



Guimarães • Piqueira • Carron

Física

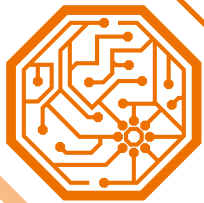
Eletromagnetismo • Física moderna

Manual do
Professor

3

ea
editora ática

Física - Ensino Médio



Guimarães • Piqueira • Carron

Física

Eletromagnetismo • Física moderna

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 eletricitista 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.

2ª EDIÇÃO
SÃO PAULO • 2016

ea
editora ática

3

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'Ávila

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.),
Célia da Silva Carvalho, Heloísa Schiavo,
Paula Teixeira de Jesus e Vanessa de Paula Santos;
Brenda Moraes e Gabriela Miragaia (estagiárias)

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

Ilustrações
Antonio Robson, Formato Comunicação,
Osni de Oliveira e Paulo Manzi

Cartografia
Eric Fuzii, Márcio Souza

Foto da capa: Efeito visual, obtido por fotografia,
simulando um fenômeno eletromagnético.
pura vida/Getty Images

Protótipos
Magali Prado

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

2016

ISBN 978850817953 4 (AL)
ISBN 978850817954 1 (PR)
Cód. da obra CL 713354
CAE 566243 (AL) / 566244 (PR)

2ª edição
1ª impressão
Impressão e acabamento



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



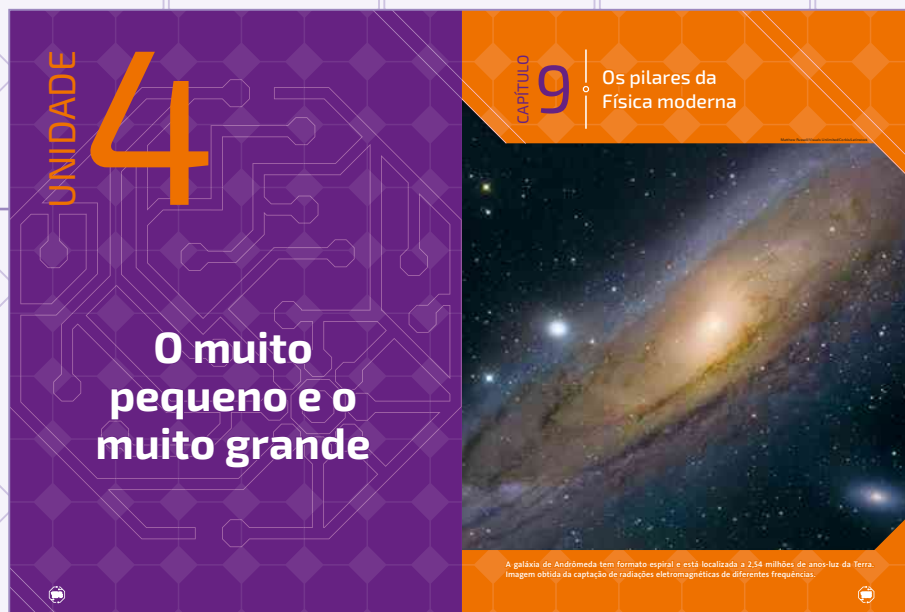
Gaby Koijman/Shutterstock

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.



Glossário

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

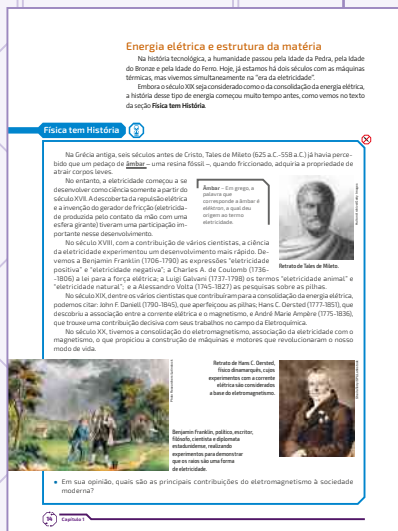
Em construção

Biografia de um ou mais personagens importantes para a Física.



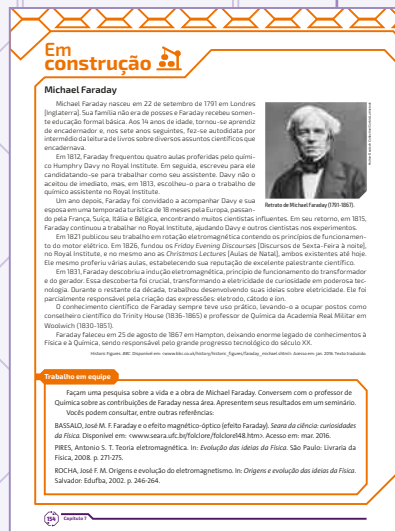
Física explica

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.



