12 Analisando cada afirmativa, temos:

I. Timbre e intensidade (se os volumes forem diferentes).

II. Intensidade.

III. Altura e intensidade (se os volumes forem diferentes).

IV. Altura.

V. Timbre.

13 Em relação ao grito de uma criança, classificado como **forte e agudo**, o som:

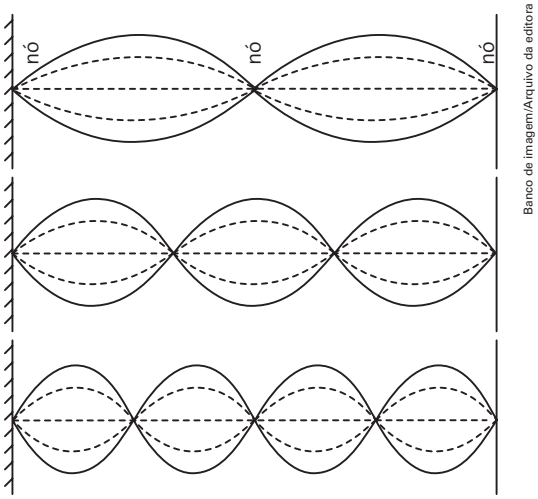
a) do escapamento de uma moto acelerada ao máximo é **forte e grave**;

b) das turbinas de um avião decolando é **forte e agudo**;

c) do ronco de uma pessoa dormindo é **fraco e grave**;

d) das batidas de um martelo contra um pedaço de ferro é **forte e agudo**.

14 A figura seguinte ilustra o segundo, terceiro e quarto harmônicos na corda vibrante.



Banco de imagem/Arquivo da editora

Como o comprimento L da corda é igual a 1,0 m, os comprimentos de onda valem:

2º harmônico: $\lambda_2 = L \Rightarrow \lambda_2 = 1{,}0$ m

3º harmônico: $\lambda_3 = \frac{2}{3} \cdot L \Rightarrow \lambda_3 = \frac{2}{3} \cdot 1{,}0 \Rightarrow \lambda_3 = 0{,}67$ m

4º harmônico: $\lambda_4 = 0{,}5 \cdot L \Rightarrow \lambda_4 = 0{,}5 \cdot 1{,}0 \Rightarrow \lambda_4 = 0{,}50$ m

15 Inicialmente, calculamos a velocidade da onda no fio de aço para uma tensão de 80 N e uma densidade linear dada por

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{3{,}2 \cdot 10^{-3}}{0{,}4} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}$$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{800}{8 \cdot 10^{-3}}} \Rightarrow v \simeq 316{,}227 \text{ m/s}$$

E, a frequência do modo fundamental ($n = 1$) é dada por:

$$f = \frac{n \cdot v}{2L} \Rightarrow f_1 = \frac{1 \cdot 316}{2 \cdot 0{,}40} \Rightarrow f_1 = 395 \text{ Hz}$$

16 Pressionando o centro da corda, o violinista reduz o comprimento da parte vibrante da corda à metade. Com isto, a frequência da nota emitida é o dobro da frequência do modo fundamental:

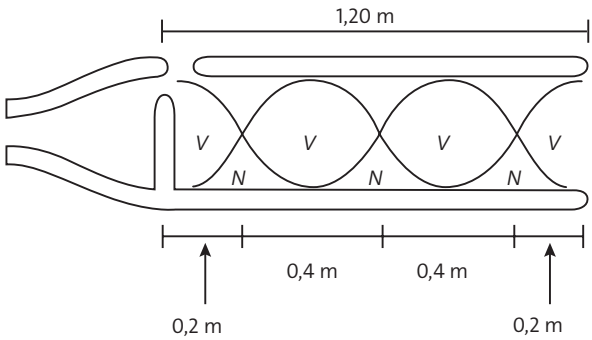
$$f = \frac{v}{2L}$$

$$f' = \frac{v}{2 \cdot \frac{L}{2}} = \frac{v}{L}$$

Comparando f' e f, concluímos que $f' = 2 \cdot f$.

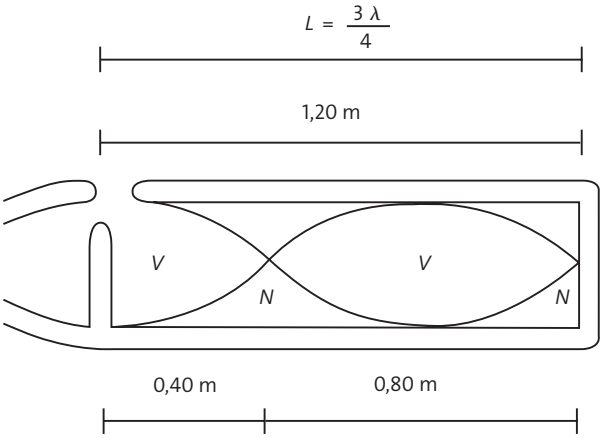
17 De modo geral, os guitarristas desenvolvem, ao longo dos anos, um estilo próprio de executar determinadas melodias. Para isso, eles combinam o som fundamental com diferentes harmônicos e, assim, criam um estilo que os torna inconfundíveis.

18 a) A figura seguinte ilustra o terceiro harmônico em um tubo sonoro aberto, de 1,20 m de comprimento, e as indicações, em metro, das posições dos nós de deslocamento.



Banco de imagem/Arquivo da editora

b) A figura seguinte ilustra o terceiro harmônico em um tubo sonoro fechado, de 1,20 m de comprimento, e as indicações, em metro, das posições dos nós de deslocamento.



Banco de imagem/Arquivo da editora

19 De acordo com os dados, o canal auditivo é considerado um tubo sonoro fechado com 2,4 cm de comprimento. Sendo a velocidade do som no ar igual a 340 m/s, a frequência do som fundamental é:

$$f_1 = \frac{v}{4 \cdot L} \Rightarrow f_1 = \frac{340}{4 \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow f_1 \simeq 3\,542 \text{ Hz}$$

E o comprimento de onda correspondente é:

$$\lambda_1 = 4 \cdot L \Rightarrow \lambda_1 = 4 \cdot 0{,}024 \Rightarrow \lambda_1 = 0{,}096 \text{ m} = 9{,}6 \text{ cm}$$

Como a faixa audível para a audição humana é de 20 Hz a 20 000 Hz, o som obtido acima (3 542 Hz) é audível.

20 De acordo com os dados, a voz humana pode ser considerada como a produzida num tubo sonoro fechado com 17 cm (0,17 m) de comprimento. Sendo a velocidade do som igual a 340 m/s, a frequência do som fundamental é:

$$f_1 = \frac{v}{4 \cdot L} \Rightarrow f_1 = \frac{340}{4 \cdot 0{,}17} \Rightarrow f_1 = 500 \text{ Hz}$$

Como o tubo sonoro é fechado, obtemos somente os harmônicos ímpares. Assim, o terceiro e o quinto harmônicos possuem frequências que são, respectivamente, o triplo e o quíntuplo da frequência fundamental. Portanto:

$$f_3 = 3 \cdot f_1 = 3 \cdot 500 \Rightarrow f_3 = 1500 \text{ Hz}$$

$$f_5 = 5 \cdot f_1 = 5 \cdot 500 \Rightarrow f_5 = 2500 \text{ Hz}$$

21 À medida que um músico toca seu instrumento de sopro, ele injeta ar que normalmente está a uma temperatura diferente do ar no seu interior e, com isso, o instrumento pode soar desafinado. Para contornar o problema, o músico toca seu instrumento antes da apresentação para deixá-lo na temperatura adequada e não desafinar.

22 Durante a aproximação, a frequência percebida aumenta e, durante o afastamento, diminui.

Resposta: alternativa **a**.

23 À medida que o observador se afasta da fonte, a frequência percebida se torna menor do que 440 Hz.

24 $$f' = f \cdot \left[\frac{v_{onda} \pm v_{obs.}}{v_{onda} \mp v_{font}}\right] \Rightarrow f' = 720 \cdot \left[\frac{340+0}{340-20}\right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f' = 720 \cdot \frac{340}{320} \Rightarrow f' = 765 \text{Hz}$$

Retomando

25 a) **Verdadeira**. O som que ouvimos, se propagando no ar, é transmitido por ondas mecânicas longitudinais.

b) **Verdadeira**. Esta é a definição do infrassom.

c) **Verdadeira**. Como a frequência do ultrassom é maior do que a do infrassom e ambos têm a mesma velocidade, o comprimento de onda do ultrassom é menor.

d) **Verdadeira**. Sim, pois é uma onda mecânica.

e) **Verdadeira**. Essa é a classificação em relação às alturas dos sons.

f) **Falsa**. O sons graves têm menor frequência que os sons agudos.

g) **Verdadeira**. A intensidade sonora é proporcional ao quadrado da amplitude.

h) **Verdadeira**. Sons de mesma frequência e amplitude, mas oriundos de instrumentos diferentes, têm diferentes timbres.

Resposta: V V V V V F V V.

26 Podemos aplicar diretamente a expressão: $f_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}}$

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0{,}5} = 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}} \text{ e } n = 4$$

$$f_n = \frac{4}{2 \cdot 0{,}5} \cdot \sqrt{\frac{4}{0{,}01}} \Rightarrow f_n = 80 \text{Hz}$$

Resposta: alternativa **b**.

27 Como os sons têm mesmo comprimento de onda para som fundamental, eles diferem pelo **timbre**, que é determinado pela amplitude relativa dos harmônicos.

Resposta: alternativa **d**.

Aproveite a questão para explicar o que é o **diapasão** (figura seguinte): um instrumento cuja função é emitir um som puro, sem harmônicos, usado em afinações dos instrumentos musicais.



Sergio Dotta Jr/Acervo do fotógrafo

Diapasão colocado na testa de uma pessoa para ela sentir as vibrações pela caixa craniana.

28 a) **Incorreta**. Para tal determinação, têm-se como variáveis a frequência do som emitido e sua interação com os órgãos.

b) **Incorreta**. As ondas utilizadas na ecografia têm natureza de vibração mecânica (som), e são utilizadas no processo de geração de imagens, não a luz. À medida que a onda sonora muda de meio de propagação, muda sua velocidade, e influi no processo de formação de imagens.

c) **Incorreta**. Para tal determinação, têm-se como variáveis a frequência do som emitido e sua interação com os órgãos.

d) **Correta**. A velocidade do som no interior dos tecidos será primordial no processo de formação de imagens, pois a frequência do eco será diretamente proporcional à velocidade do som, o que permite a diferenciá-lo de estruturas decorrente das frequências emitidas por elas, e o tempo em que cada superfície produz o eco permite a determinação da distância entre as estruturas.

e) **Incorreta**. O tempo em que cada superfície produz o eco permite a determinação da distância entre as estruturas, e a frequência em que os pulsos sonoros são emitidos está associada à quantidade de som, e não à intensidade sonora (intensidade é diretamente proporcional à frequência).

29 O período das ondas é: $T = \frac{l}{v} \Rightarrow T = \frac{10}{2} \Rightarrow T = 5 \text{s}$

Como a canoa se movimenta contra o sentido das ondas, podemos escrever:

$$\frac{f'}{f} = \frac{T}{T'} = \frac{v + v_{canoa}}{v} \Rightarrow \frac{5}{T'} = \frac{2+8}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{5}{T'} = 5 \Rightarrow T' = 1 \text{s}$$

Resposta: alternativa **a**.

Compreendendo o mundo

1. Os morcegos, por serem animais de hábitos noturnos, necessitam do auxílio da audição para localização de objetos utilizando o eco, já os golfinhos têm essa necessidade em virtude de habitarem águas turvas.
2. São vibrações de altas frequências, na faixa do ultrassom.
3. No corpo gorduroso, que atua como lente acústica.
4. Para perceber objetos de diferentes dimensões.

5, 6 e 7 Respostas pessoais, de acordo com a profundidade da pesquisa.

UNIDADE 4 – Óptica e informação

CAPÍTULO 8 – Luz e reflexão luminosa

Para iniciar este capítulo, consideramos importante um resumo histórico sobre a Óptica Geométrica desde Euclides e Arquimedes até Albert Einstein com a Teoria Geral da Relatividade. Uma das decorrências dessa teoria é relativa às alterações na trajetória da luz quando passa próxima a um campo gravitacional. O objetivo é mostrar a evolução dos conceitos e o desenvolvimento tecnológico.

Para essa apresentação, sugerimos o artigo "A crônica da Ótica clássica – I", do professor titular da Universidade Federal do Pará José Maria Filardo Bassalo. Selecionamos alguns trechos nos quais ficam evidenciadas as contribuições de Euclides, Arquimedes, Galileu, Fermat e Huygens:

> Com este trabalho iniciamos a Crônica da Ótica Clássica. Nesta primeira parte, que vai de 800 a.C. a 1665 d.C., procuramos mostrar, basicamente, o desenvolvimento da Ótica Geométrica, que é, na literatura usual, a parte da Ótica que estuda os fenômenos luminosos relacionados com a formação de imagens em espelhos e lentes. Começamos com as primeiras ideias dos gregos antigos sobre a natureza da luz e paramos em 1665 d.C., ano em que apareceram os primeiros registros de fenômenos luminosos tais como a interferência e a difração, cujas explicações fazem parte da Ótica Física, ainda segundo a classificação didática da Ótica Clássica.
>
> A luz sempre foi objeto de interesse por parte do homem, desde que tomou consciência de que a noite era ausência da luz do Sol, assim como quando percebeu a existência de pontos brilhantes no céu escuro. Por outro lado então, logo que dominou o fogo, o Homem percebeu que havia uma relação entre a luz e o fogo, já que ambos aquecem e iluminam. No entanto, como a luz parecia um fenômeno muito misterioso, as primeiras civilizações atribuíam sua origem aos Deuses de sua adoração. Assim, para os antigos Egípcios, a luz é Maât, filha de Rá, o Deus Sol, conforme nos fala Jean Rosmorduc em *De Tales a Einstein*. Já para os antigos Hebreus, foi DEUS quem a fez, como se pode ver no livro do Gênesis. Contudo, é com os antigos Gregos que a luz passa a ter uma realidade objetiva, ao perceberem que algo deveria existir no espaço compreendido entre os nossos olhos e os objetos que vemos. Porém, havia uma questão básica: a luz vem dos objetos que vemos ou sai de nossos olhos para os mesmos? Para Homero, poeta grego que viveu no século IX ou VIII a.C., a luz provinha dos olhos (Rosmorduc, op. cit.). Já para o filósofo grego Pitágoras (c.580-c.500 a.C.), segundo Banesh Hoffmannem, *L'Etrange Histoire dês Quanta*, são os olhos que recebem os raios luminosos emitidos por objetos luminosos, tais como: astros, chamas, pirilampos, etc., ou resvalados por objetos não luminosos.[Essa ideia também foi defendida pelo filósofo grego Epícuro de Samos (341-270 a.C.).]
>
> [...] Paralelamente ao estudo da visão e da natureza da luz, os filósofos ocidentais da Antiguidade preocuparam-se, também, com as propriedades óticas das esferas de cristais e de vidro, bem como com as propriedades refletoras das superfícies espelhantes planas e curvas. Espelhos planos e curvos foram também empregados pelos chineses que, juntamente com os gregos, adquiriram tais conhecimentos sobre os mesmos na Mesopotâmia, Índia ou Egito (Cf. Ditchburn, op.cit.).
>
> Os estudos sistemáticos desses fenômenos físicos eram reunidos em duas partes distintas: a Ótica, que estudava a teoria geométrica da percepção visual do espaço e dos objetos nele situados; e a Catóptrica, que estudava principalmente a teoria dos espelhos e alguns fenômenos relacionados com a refração.
>
> [...] Assim, parece haver sido o matemático grego Euclides (c.323-c.285) o primeiro a escrever dois tratados com aquelas duas primeiras denominações. No tratado denominado *Ótica*, Euclides estuda basicamente a visão de objetos de diversas formas, através de algumas definições e de 58 proposições, tendo como ponto de partida a hipótese de Platão sobre a visão. No tratado denominado *Catóptrica*, Euclides descreve o comportamento de raios luminosos refletidos por espelhos planos, côncavos e convexos, usando a mesma metodologia empregada em sua *Ótica*, ou seja, algumas definições e 31 proposições. Contudo, é na *Catóptrica* que Euclides, admitindo trajetória retilínea para o raio luminoso e usando seus *Elementos de Geometria*, apresenta corretamente a Lei da reflexão da Luz: O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, lei essa, válida quer para espelhos planos, quer para espelhos esféricos. Descreve ainda na *Catóptrica* a possibilidade de tornar visível a um observador um anel colocado em um vaso transparente, bastando para tal derramar água no mesmo, conforme se pode ver em Kline (op.cit.) e W.T Sedgwick, H.W. Tyler e R.P. Bigelow, autores de *História da Ciência*.
>
> O estudo da reflexão da luz por espelhos de diversas formas continuou a ser feito por filósofos e matemáticos da Grécia antiga, principalmente o estudo relacionado com os espelhos que apresentam a propriedade de concentrar, em pontos determinados, raios luminosos paralelos incidentes, como ocorre com os espelhos esféricos e os paraboloides de revolução. Assim, quando tais espelhos são voltados para o Sol, o ponto de concentração – foco – fica bastante quente, daí tais espelhos terem recebido a denominação de espelhos incandescentes ou **ustórios** (*burning mirrors*).
>
> **Ustório** – Que queima, inflama. Próprio para queimar; que provoca ou facilita a combustão.
>
> O matemático e inventor grego, Arquimedes de Siracusa (c.287-c.212), em seu livro *Catóptrica*, hoje perdido, faz referência a tais espelhos, principalmente aos em forma de paraboloide de revolução e, mais ainda, provavelmente ele os teria construído em cobre e usado para incendiar os navios romanos que sitiaram sua Siracusa, no ano 214 a.C. Tais espelhos também foram objetos de estudo por parte dos matemáticos gregos, Apolônio de Perga (c.261-c.190) e Diocles (f.c. final do século II a.C.), em livros com o mesmo nome, isto é, *Espelhos Incandescentes*.

[...] Durante a Idade Média, o estudo da Ótica Geométrica esteve intimamente ligado ao da Perspectiva, pois esta, antes de conhecer sua primeira teorização por parte dos pintores e arquitetos do Quattrocento (nas primeiras décadas do século XV), era designada como a Ciência da Ótica (Cf. Pierre Thuillier, op. cit.). Assim é que vários livros que traziam como título a palavra Perspectiva tratavam também da Ótica Geométrica. Por exemplo, Witelo, em seu livro *Perspectiva* – um tratado fundamentado em Ptolomeu e Al-Hazen – escrito por volta de 1274, além de apresentar uma primeira percepção do espaço, descreve também suas experiências relacionadas com a dispersão da luz branca em um prisma hexagonal e em esferas de vidro cheias de água, com as quais abordou o problema das cores do arco-íris. A Ótica, através da perspectiva, também foi objeto de estudo por parte de Biaggio de Parma, no livro *Quaestiones Perspectivae*, escrito por volta de 1390, e por parte do matemático florentino Paolo Toscanelli (1397-1482), em seu livro *Della Prospettiva*, de 1420 (Cf. Thuillier, op.cit.).

Muito embora os espelhos ustórios ou incandescentes fossem conhecidos na Grécia Antiga e vários trabalhos sobre as propriedades das lentes houvessem aparecido depois disso, conforme vimos até aqui, o emprego de lentes para corrigir a visão, isto é, seu emprego como óculos só ocorreu no final da Idade Média, entre 1280 e 1289, no vale do rio Arno, na Itália. No entanto, eles eram muito grosseiros, dando imagens deformadas dos objetos, pois as técnicas de polimento de vidro ainda não eram muito apuradas naquela época (Cf. Sedgwick, Tyler e Bigelow, op. cit.; Rosmorduc, op. cit.).

A melhora na técnica de polimento de vidros, ocorrida durante a Renascença, permitiu que se estabelecesse a profissão de fabricante de óculos. E foram justamente esses profissionais que inventaram os instrumentos ópticos, instrumentos esses que estenderam o emprego da visão: microscópio e telescópio.

O microscópio composto foi inventado pelo holandês Hans Jessen, auxiliado por seu filho Zacharias (1580-c.1638), em 1590. Tal instrumento era um dispositivo bastante primário constituído por uma lente côncava e uma convexa, de pequeno poder de aumento. Um dispositivo semelhante a esse, ou seja, duas lentes colocadas em linha, foi utilizado pelo fabricante de óculos, o holandês Hans Lippershey (c.1570-c.1619), em 1608, para observar um cata-vento de uma torre distante, e com ele perceber então que o cata-vento lhe parecia ampliado, segundo o relato de Tony Osman em *Eureka*!. Como decorrência desse fato, Lippershey construiu vários desses dispositivos, posteriormente denominados de telescópio, como veremos a seguir, e vendeu-os ao governo holandês, já que este estava particularmente interessado em utilizá-los para fins militares.

O uso científico desses dois instrumentos ópticos deve-se, contudo, ao astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642). Ao ouvir falar do instrumento holandês, Galileu compreendeu o seu mecanismo e, em meados de 1609, construiu seu próprio telescópio, constituído de duas lentes de óculos (uma convergente e uma divergente), montadas em dois tubos corrediços de chumbo, e com um aumento equivalente a três diâmetros. Percebendo a importância de tal dispositivo, Galileu passou a polir suas próprias lentes, conseguindo com isso construir telescópios cada vez mais potentes, sendo que o maior que conseguiu construir tinha um diâmetro em torno de 4,4 cm e um poder de aumento de 33 diâmetros. Com tais instrumentos, Galileu fez, no mesmo ano de 1610, uma série de descobertas astronômicas, entre as quais se destacam: as montanhas e crateras da Lua, os satélites de Júpiter, o fato de que a Via Láctea é constituída de uma miríade de estrelas, as fases de Vênus, o caráter distinto de Saturno e as manchas solares.

Com relação ao microscópio, Galileu foi o primeiro a fazer com ele uma observação científica. Conforme nos fala Cortes Pla em seu livro *Galileo Galilei*, por volta de 1612, Galileu utilizou um telescópio às avessas para descrever o olho complexo de um inseto, bem como para descrever a textura das folhas.

[...] Segundo alguns historiadores da Ciência, é no século XVII que o estudo da ótica assume caráter científico com a demonstração correta da Lei da refração da luz. Essa lei havia sido experimentalmente descoberta por Harriot e, independentemente, por Snell (1621), porém sem terem tornado público tal feito, conforme já tivemos oportunidade de relatar. Um primeiro tratamento matemático dessa lei foi feito por Descartes, em 1637, em *La Dioptrique*, escrito como suplemento ao seu famoso *Discours*. Nesse trabalho, Descartes mostra que são os senos e não os ângulos da incidência e de refração que permanecem constantes quando a luz atravessa a superfície de separação de dois meios transparentes. (Segundo Born e Wolf (op. cit.), Descartes provavelmente era conhecedor do trabalho de Snell, porém não fez nenhuma referência a ele naquele suplemento).

Ao estudar a refração da luz através de meios transparentes, Descartes utiliza a teoria corpuscular da luz e conclui que a velocidade da mesma é maior nos meios mais refringentes, isto é, mais densos.

[...] A lei da refração da luz recebeu uma outra demonstração por intermédio de Fermat. Em 1657, ele anunciara em uma carta a Cureaude La Chambre o seu famoso princípio do tempo mínimo: **A natureza sempre escolhe os menores caminhos** (Cf. Born e Wolf, op. cit.). De acordo com este princípio, observou Fermat, a luz leva sempre o menor tempo para seguir a sua trajetória. Conforme vimos anteriormente, esse princípio já havia sido utilizado por Heron e depois por Al-Hazen na descrição da lei da reflexão da luz. Contudo, foi Fermat quem o utilizou para demonstrar a lei da refração da luz, em 1661 (Cf. Kline, op. cit.). Para chegar a essa lei, Fermat teve que formular a hipótese de que as resistências (inverso da velocidade da luz) dos meios mais densos eram maiores que as dos meios menos densos, em frontal desacordo com o ponto de vista de Descartes que afirmava exatamente o contrário, isto é, a velocidade da luz é maior nos meios mais densos.

A hipótese de Fermat foi confirmada pelo físico e astrônomo holandês Christiaan Huygens (1629-1695) no famoso *Traité dela Lumiére* publicado em Paris, em 1678, ao demonstrar, por intermédio de sua teoria ondulatória da luz, que a relação entre os senos dos ângulos de incidência (i) e de refração (r) é igual à relação entre as velocidades da luz nos meios de incidência (v_1) e de refração (v_2).

Apesar dessa demonstração de Fermat, a comunidade científica internacional só começou a aceitar a hipótese de Huygens a partir da formulação matemática da teoria ondulatória da luz realizada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827), formulação essa iniciada em torno de 1814, e posteriormente com a experiência do físico francês Jean-Bernard-Léon-Foucault (1819-1868) realizada em 1850, na qual mostrou que a velocidade da luz na água é menor do que no ar, confirmando, portanto, a hipótese de Fermat. (Os trabalhos de Huygens, de Fresnel e de Foucault serão objeto de estudo na segunda parte desta Crônica da Ótica).

O artigo completo encontra-se no Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, 3(3): 138-159, dez. 1986.
Disponível em: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7905/7271>. Acesso em: 13 abr. 2016.

Você poderá consultar outros dois artigos sobre "A crônica da Ótica clássica", do mesmo autor.

Após essa introdução sugerimos que o interesse dos alunos seja despertado com uma imagem invertida em um espelho.

Procuramos, ao longo do capítulo, atingir os seguintes objetivos:

1. Apresentar os conceitos básicos referentes à luz e os princípios nos quais se baseia a Óptica geométrica;
2. Mostrar que os fenômenos de sombra, penumbra e eclipse decorrem da propagação retilínea da luz;
3. Aplicar as leis da reflexão luminosa às superfícies planas e curvas – espelhos planos e espelhos esféricos –, bem como determinar, geometricamente, as imagens formadas por esses sistemas ópticos.

1. Introdução à Óptica geométrica

Neste tópico destacamos a luz, uma forma de energia que sensibiliza nossos olhos. Trata-se de uma radiação eletromagnética que se propaga tanto nos meios materiais como no vácuo. Sugerimos que quando for definir a unidade ano-luz, relembre com os alunos o conceito de velocidade escalar média e ressaltar que o tempo que a luz emitida pelo Sol leva para chegar ao planeta Terra (8 min 20 s) nos informa que a imagem do Sol, vista por nós em determinado momento, foi formada 8 min 20 s atrás.

Julgamos oportuno que você comente os dados numéricos do livro: a luz emitida pelo Sol nos atinge em 8 minutos e 20 segundos após percorrer 150 milhões de quilômetros. Isso significa que a luz se propaga com uma velocidade de 300 mil quilômetros por segundo e a imagem que temos do Sol foi formada, aproximadamente, 8 minutos atrás. Em Astronomia, os números justificam que as distâncias sejam expressas na unidade denominada **ano-luz**:

1 ano-luz é a distância percorrida pela luz no vácuo em 1 ano.

Utilize o texto disponível em <http://www.bbc.co.uk/portuguese/reporterbbc/story/2008/12/081204_supernovadetychorw.shtml> (acesso em: abr. 2016), como um exemplo para comentar os eventos que ocorrem no Universo e as observações pelos cientistas na Terra.

Em seguida, passamos para a abordagem detalhada de cada um dos assuntos: raios luminosos, feixes de luz, fontes de luz, meios de propagação da luz e fenômenos da propagação da luz. Embora alguns alunos possam julga-lá cansativa, essa abordagem é necessária, pois fornece as bases para o entendimento da Óptica geométrica.

É preciso que os alunos entendam que os três princípios sobre os quais se alicerça a Óptica geométrica – princípio de propagação retilínea da luz, princípio da independência dos raios luminosos e princípio da reversibilidade dos raios luminosos – são suficientes para entender os fenômenos de reflexão e refração luminosas nos espelhos e nas lentes.

Neste tópico, há ainda a discussão sobre a cor de um corpo. Sugerimos iniciar o assunto com a pergunta: Como explicar a variedade de cores dos objetos se todos são iluminados pela mesma luz solar?

Para responder à questão, é preciso explicar o espectro das radiações que compõe a luz branca do Sol. Utilize o arco-íris como exemplo, pois certamente todos os alunos já viram um. Vamos precisar também dos conceitos de reflexão difusa e de absorção. O ponto fundamental é que a nossa percepção de cores depende de alguns fatores, tais como a fonte de luz que ilumina o objeto, a luz refletida difusamente e a nossa sensibilidade visual em relação à luz que recebemos.

Deve ficar claro que só é possível enxergar um determinado objeto porque a luz emitida ou refletida por ele chega aos olhos e o cérebro processa a imagem que chega a ele através do nervo óptico. Assim, não podemos enxergar nenhum objeto que esteja atrás de um meio opaco, pois sua luz não chega aos nossos olhos.

Em obras de ficção determinados super-heróis têm a chamada **visão de raios X**, ou seja, esses raios saem de seus olhos, atravessam meios opacos e lhes permitem ver os objetos por trás deles. Tal situação é impossível, pois os olhos não emitem nenhum tipo de radiação.

Para refletir

Como a luz que recebemos hoje das estrelas foi emitida há muito tempo, vemos o passado. Levamos mais de 4 anos para receber a luz da estrela mais próxima: alfa-centauro.

Física explica

Nessa seção abordamos o tema da impressão colorida, possível por meio do padrão CMYK, resultado do processo subtrativo de cores. Nessa mesma seção, é também abordado o padrão RGB, resultado do processo aditivo de cores.

A seguir, apresentamos as possíveis respostas dos alunos às questões apresentadas no texto:

1. **Cores aditivas primárias**: são cores que adicionadas resultam na cor branca (vermelho + verde + azul).

   Cores subtrativas primárias: são cores que adicionadas resultam na cor preta (magenta + amarelo + ciano).

2. Na superposição das luzes vermelha e verde, obtemos amarelo; na superposição das luzes vermelha e azul, obtemos magenta e, na superposição das luzes verde e azul, obtemos ciano. Finalmente, na superposição das três luzes (vermelha, verde e azul), obtemos branco.

Se julgar necessário aprofundar o tema, sugerimos a consulta ao livro *O guia completo da cor*, de Tom Fraser e Adam Banks, com tradução de Renata Bottini. São Paulo: Senac, 2007. p. 24.

2. Sombra, penumbra e eclipse

Os conceitos de sombra e penumbra são fundamentais para que possamos entender os eclipses parcial e total.

Uma questão que deve ser explorada com os alunos, antes de explicar o ângulo entre o plano de órbita da Lua em relação à Terra e do plano de órbita da Terra em relação ao Sol, é a seguinte: Por que não ocorrem dois eclipses solares por mês, ou seja, nas fases de Lua nova e de Lua cheia?

A partir das respostas dadas pelos alunos, você pode montar, pouco a pouco, a figura que aparece no livro do aluno e concluir, junto com eles, que somente quando a Lua, o Sol e a Terra estão alinhados e a Lua está sobre o plano de órbita da Terra ocorre um eclipse solar.

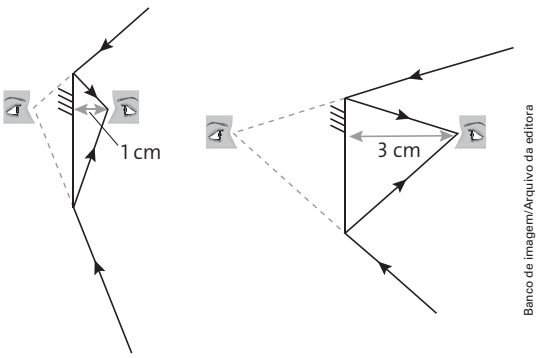
Para os eclipses, sugerimos a leitura do artigo "Eclipses solares e lunares", de Flávia P. Lima, do Museu de Astronomia e Ciências Afins do Rio de Janeiro, e Jaime F. V. da Rocha, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, publicado na revista *Física na Escola*, v. 5, n. 1, 2004. De acordo com os autores, "o artigo apresenta uma proposta de abordagem dos eclipses junto aos alunos, comentando esse fenômeno astronômico muito interessante e que vem cativando a humanidade desde seu nascimento". No final do artigo, os autores apresentam sugestões de atividades muito interessantes para ser trabalhadas.

3. Reflexão luminosa e espelhos planos

Iniciamos o tópico com as leis da reflexão luminosa, válidas tanto para as superfícies planas como para as superfícies curvas.

Nos espelhos planos, o destaque é para a imagem: ela possui exatamente as mesmas dimensões do objeto. São simétricas, ou seja, a distância do objeto ao espelho é igual à distância da imagem ao espelho. Além dessas duas características, as imagens obtidas por meio de um espelho plano não são invertidas, são revertidas (o olho esquerdo de uma pessoa que está posicionada lateralmente a um espelho plano tem o seu reverso representado na imagem pelo olho direito e vice-versa).

É fundamental que o aluno entenda que o **campo visual** não é uma propriedade exclusiva do meio óptico (seja ele um espelho plano ou um espelho esférico), mas depende, principalmente, da posição do observador em relação ao referido meio óptico. A seguir, esboçamos duas ilustrações (fora de escala) que representam o mesmo espelho plano, mas com o observador em posições diferentes em relação a ele. Observe que o campo visual é diferente.



Banco de imagem/Arquivo da editora

Para finalizar esse tópico, sugerimos a apresentação do **princípio de Fermat para a reflexão**. Este princípio, proposto pelo físico e matemático francês Pierre de Fermat (1601-1665), diz que: *O percurso efetuado pela luz para se deslocar entre dois pontos é tal que o tempo gasto nesse deslocamento é mínimo*.

Para a demonstração desse princípio, sugerimos que o professor consulte: TIPLER, Paul A. *Física – Eletricidade, Magnetismo e Óptica*, v. 2, 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000, p. 370.

4. Associação de espelhos planos

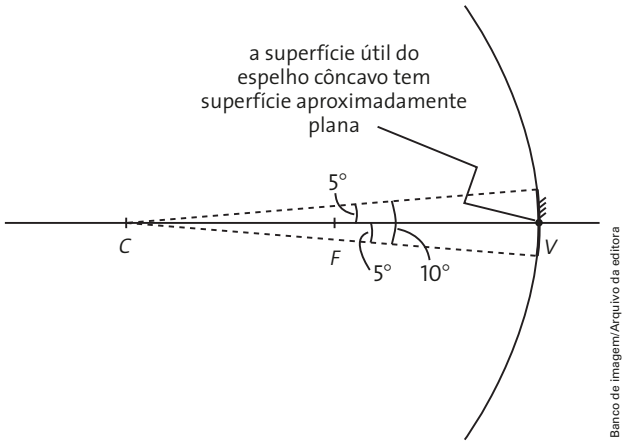
Neste tópico, apresentamos algumas aplicações que envolvem os espelhos planos. Sugerimos que a associação de dois espelhos planos seja apresentada aos alunos na forma de uma demonstração prática. Trata-se de uma atividade interessante realizada basicamente com dois espelhos planos e certamente você não terá dificuldades de realizá-la.

5. Espelhos esféricos

Neste tópico, apresentamos os espelhos esféricos: seus elementos principais, as condições de nitidez de Gauss, os pontos notáveis, os raios notáveis e a cáustica de reflexão.

Em relação às condições de nitidez de Gauss é fundamental que o aluno saiba relacionar as duas condições estabelecidas acima com o espelho plano e entenda por que a escala vertical deve ser alterada para que esquemas que envolvam objetos e imagens sejam mais bem visualizados.

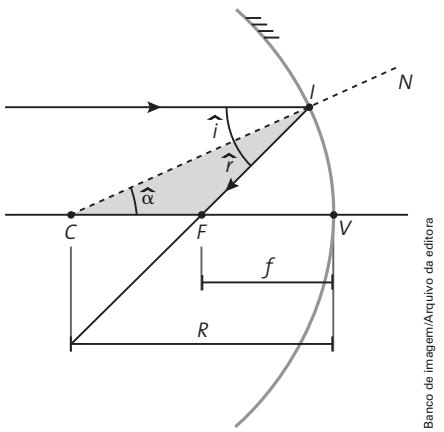
A figura a seguir pode ser utilizada para demonstrar que a superfície útil de um espelho esférico nas condições de nitidez de Gauss é praticamente plana. Em outras palavras, um espelho esférico, nas condições de nitidez de Gauss, torna-se um sistema óptico estigmático (cada ponto objeto conjuga apenas um ponto imagem).



Banco de imagem/Arquivo da editora

Embora a figura mostre um espelho esférico côncavo, as mesmas conclusões são válidas para os espelhos esféricos convexos.

Podemos utilizar as condições de nitidez de Gauss para demonstrar que a distância focal de um espelho esférico é igual a metade do seu raio de curvatura, ou seja: $f = \frac{R}{2}$. Observe a figura a seguir:



Banco de imagem/Arquivo da editora

Na figura, temos:

- $\hat{\alpha} = \hat{i}$ (ângulos alternos internos);
- $\hat{i} = \hat{r}$ (lei da reflexão).

Portanto, o triângulo *CIF* é isósceles. Nessas condições, temos:

$$CF = FI \quad \text{(I)}$$

Lembrando que o espelho deve satisfazer as condições de Gauss, o ponto *I* está bem próximo do ponto *V*, o que nos permite escrever:

$$FI = FV \quad \text{(II)}$$

Finalmente, substituindo (II) em (I), obtemos:

$$CF = FV$$

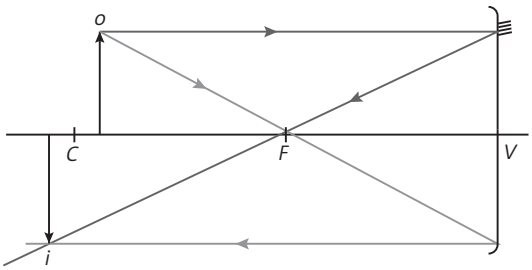
O que implica:

$$R = 2f \Rightarrow f = \frac{R}{2}$$

Entre os raios de luz emitidos por um ponto luminoso e que atingem um espelho esférico, quantos são necessários para se obter a imagem do ponto? Esse é o assunto abordado em raios notáveis.

Lembre aos alunos que, dos três raios notáveis apresentados, bastam dois para se obter a imagem correspondente. Outro ponto que deve ser ressaltado é o fato de que o espelho esférico deve

obedecer às condições de nitidez de Gauss. Assim, nas construções geométricas, a escala vertical deve ser muito reduzida quando comparada à escala horizontal. Portanto, opta-se por uma redução na escala horizontal para que os objetos e as respectivas imagens possam ser mais bem visualizados, conforme mostrado na figura a seguir.



Banco de imagem/Arquivo da editora

6. Construção de imagens

Este tópico aborda a construção geométrica da imagem conjugada por um espelho esférico para um dado objeto. O processo se torna simples quando utilizamos os raios notáveis. Sugerimos que você trate, em sala de aula, de todos os casos referentes às diferentes posições do objeto em relação ao vértice para o espelho côncavo e o único caso para o espelho convexo.

Julgamos interessante comentar sobre a lenda que envolve o nome de Arquimedes na defesa de Siracusa, durante a Segunda Guerra Púnica, em 214 a.C., quando o general romano Marcelus cercou a cidade. Segundo Pierre Thuillier, professor de Epistemologia e História das Ciências na Universidade de Paris:

> Alguns historiadores contaram que, para destruir as galeras inimigas, ele (Arquimedes) concebeu e utilizou "espelhos ardentes", isto é, dispositivos que provocavam incêndios por meio da concentração de raios solares. Esse relato, aceito inicialmente com desconfiança, tornou-se há alguns séculos objeto de vivas contestações. Atualmente prevalece a opinião de que se trata de pura lenda. Mas devemos aceitar esse veredicto como definitivo?

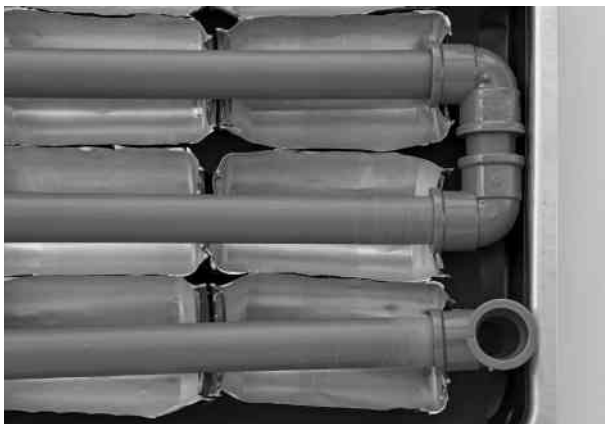
O texto acima é a introdução do Capítulo 1, "Um Enigma: Arquimedes e os Espelhos Ardentes", que se encontra no livro *De Arquimedes a Einstein* – A face oculta da invenção científica. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1994, p. 33.

O assunto pode ser complementado com a resolução do exercício 22, que mostra uma configuração pela qual os espelhos poderiam estar dispostos para produzir a queima das velas dos navios.

A seguir, apresentamos um artigo sobre uma aplicação social e interessante de cortes transversais de latas de alumínio representando espelhos cilíndricos, que por sua vez lembram espelhos côncavos, pois quando raios de luz paralelos incidem neles, concentram a energia luminosa em seu foco. Tal artigo pode ser compartilhado e estudado com os alunos.

Banho aquecido com latinhas – Aquecedor à base de energia solar feito de latas de alumínio é opção para população de baixa renda

> Um painel de latinhas de alumínio que funciona como aquecedor de água está sendo desenvolvido pelo Núcleo de Pesquisa do Centro Universitário de Itajubá (Universitas), em Minas Gerais. O equipamento é uma alternativa para famílias de baixa renda, pois usa energia solar e permite o reaproveitamento de latas de alumínio. O novo aparelho não prejudica a saúde humana e o meio ambiente, além de ter custo muito menor do que os outros aquecedores à base de energia solar. A ideia do aparelho surgiu em fevereiro do ano passado, quando o país vivia um período de crise energética. A equipe de alunos do curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica da Universitas, coordenada pelo físico nuclear Jorge Henrique Sales, fez um levantamento do custo de energia com chuveiro elétrico e os resultados foram espantosos. "Se as famílias de baixa renda substituíssem a energia elétrica pela solar, a economia chegaria a 35%", afirma Sales. Segundo dados do censo de 2000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cerca de 52% das pessoas que têm alguma ocupação no Brasil recebem no máximo dois salários mínimos. "Nossa preocupação é desenvolver opções para reduzir os gastos dessas pessoas", destaca.
>
> Segundo o pesquisador, as latinhas foram usadas porque, ao serem cortadas transversalmente, lembram um espelho côncavo. Os canos que conduzem a água até o chuveiro do usuário são colocados no centro das latas, enfileiradas em uma caixa de metal pintada de preto e vedada com vidro.


Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

O aquecedor de água desenvolvido pela equipe da Universitas usa latas de alumínio cortadas e enfileiradas em uma caixa de metal preta vedada com um vidro, o que permite a absorção da luz solar e gera um aumento de temperatura. Os canos que levam a água até o chuveiro passam por dentro das latas (no detalhe).

> O equipamento combina três efeitos que resultam em um bom aumento de temperatura, capaz de aquecer a água. "As latinhas refletem os raios solares em direção aos canos, a cor negra no fundo da caixa absorve a luz solar e o vidro retém ainda mais o calor por causa do efeito estufa gerado por esse sistema fechado", explica Sales. Segundo ele, o aparelho deve custar aproximadamente R$ 540, contra R$ 3 mil dos aquecedores solares convencionais. Com o desgaste provocado pelo tempo de uso, as latas podem ser recicladas e substituídas por outras. Por enquanto, os testes com o aquecedor de latinhas estão sendo feitos em uma casa experimental, construída pelos estudantes de Engenharia Civil do Centro Universitário de Itajubá, onde todos os aparelhos internos são protótipos de baixo custo. No futuro, a equipe pretende implantar essa tecnologia em uma comunidade carente da cidade mineira. "Nosso objetivo é usar o aparelho para finalidades sociais, melhorando a vida da comunidade de baixa renda", conclui. **Fabíola Bezerra**, Ciência Hoje On-line, 22/08/2007. *Ciência Hoje online*, Rio de Janeiro, ago. 2007.
>
> Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/noticias/tecnologia/banho-aquecido-com-latinhas>. Acesso em: abr. 2016.

7. Estudo analítico dos espelhos esféricos

Como fechamento do capítulo, abordamos o estudo analítico dos espelhos esféricos, com as equações dos pontos conjugados e do aumento linear transversal. É importante ressaltar o conceito de pontos conjugados, especialmente a reversibilidade da luz e que, consequentemente, um ponto objeto (*A*) conjuga um ponto imagem (*A'*) e um ponto objeto (*A'*) conjuga um ponto imagem (*A*).

Não vemos necessidade de demonstrar as duas equações, pois elas envolvem apenas desenvolvimento matemático e são aproximadas. No entanto, se julgar necessário, você poderá consultar os livros referentes à Óptica indicados na bibliografia, como por exemplo, *Física IV* – Ótica e Física moderna, 12ª ed. de Sears & Zemansky.

No exercício resolvido 2, os alunos encontrarão uma referência para a resolução dos dois exercícios propostos neste tópico.

Para que os alunos não fiquem limitados a imaginar que todo objeto e sua respectiva imagem formada por espelhos esféricos sejam constituídas por setas apenas, sugerimos o artigo "Imagens tridimensionais: Formação e análise" de Eden V. Costa e Lucia C. Almeida, que trata da formação de imagens tridimensionais em espelhos e lentes, publicado no *site* da Sociedade Brasileira de Física. Disponível no endereço eletrônico <www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v27_231.pdf>. Acesso em: maio 2016.

Em construção

Nesta seção a nossa homenagem é para o astrônomo, físico e matemático alemão Carl Friedrich Gauss, que viveu de 1777 a 1855. Julgamos interessante ressaltar a precocidade científica de Gauss, que, com 22 anos, completou seu doutorado em Álgebra. No quadro seguinte, apresentamos os principais trabalhos deste que foi considerado o *príncipe dos matemáticos*.

Obras	Área do conhecimento
Disquisitiones Arithmeticae	Matemática
Movimento dos corpos celestes	Astronomia
Óptica Geométrica	Física

Experimento

A nossa sugestão é que esta atividade prática seja realizada em sala de aula como demonstração para os alunos, em razão dos riscos de choques elétricos, pois trata-se da utilização de uma rede elétrica de 120 V.

Em relação às questões propostas, apresentamos as possíveis respostas:

1. A imagem será sempre invertida, podendo ser maior ou menor do que o filamento, conforme sua posição.
2. À medida que o filamento da lâmpada se aproxima do espelho, a imagem é invertida e vai aumentando de tamanho até se tornar um "borrão" no anteparo. No momento em que a imagem se torna um borrão, o filamento da lâmpada está sobre o foco (*F*) do espelho.
3. Os principais erros nessa atividade prática estão na manipulação da trena ou da régua, nas condições da superfície do espelho (grau de acabamento) e nas condições de nitidez da imagem projetada no anteparo.

Trabalho em equipe

Indicamos esse trabalho em equipe após o término do primeiro tópico do capítulo. É importante ressaltar que a câmara escura de orifício pode ser comparada às máquinas fotográficas de filme. Nessas máquinas existe uma lente convergente para que a imagem seja formada no fundo da máquina, exatamente na posição em que se encontra o filme fotográfico e no qual é registrada a imagem.

Se julgar interessante, você poderá montar uma câmara escura de orifício com os alunos. Nesse sentido, sugerimos o artigo "Fotografando com câmara escura de orifício: a óptica e o processo fotográfico na sala de aula", de Carlos E. R. de Souza, João R. Neves e Mikiya Muramatsu, do Laboratório de Óptica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Disponível em: <www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a05.pdf. Acesso em: maio 2016. De acordo com os autores, o trabalho apresentado no artigo "descreve de modo simples o procedimento adotado para montar um laboratório fotográfico de baixo custo utilizando princípios de Óptica geométrica, em especial o princípio da câmara escura de orifício para formar e registrar imagens".

Na parte final sobre câmaras escuras há duas questões bem simples:

A primeira refere-se à semelhança de triângulos. Já a segunda relaciona os princípios da Óptica geométrica que são encontrados na câmara escura. Abaixo seguem as respostas:

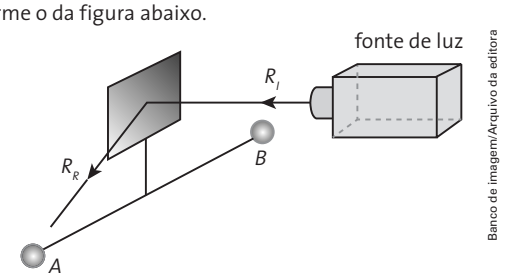
1. Há dois triângulos na figura. O primeiro é formado pela parte superior e inferior do objeto e pelo orifício. O segundo é formado pelo orifício e pelas partes superior e inferior da imagem. Os dois triângulos são semelhantes pelo caso ângulo-ângulo. Assim, temos:
$$\frac{d_o}{o} = \frac{d_i}{i} \Rightarrow \frac{d_i}{d_o} = \frac{i}{o}$$
2. Os princípios envolvidos na câmara são o princípio da propagação retilínea e o princípio da independência dos raios luminosos. Pode-se ver na figura que os raios se propagam de maneira retilínea e independente e formam uma imagem invertida na câmara escura. Isso pode ser verificado experimentalmente.

Atividade complementar

Esta atividade complementar poderá ser realizada como abertura do tópico 3. Sugerimos dividir a sala em equipes de 4 ou 5 alunos. O objetivo é verificar a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão de um feixe de luz que incide em um espelho plano. São necessários uma fonte *laser*, uma superfície horizontal, folha de papel, régua, transferidor e um esquadro.

É de extrema importância alertar os alunos a respeito dos perigos do *laser*: se a luz do *laser* incidir nos olhos, pode causar graves e irreversíveis danos à visão.

Em um plano horizontal, como uma mesa, coloque o espelho plano perpendicularmente. Coloque o *laser* no plano de modo que o feixe incida no espelho. A folha de papel serve como anteparo, para saber onde o *laser* reflete. O aparato experimental deverá ficar conforme o da figura abaixo.



Banco de imagem/Arquivo da editora

R_I é o raio incidente e R_R o raio refletido. O ponto *A* é aproximadamente onde o anteparo (papel) deve ser colocado.

A linha que passa pela fonte de *laser* e vai até o espelho corresponde ao raio incidente. Com o auxílio de uma régua, podemos colocá-la nessa linha imaginária, de modo que fique paralela a esse feixe. O transferidor e o esquadro auxiliarão na medição do ângulo de incidência com relação à normal ao espelho. A seguir, deverá ser feito o mesmo procedimento para a medição do ângulo de reflexão.

Anote os valores dos ângulos de incidência e os correspondentes ângulos de reflexão para 5 diferentes ângulos de incidência, começando com incidência inicial de 15° com relação à normal. As análises podem ir de 15° em 15°.

Peça que cada grupo monte uma tabela com os resultados.

A seguir, podem responder às perguntas:

1. Pela análise da tabela, o que podemos afirmar?
   O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.
2. Quais os possíveis erros nesse experimento?
   Os erros nesse experimento estão relacionados com as medições dos ângulos. Talvez os alunos tenham pouca familiaridade com compassos e transferidores. É interessante que o professor auxilie os alunos a usar esses instrumentos, supervisionando cada grupo.
3. Se o ângulo de incidência for de 0° com relação à normal do espelho, o que acontece com o raio refletido? Isso contraria os resultados inferidos na questão 1?
   Se o ângulo for de 0°, o raio é refletido para seu ponto de origem. O raio refletido terá também um ângulo de 0° com relação à normal do espelho. Assim, o ângulo de incidência continua sendo igual ao ângulo de reflexão.

Resolução dos exercícios

1 A questão, a partir de uma letra de música, explora a interpretação de que, na Física, um ano-luz é uma medida que relaciona a velocidade da luz e o tempo de um ano. Portanto, o ano-luz se refere a uma **distância**.

Resposta: alternativa **c**.

2 A resposta de Luciana está correta. Ao abrir a janela, a radiação solar no interior da sala aumenta, pois parte da luz solar não mais se reflete no vidro da janela. Se julgar conveniente, comente o fato de que a radiação solar é composta, basicamente, de luz visível, infravermelha e ultravioleta. Em virtude de essas radiações apresentarem frequências diferentes, o vidro é transparente à luz visível, mas não ao infravermelho e ao ultravioleta.

3 I. **Correta**. De acordo com a figura mostrada na situação I, temos:

$$\frac{d_i}{d_o} = \frac{i}{o} \Rightarrow \frac{10\text{ cm}}{d} = \frac{5\text{ cm}}{h} \Rightarrow h = \frac{d}{2} \quad \text{(I)}$$

II. Errada. A altura do prédio é sempre a mesma. O que muda é o ângulo de visada α e, consequentemente, o tamanho da imagem na câmara.

III. **Correta**. A altura do prédio é 20 m. Observe que, de acordo com a situação II, podemos escrever:

$$\frac{d_i}{d_o} = \frac{i}{o} \Rightarrow \frac{10\text{ cm}}{d + 10\text{ cm}} = \frac{4\text{ cm}}{h} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h = \frac{2}{5} \cdot (d + 10\text{ m}) \quad \text{(II)}$$

De (I) e(II), concluímos que:

$$\frac{d}{2} = \frac{2}{5} \cdot (d + 10) \Rightarrow d = \frac{4}{5} \cdot d + 8 \Rightarrow \frac{1}{5} d = 8 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d = 40\text{ m}$$

E, de acordo com a expressão (I), obtemos:

$$h = \frac{d}{2} = \frac{40}{2} \Rightarrow h = 20\text{ m}$$

4 a) De acordo com o texto "A cor de um corpo", se um objeto iluminado pela luz branca refletir difusamente apenas a componente verde, ele será visto na cor verde. É isso que ocorre na figura: a lâmina de vidro é iluminada pela luz branca da lâmpada e reflete difusamente apenas a cor verde. Assim, o observador vê a lâmina de vidro na cor verde.

b) O mesmo fenômeno ocorre com a lâmina de plástico: a reflexão difusa da componente verde da luz branca.

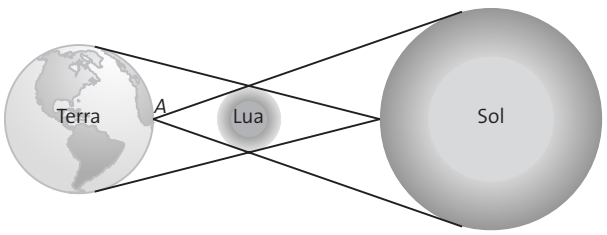
5 Na região *A* ocorre o cruzamento dos três feixes luminosos (vermelho, verde e azul). Essa região será vista na cor branca. Devido à independência dos raios luminosos, os feixes de luz continuam a se propagar como se nada tivesse ocorrido. Portanto, teremos a cor azul na região *B*, a cor verde na região *C* e a cor vermelha na região *D*.

6 No exato momento em que a sombra de uma pessoa de 1,80 m de altura é 60 cm, a sombra projetada de um poste mede 2,00 m. Em relação à pessoa, observamos que o comprimento da sombra é $\frac{1}{3}$ de sua altura. Essa relação também é válida para o poste. Assim, podemos concluir que a altura do poste é 3 vezes o comprimento da sombra, ou seja, 6,00 m.
Mais tarde, o comprimento da sombra do poste diminui 50 cm e, portanto, passa a ter um comprimento de 1,50 m. Neste caso, o comprimento da sombra é $\frac{1}{4}$ do tamanho do poste. A mesma proporção vale para a pessoa. Portanto, o comprimento da sombra da pessoa é $\frac{1}{4}$ de 1,80 m, ou seja, 45 cm.

Resposta: alternativa **b**.

7 Observe na figura que a região de sombra não é atingida por raio algum que provenha da fonte. Logo, de ponto algum dessa região qualquer parte da fonte é visível. Por outro lado, na região de penumbra, sempre é possível ver uma parte da fonte, qualquer que seja a posição do observador.

8 O eclipse solar ocorre na fase de Lua nova, conforme mostra a figura (fora de escala).



Banco de imagem/Arquivo da editora

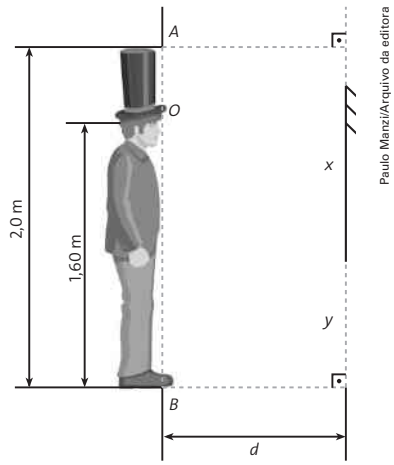
9 a) Uma pessoa colocada no ponto *A*, embora seja dia, não vê o Sol, pois a Lua se interpõe entre eles. Trata-se, portanto, de um eclipse solar.

b) Para a pessoa colocada no ponto *A*, o eclipse é total.

10 a) Quando você está a 3,0 m do espelho, sua imagem também está a 3,0 m do espelho (simetria). Portanto, a distância de você até sua imagem é 6,0 m.

b) Quando você se aproxima do espelho, sua imagem também se aproxima, mas o tamanho de sua imagem não se altera. Nos espelhos planos, o objeto e a imagem têm sempre as mesmas dimensões, independentemente da distância que o objeto esteja do espelho. Entretanto, imagens mais distantes do observador são vistas sob ângulo visual menor.

11 a) Suponhamos que o espelho esteja colocado na posição conveniente. A dimensão que procuramos determinar deve ser tal que não sobre nem falte espelho, tanto na borda inferior quando na superior, conforme mostra a figura abaixo.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

A semelhança entre os triângulos OMN e $OA'B'$ nos permite escrever:

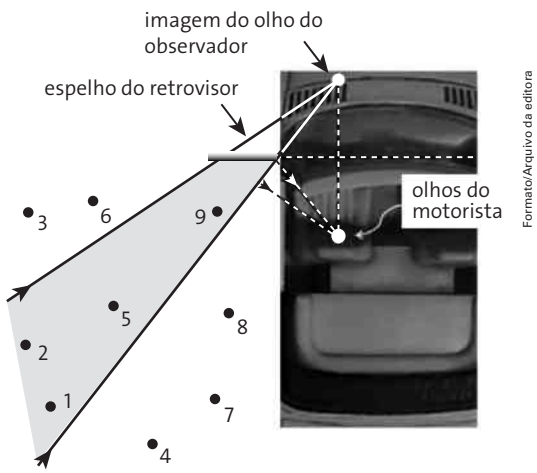
$$\frac{d}{MN} = \frac{2d}{A'B'} \Rightarrow \frac{d}{x} = \frac{2d}{2{,}0} \Rightarrow x = 1{,}0 \text{ m (metade de 2,0 m)}$$

b) Observamos que o triângulo OBB' é semelhante ao triângulo NPB'. Assim, temos:

$$\frac{2d}{1{,}6} = \frac{d}{y} \Rightarrow y = 0{,}80 \text{ m (metade de 1,60 m)}$$

c) Como vemos, as respostas não dependem da distância entre o observador e o espelho (d), mas, cuidado! Isso só é válido neste caso particular.

12 A figura abaixo mostra o campo visual do motorista:

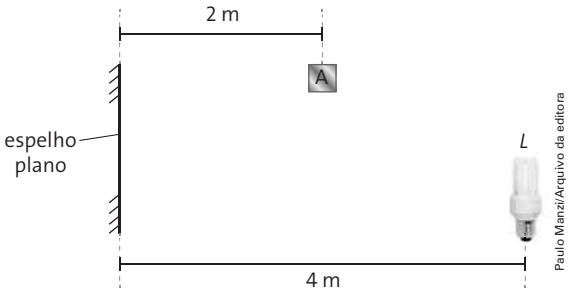


Formato/Arquivo da editora

Os pontos que podem ser vistos pelo motorista são 1, 2, 5 e 9.
Resposta: alternativa **c**.

13 Observe na figura que a primeira reflexão, que acontece no espelho E_1, reverte a imagem do navio O. A segunda reflexão, que acontece no espelho E_2, reverte a imagem que já estava invertida. Portanto, a imagem final será **direita**.

14 a) Usando a propriedade da simetria, construímos as imagens e os raios.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

b) Por simetria, vemos que a distância é igual.

15 O número n de imagens formadas pela associação de dois espelhos planos é dado por $n = \frac{360°}{\theta} - 1$. Sendo $n = 5$, o ângulo θ formado pelas duas portas vale:

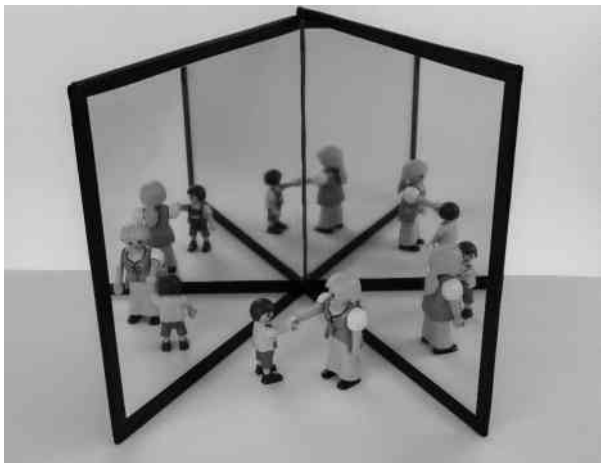
$$5 = \frac{360°}{\theta} - 1 \Rightarrow \theta = 60°$$

16 a) O número de imagem pode ser obtido por:

$$n = \frac{360°}{\theta} - 1 \Rightarrow n = \frac{360°}{60°} - 1 \Rightarrow n = 5 \text{ casais}$$

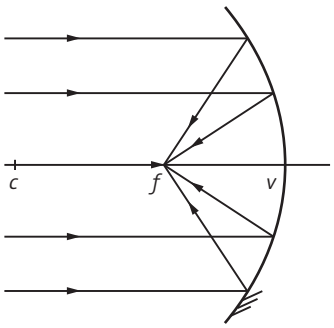
Como, além das imagens, temos o próprio casal objeto, aparecem 6 casais na foto.

b) Das 5 imagens, 3 são revertidas. Assim, são 3 casais.


Sergio Dotta Jr./Acervo do fotógrafo

A foto tirada com o casal e os espelhos planos deve parecer com essa.

17 A figura seguinte ilustra a resolução dos itens **a** e **b** propostos neste exercício.



Como mostra a figura, o filamento da lâmpada deve ser colocado sobre o **foco** do espelho. Nesse caso, a luz será refletida paralela ao eixo principal. Observe que isso só é possível com o espelho **côncavo**.

18 Os raios que estão de acordo com as propriedades dos raios notáveis são os de números I e II.

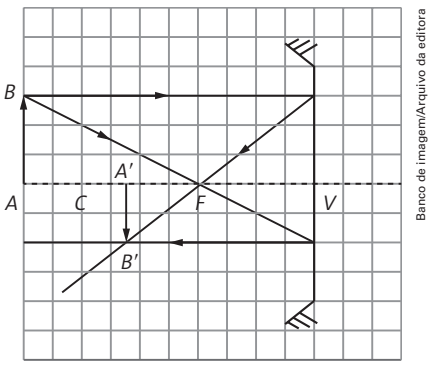
Número I – O raio de luz que incide no vértice de um espelho esférico reflete simetricamente em relação ao eixo principal, de acordo com a propriedade 2 dada na teoria.

Número II – O raio de luz que incide paralelo ao eixo principal de um espelho esférico reflete passando (ou o seu prolongamento) pelo foco do espelho, de acordo com a propriedade 3 dada na teoria.

19 Vejamos, inicialmente, o funcionamento do espelho 1. O raio de luz, emitido pela lâmpada, incide sobre o espelho 1 e reflete sobre si mesmo. De acordo com a propriedade 1, o ponto onde a lâmpada foi colocada é o centro de curvatura desse espelho e está a 24 cm do vértice do espelho. Portanto, $R = 24$ cm. Sendo $f = \frac{R}{2} = \frac{24}{2} = 12$ cm, então a distância focal do espelho 1 é 12 cm.

Para o espelho 2, como o raio luminoso que incide no espelho reflete paralelamente ao eixo principal, temos a propriedade 4: a lâmpada está colocada no foco do espelho. Portanto, a distância focal do espelho 2 é 36 cm.

20 Na figura seguinte, em escala, temos a construção da imagem de acordo com os dados do exercício.



Banco de imagem/Arquivo da editora

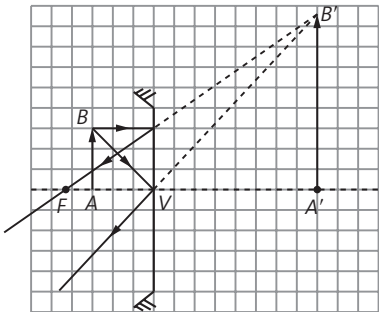
a) De acordo com a figura acima, a imagem $A'B'$ é real, invertida e menor que o objeto AB.

b) Se o objeto for deslocado para pontos mais próximo do vértice do espelho, temos:

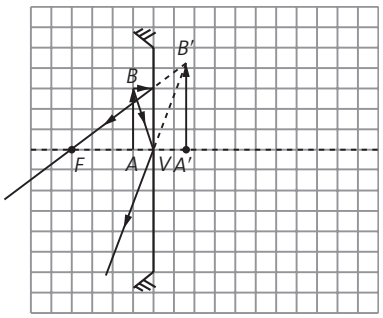
I. De A para C, a imagem desloca-se para a esquerda (se afasta do espelho), se mantém real e invertida, mas aumenta de tamanho. Quando o objeto estiver sobre o ponto C (centro de curvatura do espelho), a imagem apresenta o mesmo tamanho do objeto.

II. Para o objeto colocado entre C e F a imagem desloca-se para a esquerda (se afasta do espelho), se mantém real e invertida, mas aumenta de tamanho, sendo maior que o objeto. Quando o objeto estiver sobre o ponto F (foco principal do espelho), a imagem é imprópria.

III. De F para V, a imagem torna-se virtual, direita e maior que o objeto. À medida que o objeto se aproxima de V (vértice do espelho), a imagem aproxima-se do vértice do espelho, diminui de tamanho, mas ainda se mantém maior que o objeto, conforme mostram as figuras seguintes.



Banco de imagem/Arquivo da editora



Banco de imagem/Arquivo da editora

21 a) Como a pessoa deseja obter uma imagem ampliada do rosto, o espelho deve ser **côncavo**.

b) Para conseguir seu objetivo, a imagem deve ser virtual, direita e maior que o objeto. Para isso, a pessoa deve se colocar entre o vértice (V) do espelho e o foco (F) principal. Portanto, a máxima distância que a pessoa pode ficar do vértice do espelho deve ser ligeiramente menor que 40 cm (distância focal do espelho). Se a distância for exatamente 40 cm, a imagem será imprópria.

22 De acordo com a figura dada, o navio se incendeia quando se encontra exatamente no foco do espelho côncavo, onde se concentra a luz do Sol. Nesse caso, a distância focal do espelho é 50 m. Como o raio de curvatura do espelho é o dobro da distância focal, temos $R = 100$ m.

23 Como o espelho E_1 projeta um feixe de raios praticamente paralelos ao eixo principal, a lâmpada se localiza no foco principal desse espelho. Por outro lado, para melhor aproveitamento dos raios luminosos emitidos pela lâmpada e que incidem no espelho E_2, a lâmpada deve estar colocada no centro de curvatura desse espelho. Assim, temos que a lâmpada se localiza:

a) o foco principal do espelho E_1;

b) no centro de curvatura do espelho E_2.

24 De acordo com as informações do exercício (imagem direita e reduzida), o espelho é convexo. Portanto, a distância focal do espelho é $f = -2{,}0$ m. Para uma pessoa colocada a 2,0 m do espelho ($p = 2{,}0$ m), a abscissa da imagem é dada por:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{-2{,}0} = \frac{1}{2{,}0} + \frac{1}{p'} \Rightarrow p' = -1{,}0 \text{ m}$$

A distância da imagem ao vértice do espelho é 1,0 m.

O tamanho da imagem é dado por:

$$\frac{y'}{y} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{y'}{1{,}70} = -\frac{-1{,}0}{2{,}0} \Rightarrow y' = 0{,}85 \text{ m}$$

A imagem tem altura de 0,85 m (85 cm) e é direita.

25 a) De acordo com os dados do exercício, temos: $f = 40$ cm e $p' = 200$ cm (2,0 m), distância do anteparo ao vértice do espelho. Portanto, a abscissa do objeto (p) vale:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{40} = \frac{1}{p} + \frac{1}{200} \Rightarrow p = 50 \text{ cm}$$

O objeto está colocado a 50 cm do vértice do espelho.

b) Sendo o tamanho do objeto igual a 5,0 cm, o tamanho da imagem vale:

$$\frac{y'}{y} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{y'}{5,0} = -\frac{200}{50} \Rightarrow y' = -20 \text{ cm}$$

O tamanho da imagem é 20 cm (ampliada 4 vezes).

Retomando

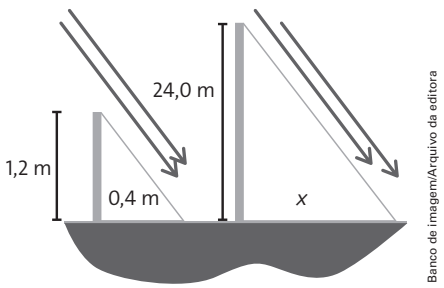
26 Na primeira fotografia, temos um eclipse quase que total. Isso indica que o observador está próximo da região de sombra, podendo ser o ponto III ou o ponto IV. Em virtude do formato da região visível observada, conclui-se que ele se encontra na posição III.

Na segunda fotografia, o observador encontra-se próximo ao término da região de penumbra, pois praticamente ele vê o Sol quase que por inteiro. Como a Lua oculta a parte do Sol à sua esquerda, o observador encontra-se na posição V.

Na terceira foto também o observador se encontra próximo ao término da região de penumbra, mas com a Lua ocultando a parte do Sol à sua direita. Portanto, esse observador encontra-se na região II.

Resposta: alternativa **a**.

27 A figura esquematiza o dados do enunciado.



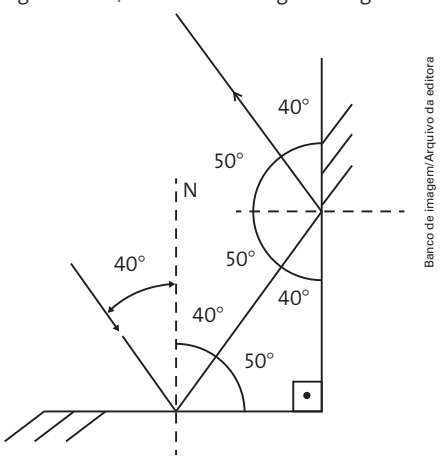
Banco de imagem/Arquivo da editora

Por semelhança de triângulos, podemos escrever:

$$\frac{x}{24} = \frac{0,4}{1,2} \Rightarrow x = 8 \text{ m}$$

Resposta: alternativa **e**.

28 a) Tendo em vista que a soma dos ângulos internos de um triângulo é 180°, construímos a figura a seguir.



Banco de imagem/Arquivo da editora

b) Como o raio incidente e o emergente são ambos inclinados 40° em relação à vertical, eles são paralelos (ângulos correspondentes).

29 Para objetos reais, o espelho esférico convexo conjuga apenas imagens menores, virtuais e direitas. Como o espelho 2 é plano, o 1 é convexo.

Resposta: alternativa **a**.

CAPÍTULO 9 – Refração luminosa

Na abertura deste capítulo, utilizamos um trecho do romance *Cem anos de solidão*, do escritor colombiano Gabriel de Garcia Márquez (1927-2014), originalmente publicado na Argentina em 1967. A inserção de conceitos físicos pelos escritores em suas obras de ficção nos ajuda a compreender a Física como parte da cultura contemporânea, presente em diferentes âmbitos e setores.

Junto com *Ninguém escreve ao coronel*, de 1961, *A incrível e triste história da Cândida Erêndira e sua avó desalmada*, de 1972, *O amor nos tempos do cólera*, de 1985, *Doze contos peregrinos*, de 1992, e *Memórias de minhas putas tristes*, de 2004, Gabriel Márquez tece uma crônica realista e fantástica da América Latina, e foi agraciado com o prêmio Nobel de Literatura em 1982.

As duas questões da abertura traduzem os nossos objetivos neste capítulo. Com os conceitos relativos à refração luminosa, buscamos desenvolver nos alunos habilidades para reconhecer e avaliar o desenvolvimento tecnológico, suas relações com as ciências, sua presença no mundo cotidiano e seus impactos na qualidade de vida das pessoas.

Como ponto de partida, sugerimos algumas questões para avaliar as concepções dos alunos:

- Por que um lápis mergulhado na água parece quebrado? Leve um copo transparente com água para a sala de aula e coloque um lápis para mostrar o fenômeno.
- Como se explica a formação de um arco-íris?
- Como funciona uma lente de aumento?
- O que significa miopia e hipermetropia?

1. Refração luminosa

Para a apresentação do fenômeno da refração luminosa e suas leis, sugerimos a leitura da *História ilustrada da Ciência,* de Colin A. Ronan, Rio de Janeiro: Zahar, da qual destacamos o trecho na página 111:

> [...] Cientificamente, os avanços mais importantes no campo da óptica durante os séculos XVII e XVIII foram os referentes à refração da luz e as teorias sobre a sua própria natureza. De há muito já se sabia que as lentes refratavam a luz, modificando o seu percurso original, mas não se tinha conhecimento da relação precisa entre o ângulo formado pelo feixe de luz incidente e o ângulo formado pelo raio refletido. Entretanto, por volta de 1621, Willibrord Snell (Snellius), de Leiden, descobriu essa relação, conhecida como a "lei do seno", pois usa os senos trigonométricos dos ângulos, embora tenha sido deixada a outros, notadamente Christiaan Huygens e René Descartes, a publicação desse importante resultado.
>
> Se a lei de Snell expressava de modo simples, mas exato, o que acontecia quando a luz se propagava de um meio transparente (ar, água, vidro, etc.) para outro, a razão pela qual ela o fazia era muito mais difícil de se determinar. Com sua filosofia generalizada do mundo natural, podia-se esperar que Descartes tivesse alguma teoria sobre a luz e o motivo por que

ela sofria refração; e certamente tinha. Ele acreditava que a luz era uma força causada por vibrações das partículas das quais ele julgava que todos os corpos eram feitos. Descartes sugeriu também que, embora a luz se propagasse a uma incrível velocidade através do meio transparente que permeava todo o espaço, ela passava mais vagarosamente por substâncias como a água, e ainda mais pelo ar, pois este era menos denso e assim transmitia as vibrações com menos eficiência. Hoje, sabemos que esse ponto de vista é incorreto; quanto mais denso for o meio, mais lentamente a luz passará através dele, mas Descartes não foi o único a interpretar a ideia do ponto de vista das vibrações contíguas das partículas no interior dos corpos e chegar a uma resposta errada. Robert Hooke e Christiaan Huygens chegaram a mesma conclusão.

Julgamos importante a discussão sobre o comportamento da luz mostrado na figura 9.2 do livro e a comparação com um projétil que atravessa um bloco de madeira. Embora não seja oportuno, neste momento, explicar por que isso acontece com a luz, pois envolve considerações sobre Física quântica, você encontrará uma justificativa interessante no livro *Princípios de Física*, vol. 4: Óptica e Física Moderna (tradução da 3ª edição norte-americana) de Raymond A. Servay e John W. Jewett Jr. São Paulo: Pioneira. Thomson Learning, 2004, p. 990.

Em relação à segunda lei da refração, o texto de Colin Ronan justifica o fato de essa lei receber o nome de Lei de Snell-Descartes. No trabalho de Snell, devemos observar que ele buscou, empiricamente, uma lei que se adaptava ao comportamento da luz.

Seria muito interessante, como demonstração, realizar alguns experimentos sobre a refração da luz, com as medidas dos ângulos de incidência e de refração, para que os alunos possam verificar a lei de Snell-Descartes. Para isso, sugerimos o *kit* de Experimentos Ópticos com Apontador *Laser* descrito na *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 22, n. 1, março de 2000, de Ronaldo Celso Viscovini.

Para refletir

As cores possuem diferentes índices de refração porque cada cor corresponde a determinada frequência. Como nos meios materiais ocorre dispersão, as diferentes velocidades acarretam diferentes índices de refração.

Para refletir

Para ser invisível, a pessoa precisaria ter o mesmo índice de refração que o ar. Por ser transparente e não ter absorção na retina, ela seria cega.

Física explica

Nessa seção, o destaque é para a reflexão total, na qual exploramos as fibras ópticas. A seguir, apresentamos as respostas das duas questões propostas:

a) O índice de refração do meio 2 deve ser maior que o do meio 1, para que a reflexão total seja possível.

b) Se o ângulo α for menor do que 45°, o raio de luz sofrerá refração, passando a se propagar no meio 1.

2. Dioptros planos

Com o desenvolvimento deste tópico, você responderá à questão: Por que uma piscina parece mais rasa do que realmente é?

Observe que, na demonstração, utilizamos uma relação que é válida para ângulos até 15°. Sugerimos que você utilize uma tabela trigonométrica para justificar essa atitude.

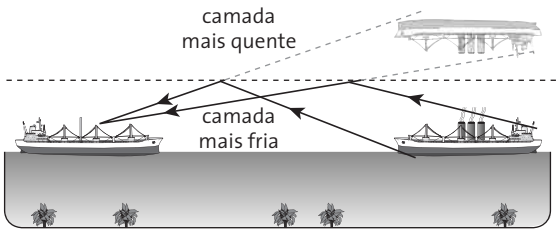
3. Lâminas de faces paralelas e prismas

Neste tópico, sugerimos que você procure não enfatizar as equações matemáticas que geralmente acompanham esses assuntos, mas sim uma análise qualitativa, com destaque para as aplicações práticas.

4. Refração atmosférica e dispersão luminosa

Em relação à refração atmosférica, um ponto que desperta interesse é o relacionado às miragens (espelhismo). Sugerimos que você comente que, embora não seja tão frequente, o espelhismo também pode acontecer nos mares. É possível um marinheiro, pela refração atmosférica, visualizar objetos além da linha do horizonte, como outro navio ou montanhas de gelo. O fenômeno é mais frequente nas regiões polares, onde o ar próximo à superfície é muito frio e a possibilidade de haver camadas superiores mais quentes é maior.

Entre os antigos marinheiros havia uma lenda, provavelmente associada ao fenômeno em discussão, sobre um navio fantasma que assombrava os mares. Ele era conhecido como "O holandês voador", pois a embarcação revertida aparecia nos céus dos mares do norte.



Formato/Arquivo da editora

Esquematização de como o espelhismo levava os marinheiros a ver "o holandês voador".

Para iniciar o item sobre dispersão luminosa, se julgar interessante, você poderá utilizar algumas informações históricas. O texto seguinte poderá auxiliá-lo nessa tarefa.

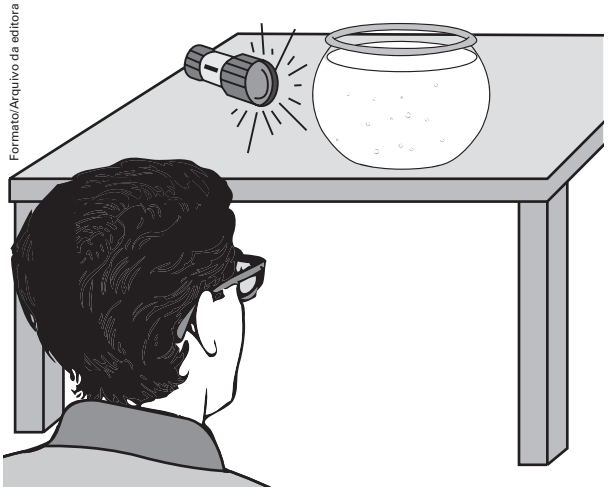
> [...] A teoria de Newton – Isaac Newton (1642-1727) – sobre a luz branca produziu um grande impacto na concepção que o homem tinha de cor. Até o século XVII, muitos fenômenos, a exemplo do arco-íris, ficavam sem explicação completa e satisfatória devido a erros de conceitos sobre as causas das cores. Até a época de Newton, acreditava-se que a luz branca – como a luz solar – era uma luz pura, formada por uma cor única, e atribuíam sua coloração mostrada ao atravessar certo meio (o prisma de vidro, por exemplo), a alguma coisa, nesse meio, que mudava as propriedades da luz, dando-lhe cor. Foi Newton que mudou totalmente esse conceito ao provar que o prisma simplesmente decompunha a luz em seus componentes. Por outro lado, Boyle, – Robert Boyle (1627-1691) – que já havia estudado a formação do espectro colorido, também contribuiu para esclarecer o problema das cores dos corpos ao afirmar que os corpos brancos são os que refletem igualmente toda a luz que recebem, os corpos negros são os que não a refletem e as outras cores são graus intermediários entre esses extremos.
>
> ROCHA, J. F. M. *Origens e evolução das ideias da Física*. Cap. III: Origens e evolução do eletromagnetismo. Salvador: EDUFBA, 2002.

Outro texto que você poderá utilizar apresenta um experimento simples, que pode ser realizado em sala de aula, sobre "as cores do céu".

[...] O passo mais importante na explicação dos fenômenos celestes, quer mecânicos como o movimento da Lua, elétricos como o relâmpago ou ópticos como o arco-íris, é trazê-los para o laboratório, onde são passíveis de experiências. No caso das cores do céu, isso é fácil. Tudo que é preciso é observar a aparência de um raio de luz, digamos de uma lanterna, filtrado através de uma jarra ou de um aquário cheio de água com um pouco de leite dissolvido. Por si só, a lâmpada apresenta uma coloração amarelada, como o Sol. Vista de frente, através da água leitosa, apresenta-se distintamente avermelhada. Vista de lado, a água turva parece azul. Se a lanterna der um giro ao redor da jarra e o olho do observador se mantiver na mesma posição, pode-se observar uma contínua mudança de cor na água, do azul para o vermelho. Diferentes quantidades de leite possibilitam o estudo do efeito com diferentes intensidades.

A chave para a compreensão das diversas e belas cores do céu e seus reflexos nos lagos e oceanos é revelada nessa simples experiência. Nenhum dos ingredientes apresenta as cores vermelha ou azul: a água é clara e translúcida, o leite é branquíssimo e a luz é amarela. Não obstante, o vermelho e o azul estão escondidos no sistema. Um prisma revelaria que todas as cores do arco-íris se misturam na luz do Sol e da lâmpada. O que acontece na água é um processo conhecido como "espalhamento". Parte da luz que entra no vasilhame é transmitida diretamente, enquanto uma outra parte é espalhada pelas minúsculas partículas do leite e expelida para todos os lados, ou até mesmo para trás na direção de onde se originou. Evidentemente, o grau de espalhamento depende da cor: a água se apresenta azul porque as gotículas de leite espalham muito melhor o azul do que as outras cores. O que atravessa o recipiente é a luz amarela roubada de seu componente azul. Como o azul e o vermelho aparecem nas extremidades opostas do espectro do arco-íris, a mistura da luz sem o azul fica desequilibrada e se apresenta mais vermelha do que a mistura original.

Formato/Arquivo da editora



As experiências realizadas com várias substâncias têm demonstrado que a cor espalhada com maior eficiência depende do tamanho das partículas responsáveis pelo espalhamento. Para as partículas muito pequenas, como os glóbulos de leite, a luz azul é espalhada preferencialmente. Para partículas maiores, o efeito se torna menos pronunciado, até alcançar um tamanho que espalhe igualmente todas as cores.

Essas observações levam à suposição de que o céu é azul não porque brilha nessa cor, tampouco por haver um fundo azul por trás dele, mas porque a atmosfera espalha o componente azul da luz do Sol. Quando o Sol está alto, a sua luz atravessa uma fina camada da atmosfera acima. Essa camada não é suficientemente espessa para esgotar muito o azul da luz do Sol. No final da tarde, entretanto, a luz do Sol poente incide obliquamente na atmosfera e segue um caminho muito maior no ar. Espalha-se mais o azul, ficando apenas o vermelho. Daí, discutindo por analogia à experiência caseira, tanto o céu azul, como o pôr do sol vermelho podem ser explicados em termos de um processo fundamental: a dispersão da luz por pequenas partículas. [...]

VON BAEYER, Hans C. *Arco-íris, flocos de neve, quarks*: a Física e o mundo que nos rodeia. Rio de Janeiro: Campus, 1994. p .55-56.

5. Lentes esféricas

Sugerimos que você inicie este tópico com um resumo histórico das lentes. Além das informações citadas no livro, indicamos dois artigos como complemento. O primeiro deles, "Raízes históricas do telescópio", de Sven Dupré, e, o segundo, "A oficina astronômica de Galileu", de Matteo Valleriani. Esses dois artigos encontram-se na Edição Especial nº 33 da *Scientific American Brasil:* "Galileu – O destronamento da Terra".

Segundo Matteo Valleriani, pesquisador do Instituto Max Planck para História da Ciência e da Universidade de Humboldt, em Berlim, a fórmula dos fabricantes de lentes, proposta pelo astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1742), foi formulada por Giovan Francesco Sagredo (1571-1620), amigo de Galileu, em 1613.

6. Instrumentos ópticos

Sugerimos que você aproveite o tema do telescópio para discutir a importância dele para a Astronomia e sua evolução ao longo dos anos. Para isso, a publicação da *Scientific American Brasil* citada no tópico 5 constitui um excelente material de apoio que será útil nas respostas das duas questões propostas.

7. Óptica do olho humano

Para este tópico, sugerimos dois artigos de Guedes, A.F. e outros sobre experimentos que você poderá avaliar a possibilidade de realizar em sala de aula:

1. Simulador didático do cristalino ocular. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 22, n. 1, março, 2000. Nesse trabalho, os autores apresentam a construção e aplicação de um dispositivo que simula o conjunto cristalino-músculos ciliares no olho, que permite reproduzir o mecanismo de acomodação responsável pelo ajuste fino na focalização da imagem na retina;
2. Visualização da miopia, da hipermetropia e do astigmatismo através do simulador didático do globo ocular. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 23, n. 1, março, 2001. Neste trabalho, os autores apresentam novas aplicações do simulador didático do cristalino ocular na reprodução da miopia, hipermetropia e astigmatismo.

Em construção

Nesta seção, prestamos nossa homenagem ao físico, matemático e astrônomo inglês Edmond Halley. Geralmente, quando citamos o nome de Halley, as pessoas o associam ao cometa. Portanto, julgamos importante os alunos conhecerem um pouco da vida e da produção desse cientista com a leitura da obra de Ronaldo Rogério de Freitas Mourão, indicada no livro.

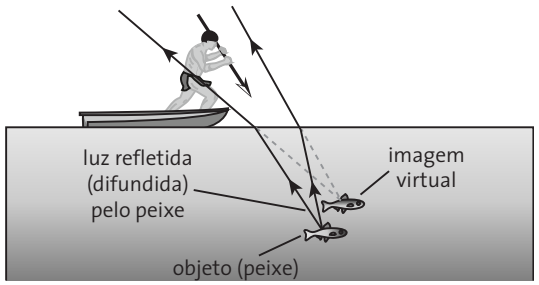
Atividades complementares

1. (Enem) Alguns povos indígenas ainda preservam suas tradições realizando a pesca com lanças, demonstrando uma notável habilidade. Para fisgar um peixe em um lago com águas tranquilas, o índio deve mirar abaixo da posição em que enxerga o peixe. Ele deve proceder dessa forma porque os raios de luz:

a) refletidos pelo peixe não descrevem uma trajetória retilínea na água.
b) emitidos pelos olhos do índio desviam sua trajetória quando passam do ar para a água.
c) espalhados pelo peixe são refletidos pela superfície da água.
d) emitidos pelos olhos são espalhados pela superfície da água.
e) refletidos pelo peixe desviam sua trajetória quando passam da água para o ar.

Resolução:

Os raios refletidos pelo peixe sofrem refração ao passar da água para o ar, conforme mostra a figura. Alternativa **e**.



Formato/Arquivo da editora

2. (UFMT) Uma vela é colocada perpendicularmente ao eixo principal, em duas posições, 30 cm e depois 10 cm, de uma lente esférica delgada convergente de distância focal f=20 cm. A imagem da vela nas duas posições, respectivamente, é:

a) real, direita e maior que a vela; virtual, direita e maior que a vela.
b) virtual, invertida e maior que a vela; real, direita e maior que a vela.
c) virtual, direita e maior que a vela; real, invertida e menor que a vela.
d) real, invertida e menor que a vela; virtual, direita e menor que a vela.
e) real, invertida e maior que a vela; virtual, direita e maior que a vela.

Resolução:

No primeiro caso, no qual a vela é colocada a 30 cm da lente convergente de distância focal igual a 20 cm, a abscissa da imagem é dada por:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{20} = \frac{1}{30} + \frac{1}{p'} \Rightarrow p' = 60 \text{ cm}$$

Neste caso, a imagem **é real, invertida e maior** que o objeto, pois $p' > p$.

E, no segundo caso, no qual a vela é colocada a 10 cm da mesma lente convergente, a abscissa da imagem vale:

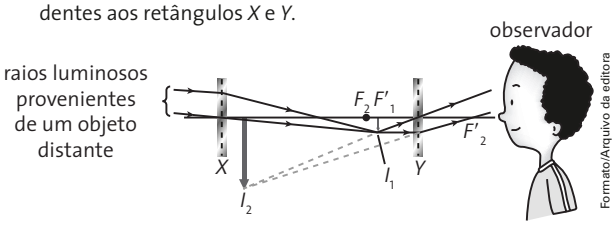
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{20} = \frac{1}{10} + \frac{1}{p'} \Rightarrow p' = -20 \text{ cm}$$

Neste segundo caso, a imagem é **virtual, direita e maior** que o objeto, pois, em módulo, $p' > p$.

Resposta: alternativa **e**.

3. (UFRN) O telescópio refrator é um sistema óptico constituído, basicamente, de duas lentes: a objetiva, cuja função é formar uma imagem real e reduzida do objeto em observação, I_1, nas proximidades do foco, F_1, e a ocular, que usa essa imagem como objeto, nas proximidades de seu foco, F_2, para formar uma imagem virtual e ampliada, I_2. Esta última é a imagem do objeto vista pelo observador.

A figura seguinte representa um desses telescópios, no qual as duas lentes se acham localizadas nas posições correspondentes aos retângulos *X* e *Y*.



Formato/Arquivo da editora

As lentes objetiva (*X*) e ocular (*Y*) que melhor se adaptam a esse telescópio devem ser:

a) ambas convergentes.
b) ambas divergentes.
c) respectivamente, convergente e divergente.
d) respectivamente, divergente e convergente.

Resolução:

De acordo com o enunciado da questão, ambas as lentes devem ser **convergentes**. A objetiva, por formar uma imagem real, e a ocular, por formar uma imagem ampliada.

Resposta: alternativa **a**.

Resolução dos exercícios

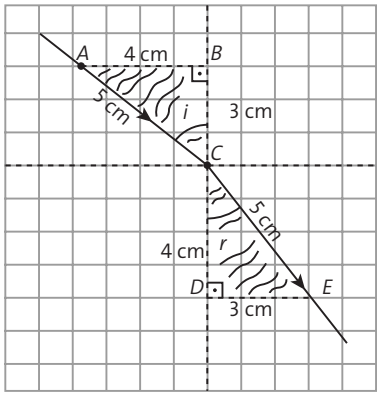
É importante que os alunos tenham em mãos uma tabela trigonométrica para a resolução dos exercícios. Em alguns casos especiais, utilizamos a tabela seguinte:

Ângulo	Seno	Cosseno
30°	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
45°	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$
60°	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$

1 a) Dos três meios dados, a velocidade da luz é menor no meio *A* e maior no meio *C*. Portanto, o meio *A* é o mais refringente e o meio *C*, o menos refringente.

b) De acordo com o item **a**, os índices de refração absolutos dos meios obedecem a relação: $n_A > n_B > n_C$.

2 a) Com base na figura seguinte, obtemos os senos dos ângulos de incidência e do ângulo de refração.



Banco de imagem/Arquivo da editora

No triângulo retângulo *ABC*:

$\text{sen } i = \frac{4}{5} \Rightarrow \text{sen } i = 0{,}8$

E, no triângulo retângulo *CDE*:

$\text{sen } r = \frac{3}{5} \Rightarrow \text{sen } r = 0{,}6$

b) O índice de refração absoluto do líquido utilizado no experimento vale:

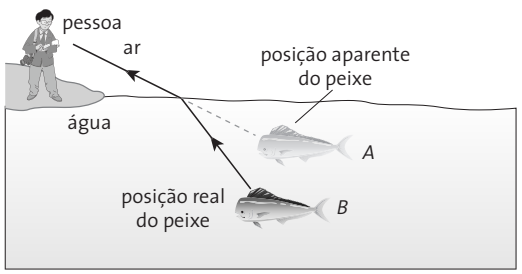
$n_{ar} \cdot \text{sen } i = n_{líquido} \cdot \text{sen } r \Rightarrow 1 \cdot 0{,}8 = n_{líquido} \cdot 0{,}6 \Rightarrow$

$\Rightarrow n_{líquido} = \frac{4}{3} > 1{,}33$

3 a) No ponto I, a luz do farol, propagando-se no plástico, incide na superfície de separação com o ar e não sofre refração, retornando para o plástico. Portanto, nesse ponto, ocorre **reflexão total**. No ponto II, a luz passa do plástico para o ar. Assim, nesse ponto, ocorre **refração**.

b) Para que ocorra reflexão total no ponto I, o índice de refração absoluto do plástico deve ser **maior** que o índice de refração absoluto do ar.

4 A figura seguinte mostra a trajetória de um raio de luz vindo do peixe até a pessoa.



Formato/Arquivo da editora

a) Usando um raio luminoso, a pessoa deve apontar exatamente para a posição aparente do peixe, ponto *A*, pois o raio de luz percorre a mesma trajetória do raio que veio do peixe até a pessoa.

b) Se a pessoa utilizar uma lança para atingir o peixe, ela deve mirar para um ponto abaixo da posição (aparente) na qual ela vê o peixe, ou seja, ela deve mirar no ponto *B*. Na realidade, a pessoa não vê o ponto *B*. A prática faz com que ela consiga avaliar quanto abaixo da posição aparente o peixe se encontra.

5 Vamos supor que os azulejos tenham sido assentados um encostado no outro, sem folga entre eles. Como os azulejos são quadrados, têm 10 cm de lado e existem 20 azulejos da borda até o fundo da piscina, podemos afirmar que a profundidade real (h_{real}) da piscina é:

h_{real} = nº de azulejos × comprimento do azulejo ⇒

$\Rightarrow h_{real} = 20 \cdot 10 \Rightarrow h_{real} = 200 \text{ cm} = 2{,}0 \text{ m}$

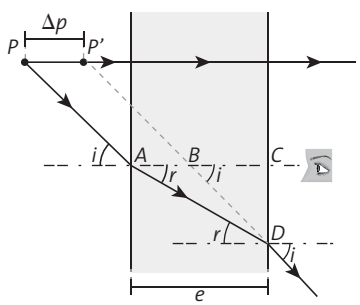
E, a profundidade aparente ($h_{aparente}$) da piscina vista pela pessoa é:

$$\frac{h_{aparente}}{h_{real}} = \frac{n_{ar}}{h_{água}} \Rightarrow \frac{h_{aparente}}{2{,}0} = \frac{1}{\frac{4}{3}} \Rightarrow h_{aparente} = 1{,}5 \text{ m}$$

6 Neste caso, a pessoa está dentro da água olhando para um objeto fora da água e que se encontra a 1,2 m de altura em relação ao nível da água. A altura aparente desse objeto visto pela pessoa é dada por:

$$\frac{h_{aparente}}{h_{real}} = \frac{n_{ar}}{h_{água}} \Rightarrow \frac{h_{aparente}}{1{,}2} = \frac{4}{\frac{3}{1}} \Rightarrow h_{aparente} = 1{,}6 \text{ m}$$

7 De acordo com a figura seguinte, a imagem (*P'*) de um objeto (*P*), vista por um observador através de uma lâmina de faces paralelas é:

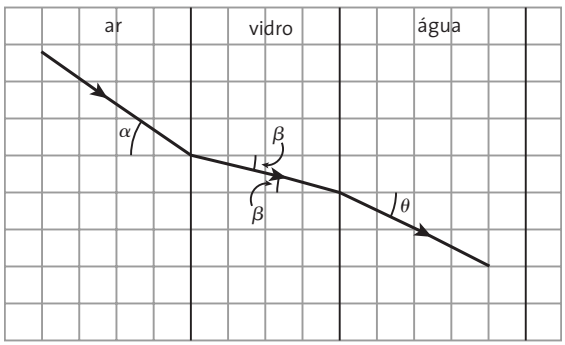


Banco de imagem/Arquivo da editora

a) virtual;

b) mais próxima da lâmina.

8 a) A figura seguinte mostra a trajetória do raio de luz, desde o ar até a água, passando pela camada de vidro.



Banco de imagem/Arquivo da editora

b) Se acontecer a reflexão total, ela só pode ser na superfície de separação do vidro com a água, pois o vidro é mais refringente que a água. Para que aconteça a reflexão total, devemos ter $\theta = 90°$. Nessas condições, o ângulo β deve ser igual ou maior que:

$n_{vidro} \cdot \text{sen } \beta = n_{água} \cdot \text{sen } 90° \Rightarrow 1{,}5 \cdot \text{sen } \beta = 1{,}3 \cdot 1 \Rightarrow$

$\Rightarrow \text{sen } \beta > 0{,}866 \Rightarrow \beta > 60°$

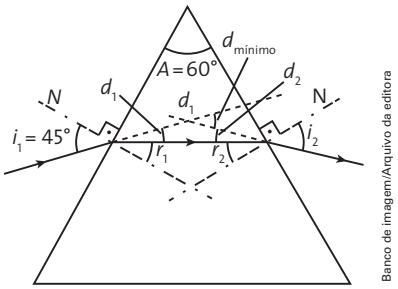
E, para um ângulo $\beta = 60°$, o ângulo α com que o raio incide na superfície de separação entre o ar e o vidro deve ser igual a:

$n_{ar} \cdot \text{sen}\,\alpha = n_{vidro} \cdot \text{sen}\,\beta \Rightarrow 1 \cdot \text{sen}\,\alpha = 1{,}5 \cdot 0{,}866 \Rightarrow$

$\Rightarrow \text{sen}\,\alpha \simeq 1{,}3$

Como o maior valor do seno de um ângulo é 1, concluímos que **não** existe possibilidade de esse raio de luz sofrer reflexão total.

9 a) A figura seguinte mostra a trajetória do raio de luz que atravessa o prisma e obedece à condição de desvio mínimo.



Banco de imagem/Arquivo da editora

b) Para obter o índice de refração absoluto do prisma, inicialmente devemos lembrar que, se o desvio é mínimo, os ângulos r_1 e r_2 têm a mesma medida: $r_1 = r_2$. Sendo $A = r_1 + r_2 = 60°$, obtemos: $r_1 = r_2 = 30°$.

Aplicando a lei de Snell-Descartes na primeira face, obtemos:

$n_1 \cdot \text{sen}\,i = n_2 \cdot \text{sen}\,r \Rightarrow n_{ar} \cdot \text{sen}\,45° = n_{prisma} \cdot \text{sen}\,30° \Rightarrow$

$\Rightarrow 1 \cdot \dfrac{\sqrt{2}}{2} = n_{prisma} \cdot \dfrac{1}{2} \Rightarrow n_{prisma} = \sqrt{2}$

10 a) O raio luminoso, ao atravessar o prisma, sofre **duas refrações**, nas duas faces que representam os catetos do triângulo retângulo, e uma **reflexão total**, na face que representa a hipotenusa do triângulo retângulo.

b) No ponto de reflexão total vale a relação:

$\text{sen}\,i_L = \dfrac{n_2}{n_1} \Rightarrow \text{sen}\,45° = \dfrac{n_{ar}}{n_{prisma}} \Rightarrow \dfrac{\sqrt{2}}{2} = \dfrac{1}{n_{prisma}} \Rightarrow$

$\Rightarrow n_{prisma} = \sqrt{2}$

11 Pela Lei de Snell:

$n_1 \cdot \text{sen}\,\alpha = n_2 \cdot \text{sen}\,\beta \Rightarrow 1 \cdot 0{,}9 = 1{,}5 \cdot \text{sen}\,\alpha \Rightarrow \text{sen}\,\alpha = 0{,}6$

Aplicando a relação fundamental da trigonometria, temos:

$\text{sen}^2\,\alpha + \cos^2\alpha = 1 \Rightarrow 0{,}6^2 + \cos^2\alpha = 1 \Rightarrow$

$\Rightarrow \cos^2\alpha = 1 - 0{,}36 = 0{,}64 \Rightarrow \cos\alpha = 0{,}8$

Como no triângulo retângulo, $\cos\alpha = \dfrac{CA}{CO}$, vem:

$\cos\alpha = \dfrac{4}{d} \Rightarrow 0{,}8 = \dfrac{4}{d} \Rightarrow d = 5{,}0\text{ cm}$

12 A frase é **verdadeira**. Em dias muito ensolarados, o ar próximo ao asfalto fica menos denso (menos refringente) que o ar das camadas superiores. Assim, as ondas luminosas, ao passar de um meio mais refringente para um menos refringente, podem sofrer reflexão total, dando a impressão que o asfalto está molhado.

13 Analisando cada afirmativa, concluímos que:

I. **Certo**. De acordo com a figura dada, na decomposição da luz branca, o vidro apresenta o menor índice de refração absoluto para a luz vermelha. Assim, a luz vermelha é a que sofre menor desvio.

II. **Certo**. De acordo com a figura.

III. **Certo**. O índice de refração absoluto do vidro para a luz verde é maior do que para a luz amarela.

14 O fenômeno citado ocorre depois que a luz sofre sucessivas refrações com subsequente reflexão total.

Resposta: alternativa **d**.

15 Analisando cada uma das afirmativas, obtemos:

I. Errada. A pessoa deve estar de costas para o Sol.

II. **Certa**. De acordo com o texto no livro.

III. **Certa**. De acordo com o texto no livro.

16 a) Para se produzir fogo em pedaços de papel utilizando uma lente e a luz solar, a lente necessita ser **convergente**.

b) Os pedaços de papel devem ser colocados no **foco imagem** da lente.

17 a) A lente que possui maior distância focal possui menor convergência. Portanto, a lente utilizada para o olho direito, com distância focal de 40 cm, tem maior convergência que a lente utilizada para o olho esquerdo, com distância focal de 50 cm.

b) Quanto maior a convergência de uma lente, maior a sua capacidade de desviar a luz. Como a lente com distância focal de 40 cm tem maior convergência que a lente com distância focal de 50 cm, ela tem maior capacidade de desviar a luz.

18 a) A imagem da vela é **real** e **invertida**, pois a imagem foi projetada em uma tela.

b) Como as distâncias da vela à lente e da lente à tela são iguais, escrevemos:

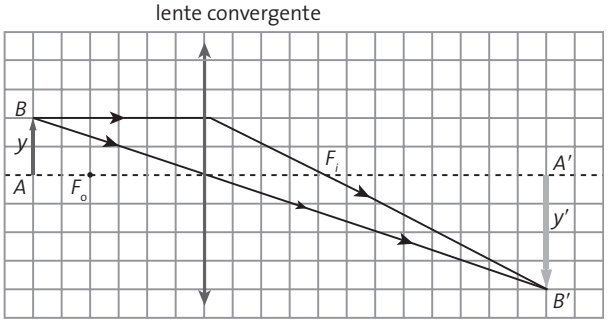
$p = p' = 30\text{ cm}$

E a distância focal (f) da lente é dada por:

$\dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{p} + \dfrac{1}{p'} \Rightarrow \dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{30} + \dfrac{1}{30} \Rightarrow f = 15\text{ cm}$

19 a) Com os dados do exercício, construímos a figura seguinte:

lente convergente



Banco de imagem/Arquivo da editora

De acordo com a figura, a imagem é **real** e **invertida**.

b) A abscissa da imagem (p') é dada por:

$\dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{p} + \dfrac{1}{p'} \Rightarrow \dfrac{1}{4} = \dfrac{1}{6} + \dfrac{1}{p'} \Rightarrow p' = 12\text{ cm}$

E, o tamanho da imagem (y') é dado por:

$\dfrac{y'}{y} = -\dfrac{p'}{p} \Rightarrow \dfrac{y'}{2} = -\dfrac{12}{6} \Rightarrow y' = -4\text{ cm}$

O sinal ($-$) indica que a imagem é invertida.

20 A imagem fornecida pela lupa é virtual e direita. Como a abscissa do objeto é 2,0 cm e a imagem está ampliada 5 vezes, a abscissa da imagem é −10 cm. Portanto, a distância focal da lente é dada por:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{2} + \frac{1}{-10} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f = 2{,}5 \text{ cm} = 0{,}025 \text{ m}$$

E, a convergência (C) da lente, em dioptrias, vale:

$$C = \frac{1}{f} \Rightarrow C = \frac{1}{0{,}025} \Rightarrow C = 40 \text{ di}$$

21 a) Para a luneta, as duas lentes devem ser **convergentes**.

b) A lente objetiva deve ser de grande distância focal e a lente ocular de pequena distância focal. Assim, a lente L_1, com distância focal de 20 mm, é a **ocular** e a lente L_2, com distância focal de 1000 mm, é a **objetiva**.

22 a) Com base na figura dada, a lente **1** funciona como **objetiva** e a lente **2** como **ocular**.

b) A imagem I_1, conjugada pela lente 1 (objetiva), é real e invertida. Essa imagem serve de objeto para a lente 2 (ocular), que conjuga uma imagem final virtual, direita em relação à imagem I_1, mas invertida em relação ao objeto. É essa imagem, I_2, que será vista pelo observador.

23 Na câmera fotográfica, a distância entre o centro óptico da lente e o plano do filme corresponde à abscissa da imagem (p'), que é obtida por meio da expressão:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{50} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{p'} \Rightarrow p' \simeq 52{,}6 \text{ mm}$$

A distância entre o centro óptico da lente e o plano do filme é 52,6 mm.

24 a) Como a função do projetor de *slides* é projetar em uma tela uma imagem real e ampliada do objeto, a distância do *slide* à lente deve ser **maior** que a distância focal da lente.

b) Para um *slide* colocado a 5,0 cm da lente e uma ampliação igual a 10, as abscissas do objeto e da imagem valem, respectivamente:

$p = 5{,}0$ cm e $p' = 50$ cm

A distância focal (f) da lente é dada por:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{5} + \frac{1}{50} \Rightarrow f \simeq 4{,}5 \text{ cm}$$

25 Analisando cada afirmativa, concluímos que:

I. **Certo**. Trata-se do ponto remoto situado no infinito. Nessa situação, o cristalino está relaxado e a visão ocorre sem esforço de acomodação.

II. Errado. O cristalino é uma lente biconvexa que projeta na retina uma imagem real e **invertida** do objeto visualizado.

III. **Certo**. A função da pupila é restringir a passagem de luz na região próxima ao eixo óptico, para melhor nitidez. Se a quantidade de luz no ambiente é pequena, a pupila se dilata e permite a passagem de mais luminosidade, embora com algum sacrifício da nitidez. É por isso que temos dificuldade de ler em ambientes pouco iluminados. Por outro lado, se a quantidade de luz for muito intensa, a pupila se contrai.

26 Para o ponto remoto (objeto no infinito), a convergência do cristalino é mínima e vale 50 di. Para o ponto próximo (objeto a 25 cm do cristalino), a convergência do cristalino é máxima e vale 54 di. Como a distância focal é o inverso da convergência, ela é maior para o ponto remoto do que para o ponto próximo. Assim, ao passar do ponto remoto para o ponto próximo, a distância focal do cristalino deve **diminuir** para que a convergência aumente.

27 a) Como a dificuldade de visão é para pontos distantes, a pessoa tem miopia. A lente corretora deve ser divergente.

b) Para a miopia, a convergência da lente corretora pode ser obtida por:

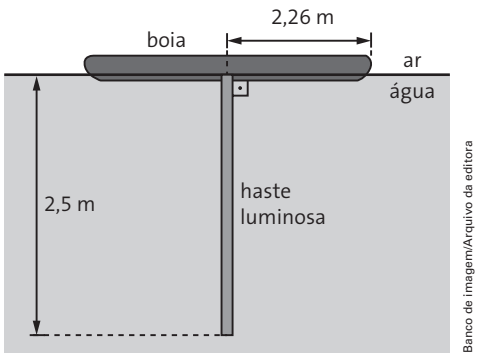
$$C = \frac{1}{d_r} \Rightarrow C = \frac{1}{-0{,}4} \Rightarrow C = -2{,}5 \text{ di}$$

28 a) Como a receita de Rafael prescreve lentes esféricas com dioptria positiva para ambas as vistas, ele apresenta **hipermetropia**. Mas ele apresenta também **astigmatismo**, devido à receita de lentes cilíndricas.

b) Para o olho direito, a convergência da lente esférica é +5,50 di e, para o olho esquerdo, +5,00 di. Como a distância focal é o inverso da convergência, a lente receitada para o **olho esquerdo** tem maior distância focal que a receitada para o olho direito.

Retomando

29



fora de escala

$$\text{sen } \alpha = \frac{1}{\frac{4}{3}} \Rightarrow \text{sen } \alpha = \frac{3}{4} \Rightarrow \text{sen } \alpha = 0{,}75 \Rightarrow \text{tg } \alpha = 1{,}13$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{R}{L-h} \Rightarrow 1{,}13 = \frac{2{,}26}{2{,}5-h} \Rightarrow 2{,}5 - h = \frac{2{,}26}{1{,}13} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2{,}5 - 2 = h \Rightarrow h = 0{,}5 \text{ m}$$

$$h_{(\%)} = \frac{h}{L} \cdot 100 \Rightarrow h_{(\%)} = \frac{0{,}5}{2{,}5} \Rightarrow h_{(\%)} = 20\%$$

Resposta: alternativa **d**.

30 Considerando: p = profundidade real e p′ = profundidade aparente.

Olhando de cima para baixo, a pessoa vê uma profundidade aparentemente menor que a real. A piscina parece ser mais rasa.

$$\frac{p}{p'} = \frac{n_{\text{água}}}{n_{\text{ar}}} \Rightarrow \frac{3{,}00}{p'} = \frac{\frac{4}{3}}{1{,}0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{4}{3} p' = 3{,}00 \Rightarrow p' = \frac{9{,}00}{4} \Rightarrow p' = 2{,}25 \text{ m}$$

Logo, a sensação é que a piscina seja 0,75 m mais rasa que a profundidade real.

Resposta: alternativa **c**.

31 Aumento linear transversal: $-\frac{p'}{p}$

$A=-\frac{p'}{p}\Rightarrow 2{,}5=-\frac{p'}{3}\Rightarrow p'=-7{,}5\text{ cm}$

Equação de Gauss:

$\frac{1}{f}=\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}\Rightarrow\frac{1}{f}=\frac{1}{3}+\frac{1}{-7{,}5}\Rightarrow$

$\Rightarrow\frac{1}{f}=\frac{(2{,}5-1)}{7{,}5}\Rightarrow f=5\text{ cm}$

Resposta: alternativa **a**.

32 Para obter a convergência da lente corretora na hipermetropia, podemos usar:

$C=4-\frac{1}{d_p}=4-\frac{1}{0{,}5}\Rightarrow C=-2\text{ di}$

Resposta: alternativa **b**.

Compreendendo o mundo

1 Radiação visível, ou luz visível.

2 Os cones identificam as cores primárias, e os bastonetes diferenciam, sem distinção de cores, intensidades luminosas.

3 É a rodopsina.

4 É devido à carência de rodopsina usada em excesso.

5 Você vê a bandeira em suas cores originais, corretas, que são complementares às apresentadas na figura.

CAPÍTULO 10 – Sons, imagens e informação

As frases iniciais deste capítulo podem ser utilizadas para desenvolver a ideia de que informação não é algo para ser tratado como um conceito subjetivo. A informação está sempre ligada a um agente físico e o texto em **Física tem História** mostra isso com clareza.

Acreditamos ser interessante sugerir a leitura do texto para que o aluno possa responder às perguntas. Apresentamos aqui um pequeno texto de apoio:

> Informação é uma entidade física que pode ser quantificada. Ou alguém acha que a informação contida em um livro não requereu energia para o processamento das ideias no interior do cérebro do autor?
>
> Além disso, requereu energia de seus processos metabólicos para escrever ou digitar. Sem contar todas as outras formas de energia ligadas à impressão física, transporte e distribuição do volume disponível para leitura.

Gostaríamos que você observasse que este capítulo não é frequente em livros de Física. Entretanto, pretendemos cumprir a missão de estabelecer o desenvolvimento das habilidades e competências do aluno para observar as leis físicas nos diversos contextos cotidianos.

Além disso, você pode observar, discutindo com os alunos, que informações não são somente sons e imagens. O código Braile, por exemplo, é uma leitura táctil da informação, mas, além disso, há satélites e outros meios nas telecomunicações transmitindo bilhões de *bytes* por segundo, pelas ondas eletromagnéticas – sem som nem imagem, mas com informações preciosas.

Física tem História

1. As próprias paredes das cavernas.
2. Tanto as pinturas quanto a memória do computador são formas de se gravar uma informação.
3. A pintura é uma informação cujo significado é traduzido pelo observador. Da mesma forma, o programa do computador processa as informações com as quais é alimentado e faz a sua interpretação.

1. Registros analógicos

Você pode iniciar a explicação sobre registro analógico de uma informação e aproveitar para dar o exemplo do brinquedo, hoje fora de moda, do telefone de lata. Uma abordagem bem-humorada desse brinquedo dará uma ideia histórica de como as comunicações se desenvolveram rapidamente nos últimos anos.

Podemos seguir apresentando o funcionamento dos antigos fonógrafos e como as propriedades piezelétricas do cristal de quartzo deram um impulso a essa tecnologia.

Você pode discutir o eletromagnetismo, particularmente o fenômeno da indução eletromagnética, a ser estudado no volume 3, que possibilitou a invenção dos alto-falantes e microfones.

A descrição e discussão do funcionamento desses dispositivos podem ser apresentadas e, em seguida, o funcionamento do telefone fixo pode ser objeto de estudo.

A gravação magnética do som, em minicassetes, foi um acontecimento digno de nota dos anos 1970. Este é um momento em que você pode mostrar como uma pequena fita cassete podia conter mais de uma hora de música, praticamente com a mesma qualidade dos antigos discos de vinil.

Talvez fosse interessante que os alunos fossem estimulados a pensar sobre as consequências desse fato na vida cotidiana. Um fato talvez inesperado pela indústria fonográfica foi a popularização de cópias ilegais.

Até agora, foram tratadas somente as gravações de som. Então pode surgir a pergunta: Como gravar imagens? Pode-se começar pela fotografia, passando pelo disco de Plateau, até chegar ao cinema.

Outra discussão importante é como o número de fotogramas projetados por segundo influi na fluidez da sequência de imagens e como o cérebro intercala os eventos ocorridos entre um fotograma e outro.

Comente como Charles Chaplin aproveitava as limitações tecnológicas para tornar seus filmes engraçados e fale um pouco do cinema mudo, uma fase importante na história da Arte, que pode ser atrativa para os alunos.

Pode ser interessante ressaltar que a informação, além de ser armazenada, precisa ser transmitida. As emissoras de rádio AM e FM transmitem sinais sonoros sem fio, com ondas eletromagnéticas.

Em seguida, podemos explicar como transmitir sinais de imagens por essas mesmas ondas, falando sobre os primórdios da televisão em preto e branco, até chegar à TV em cores. É possível, então, explicar o funcionamento da TV de plasma e a de cristal líquido (LCD).

Você pode aproveitar e falar dos visores de cristal líquido dos celulares atuais, ou mesmo das calculadoras.

No livro do aluno, o funcionamento de cada uma dessas tecnologias está apresentado, com algumas ilustrações. Procuramos não ser excessivamente técnicos, mas nos apegar principalmente aos princípios de funcionamento.

Pode-se comentar que a miniaturização de componentes foi uma das principais responsáveis por essas tecnologias.

Os exercícios propostos são de natureza qualitativa e visam desenvolver as competências relativas à contextualização dos fenômenos físicos à realidade. Além disso, o entendimento das implicações sociais da tecnologia pode ser aprimorado, para que o aluno seja um cidadão que compreende o mundo tecnológico à sua volta.

Para refletir

O diodo emissor de luz (LED, do inglês *ligh-emimitting diode*) é um componente eletrônico formado por semicondutores que emite luz ao ser alimentado por determinada corrente elétrica. OLED é LED composto de materiais orgânicos; são empregados em telas digitais de TVs e telefones, por exemplo.

2. Registros digitais

É comum ouvirmos que, se determinado equipamento é digital, é de melhor qualidade, mas isso não é necessariamente verdadeiro. Podemos citar como exemplo a má qualidade das primeiras máquinas fotográficas digitais.

É possível apresentar a ideia de Shannon sobre a **unidade de informação**, um ponto de decisão (1 *bit*): um sim ou não, um verdadeiro ou falso e assim por diante.

Neste ponto, visando o item **Trabalho em equipe**, você pode comentar que Shannon e Alan Turing trabalharam na decodificação de mensagens durante a Segunda Guerra Mundial.

Além disso, explique que expressões como "vai chover" contêm pouca informação, pois é certo que, em algum lugar, algum dia, vai chover.

Entretanto, quando dizemos que "vai chover em João Pessoa, amanhã, às 8h" estamos fornecendo uma quantidade razoável de informação e resolvemos a incerteza de um habitante da cidade decidir se deve ou não sair de guarda-chuva.

Depois de caracterizada a unidade informação, você pode conversar sobre o funcionamento do telégrafo, e como os livros e as partituras constituem registros digitais.

Em seguida, pode-se mostrar como uma sequência de zeros e uns pode ser transmitida por uma onda eletromagnética. Essa discussão pode servir para comparar a linguagem binária com o telégrafo, pois a interpretação do código, no caso do telégrafo, era feita por um humano treinado, mas hoje em dia os circuitos eletrônicos interpretam informação bilhões de vezes mais rapidamente.

Como o telefone celular é uma realidade nacional, os princípios de seu funcionamento podem ser objeto de discussão.

Chegamos, então, a um ponto em que a interdisciplinaridade pode ser eficaz. Sugerimos que o tópico "*Bytes* e números hexadecimais" seja trabalhado, simultaneamente, nas aulas de Física e de Matemática.

Neste tópico é possível mostrar que toda conversão do analógico para o digital envolve perdas, pelo fato de estarmos passando de um domínio contínuo para um discreto. É praticamente certo que muitos alunos fiquem surpresos com essa constatação.

Para explicar esse fato, é possível explorar a sequência de gráficos que ilustram as conversões, que chegam até o limite da acuidade auditiva humana, isto é, há perdas, mas o que se perdeu não seria perceptível por nossa audição.

Em construção

Neste capítulo prestamos homenagem a Marconi, considerado o inventor da comunicação sem fio.

Da biografia de Marconi pode-se obter um pequeno retrato do grande desenvolvimento das telecomunicações no começo do século XX.

Grandes invenções podem ter aplicações pacíficas e benéficas para toda a sociedade, como também podem ser utilizadas em aplicações bélicas, como foi o caso da aviação e da energia nuclear, por exemplo.

Após os alunos lerem a biografia, pode ser interessante comentar que o telégrafo sem fio de Marconi foi o que possibilitou o resgate de vários sobreviventes do naufrágio do Titanic, em 1912. Paralelamente, as comunicações sem fio rapidamente encontraram aplicações bélicas, na comunicação entre tropas na Primeira Guerra Mundial.

Os alunos podem ser divididos em pequenas equipes de forma que cada uma apresente 3 ou 4 grandes invenções do fim do século XIX e começo do século XX, apontando suas aplicações pacíficas e suas aplicações bélicas.

A seguir, citamos algumas: avião, rádio, telefone, lâmpada elétrica, cinema, telefone, penicilina e automóvel.

Alternativamente, se houver tempo e você julgar procedente, pode comentar a primazia do padre brasileiro Roberto Landell de Moura na invenção do rádio, ainda não devidamente reconhecida internacionalmente.

O artigo de César A. A. Santos, da Universidade de Passo Fundo, apresentado no congresso de Comunicação em 2003, "Landell de Moura ou Marconi, quem é o pioneiro?" é uma boa fonte de consulta sobre o assunto. Disponível em: <www.intercom.org.br/papers/nacionais/2003/www/pdf/2003_NP06_santos.pdf>. Acesso em: abr. 2016.

Experimento

A atividade prática "Montando um rádio galena" pode ser realizada individualmente ou em grupos. Algumas sugestões de respostas às questões são:

A antena é o receptor do sinal eletromagnético e, ao mesmo tempo, parte do circuito que irá alimentar os fones. As estações a serem sintonizadas são aquelas que transmitem em comprimentos de onda compatíveis com a antena.

1. A audição permanece a mesma, uma vez que a modulação é na amplitude.
2. Variando o comprimento da antena estamos variando a resistência e a indutância do circuito, levando-o a sintonizar diferentes emissoras.

Atividades complementares

Há quatro importantes publicações sobre os temas tratados nesse capítulo: são artigos considerados clássicos. Três delas estão disponíveis na internet. Infelizmente, só estão disponíveis em inglês. Caso considere importante, você pode aprofundar um pouco mais esses temas levando aos alunos algumas informações adicionais. As referências são:

- Artigo detalhando o funcionamento e um pouco da história do CD.

  T. D. Rossing, "The Compact Disc Digital Audio System", *The Physics Teacher*, v. 25, p. 556-562, 1987.

  Esse artigo não está disponível para *download*. É preciso ser assinante.

- Artigo seminal sobre teoria da informação, publicado por C. E. Shannon (1949). "Communication in the presence of noise". Proc. Institute of Radio Engineers, v. 37 (1): 10–21.

  Disponível em: <web.stanford.edu/class/ee104/shannonpaper.pdf>. Acesso em: abr. 2016.

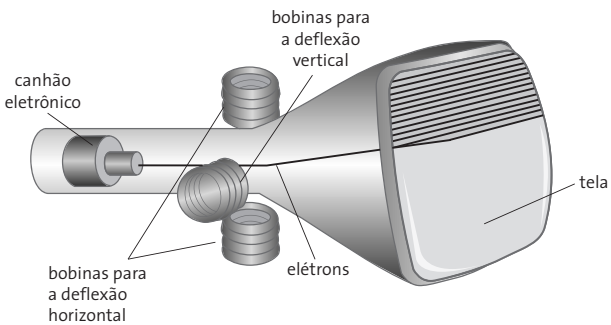
- Outro artigo interessante sobre informação, publicado 21 anos antes da publicação de Shannon, mas que já esboça as primeiras ideias da teoria.

  R. V. L. Hartley (1928). "Transmission of Information". *Bell System Technical Journal*.

  Disponível em: <http://www.dotrose.com/etext/90Miscellaneous/transmission_of_information_1928b.pdf>. Acesso em: abr. 2016.

A seguir apresentamos alguns exercícios de apoio:

1. (Enem) A figura mostra o tubo de imagens dos aparelhos de televisão usado para produzir as imagens sobre a tela. Os elétrons do feixe emitido pelo canhão eletrônico são acelerados por uma tensão de milhares de volts e passam por uma espaço entre bobinas onde são defletidos por campos magnéticos variáveis, de forma a fazerem a varredura da tela.



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

Nos manuais que acompanham os televisores é comum encontrar, entre outras, as seguintes recomendações:

I. Nunca abra o gabinete ou toque as peças no interior do televisor.

II. Não coloque seu televisor próximo de aparelhos domésticos com motores elétricos ou ímãs.

Estas recomendações estão associadas, respectivamente, aos aspectos de:

a) riscos pessoais por alta tensão/perturbação ou deformação de imagem por campos externos.

b) proteção dos circuitos contra manipulação indevida/perturbação ou deformação de imagem por campos externos.

c) riscos pessoais por alta tensão/sobrecarga dos circuitos internos por ações externas.

d) proteção dos circuitos contra a manipulação indevida/sobrecarga da rede por fuga de corrente.

e) proteção dos circuitos contra a manipulação indevida/sobrecarga dos circuitos internos por ação externa.

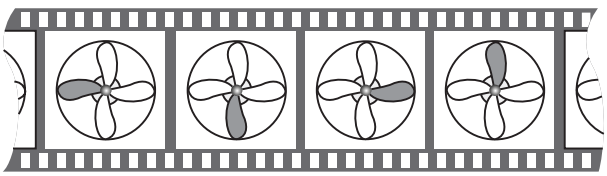
Resolução:

Não se deve tocar o interior do aparelho, pois há pontos de alta tensão no seu interior e, portanto, riscos pessoais.

Os aparelhos devem ser mantidos longe de fontes de campos magnéticos, pois estes provocam desvios nos feixes de elétrons e distorcem a imagem.

Resposta: alternativa **a**.

2. (UFJP-PB) O olho humano retém durante $\frac{1}{24}$ de segundo as imagens que se formaram na retina. Essa memória visual permitiu a invenção do cinema. A filmadora bate 24 fotografias (fotogramas) por segundo. Uma vez revelado, o filme é projetado à razão de 24 fotogramas por segundo. Assim, o fotograma seguinte é projetado no exato instante em que o fotograma anterior está desaparecendo de nossa memória visual, o que dá a sensação de continuidade. Filma-se um ventilador cujas pás estão girando no sentido horário. O ventilador tem quatro pás simetricamente dispostas, uma das quais pintada de cor diferente, como ilustra a figura. Ao projetarmos o filme, os fotogramas aparecem na tela na seguinte sequência:



o que nos dá a sensação de que as pás estão girando no sentido anti-horário. Calcule quantas rotações por segundo, no mínimo, as pás devem estar efetuando para que isso ocorra.

Resolução:

Conforme mostra a figura, em $\left(\frac{1}{24}\right)$ s o ventilador deve ter realizado $\frac{3}{4}$ de volta. Logo:

$f = \left(\frac{3}{4}\right) \cdot \left(24\right) = 18$ voltas/s

Resolução dos exercícios

1 Nas latas interligadas, em uma está o emissor (que fala) e na outra o receptor (que ouve). Assim, se uma pessoa utiliza a azul para falar, a outra deve utilizar a azul para ouvir.

2 As vibrações acarretam variações de eletrização, que geram sinais a ser captados por circuitos elétricos e amplificados.

3 Como os sons agudos têm pequeno comprimento de onda, os alto-falantes que melhor respondem a essa faixa devem ter cones pequenos.

4 a) As frequências da voz humana estão abaixo de 3 kHz. Assim, a transmissão de voz não necessita de uma faixa que vá além desse valor. Em um som orquestral há vários componentes com frequência acima de 3 kHz. Como essas frequências serão cortadas, a fidelidade é **ruim**.

b) Embora a fidelidade seja ruim, a inteligibilidade é **boa**, isto é, você entende todas as palavras que ele transmite.

5 Os riscos são que os sinais interfiram em comunicações importantes, às vezes, imprescindíveis, como a do avião com o aeroporto.

6 a) O primeiro *bit* é 0, logo se refere ao time de Teodoro. Então ele é o emissor da mensagem.

b) Os três *bits* que sucedem o primeiro representam o número de gols do time do emissor (Teodoro). Eles são 010_2 que corresponde, na base 10, *a*:

$0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 0 + 2 + 0 = 2$

O quinto *bit* é o time de Tiago. Do sexto ao oitavo *bit* temos o número de gols do time de Tiago: 000, que corresponde a 0 na base 10. Assim, considerando o time de Teodoro e o de Tiago, o resultado do jogo foi: Teodoro 2×0 Tiago.

7 a) Como são 60 capitais, temos: $n = \log_2 60 = 5{,}9$, mas como *n* deve ser um número natural, $n = 6$. Observe que não é necessário calculadora para se chegar a esse resultado. Como $2^5 = 32$, vemos que cinco é pouco, mas $2^6 = 64$ e, portanto, com 6 *bits* podemos descrever todos os resultados possíveis.

b) Com 7 *bits*, teríamos: $n = 2^7 = 128$ capitais.

c) Fazemos a soma com o mesmo processo prático para somar na base 10, observando que ao atingir o limite da base (2), levamos uma unidade para a casa imediatamente à esquerda:

$$\begin{array}{r} {}^{1}1^{1}01 \\ 111 \\ \hline 1100 \end{array}$$

Essa soma corresponde, na base 10, a: $5 + 7 = 12$.

8 a) Conforme a figura que apresenta o código, podemos escrever "Fisica" com:

F I S I C A

b) Com 6 *bits*, podemos ter $n = 2^6 = 64$ símbolos diferentes.

Observe, entretanto, que o código Morse tem letras com 1 *bit*, 2 *bits*, e assim por diante. Dessa forma, o número de possibilidades fica:

$n' = 64 + 32 + 16 + 8 + 4 + 2 = 126$ possibilidades diferentes. Isso pode ser entendido pelo fato de o intervalo entre duas letras ser mais um *bit* de informação, que nos levaria a 128 possibilidades.

9 O dobro de 20 kHz é 40 kHz, ou seja, 40 000 amostras por segundo.

10 a) Sim. O registro digital não é fiel à curva do sinal sonoro.

b) Aumentar o número de amostras no intervalo de tempo considerado.

Retomando

11 Considerando a leitura da esquerda para direita, temos 2 possibilidades para a 1ª barra, 2 para a segunda e 2 para a terceira, que é a barra central, portanto $2^3 = 8$ possibilidades.

Agora vamos impor que a leitura da direita para a esquerda seja igual à da esquerda para direita. A quarta barra deverá ser igual à segunda e a quinta igual à primeira; logo, não são escolhas possíveis.

Seriam então 8 possibilidades, mas como todas brancas ou todas pretas estão descartadas, ficamos com 6.

Resposta: alternativa **d**.

12 De *A* para *B*: tempo $= \dfrac{(6\,000\,000)}{(3\,00\,000\,000)} = 20$ ms

De *A* para *C*: tempo $= \dfrac{(6\,000\,000)}{\left(\dfrac{3\,000\,000\,000}{1{,}5}\right)} = 30$ ms

Logo, a diferença de tempos é de 10 ms.

Resposta: alternativa **b**.

ISBN 978-85086179527