Trabalho em equipe

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

Sumário

Unidade 1: Fenômenos elétricos em condutores

CAPÍTULO 1

Energia e corrente elétrica 11

1. A importância da eletricidade 12

Presença da energia elétrica 12

Energia elétrica e estrutura da matéria 14

2. Medida da carga elétrica 18

3. A experiência de Volta: corrente elétrica 19

4. Corrente elétrica: sentido e intensidade 21

CAPÍTULO 2

Os circuitos elétricos nas residências 27

1. Bipolos e transformações de energia 28

Diferença de potencial (*ddp*) 28

Potência em bipolos 29

Consumo de energia em uma instalação residencial 30

2. Classificação dos bipolos – resistência elétrica 32

Geradores elétricos 32

Receptores elétricos 34

3. Leis de Ohm 36

Segunda lei de Ohm 37

4. Associações: série e paralelo 39

Fio ideal 39

Lei dos nós 39

Associação em série 40

Associação em paralelo 41

Associação mista de resistores 42

5. Instalações elétricas residenciais 45

CAPÍTULO 3

Geradores e receptores elétricos 54

1. Bipolos ativos 55

2. Geradores elétricos 56

Curva característica 58

Rendimento 59

3. Associações de geradores 60

Associação de geradores em série 60

Associação de geradores em paralelo 61

Associação mista de geradores 61

4. Receptores elétricos 62

Curva característica 64

Rendimento 64

Bipolos reversíveis 64

5. Circuitos elétricos 66

Leis de Kirchhoff 66

Circuito de malha única 68

Circuito com várias malhas 68

6. Amperímetro e voltímetro 69



Unidade 2: Ações elétricas a distância

CAPÍTULO 4

Campo elétrico 75

1. Processos de eletrização 77

Condutores e isolantes 77

Eletrizando por atrito 77

Indução eletrostática 78

Eletrização por contato 78

2. Lei de Coulomb 81

3. Campo elétrico 83

Vetor campo elétrico 83

Campo elétrico gerado por uma carga puntiforme 84

Campo elétrico gerado por várias cargas puntiformes 85

Linhas de campo 85

Campo elétrico uniforme 86

4. Potencial elétrico e energia potencial elétrica 88

5. Relação entre as representações do campo elétrico 90

CAPÍTULO 5

Cargas elétricas em condutores 95

1. Propriedades gerais dos condutores em equilíbrio eletrostático 96

2. Condutor esférico eletrizado 100

3. Indução eletrostática e condensação de cargas 101

4. Energia de um capacitor 105

5. Associações e circuitos com capacitores 107

Associação de capacitores em série 107

Associação de capacitores em paralelo 107

Circuitos com capacitores 108

CAPÍTULO 6

Campos e forças de natureza magnética 114

1. Campos magnéticos criados por ímãs 115

O magnetismo natural 115

Campo magnético 116

Campo magnético uniforme 117

Campo magnético terrestre 117

2. Campos magnéticos criados por correntes elétricas 120

Fio reto e longo 121

Espira circular 123

Solenoide 124

3. Força magnética sobre cargas elétricas 127

4. Movimentos de cargas em campos magnéticos uniformes 129

Lançamento paralelo ao campo magnético ($\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$) 129

Lançamento perpendicular ao campo magnético ($\theta = 90^\circ$) 129

Lançamento oblíquo ao campo magnético ($\theta \neq 90^\circ$ e $0^\circ < \theta < 180^\circ$) 130

5. Força magnética sobre condutores 131

Fabian Ribeiro/Agência Freelancer/Folhapress



Unidade 3: Fenômenos eletromagnéticos e a sociedade moderna

CAPÍTULO 7

Indução eletromagnética 139

1. Faraday e a indução eletromagnética 140

Fluxo magnético 143

Força eletromotriz (*fem*) 144

2. Lei de Lenz 145

3. Força eletromotriz induzida 148

Condutor retilíneo 148

4. Gerador de corrente alternada 150

5. Transformadores 152

CAPÍTULO 8

Ondas eletromagnéticas 158

1. O espectro eletromagnético 159

2. Ondas de rádio 162

3. Micro-ondas 165

4. Outras ondas eletromagnéticas 168

Radiações infravermelhas 168

Luz visível 169

Polarização da luz 170

Difração e interferência da luz 171

5. Radiações e fisiologia 174

Ultravioleta 174

Raios X 175

Radioatividade 177



Unidade 4: o muito pequeno e o muito grande

CAPÍTULO 9

Os pilares da Física moderna..... 185

1. A Física no final do século XIX	186
2. Postulados da teoria da relatividade especial	187
3. Dilatação do tempo	191
Paradoxo dos gêmeos	194
4. Contração da distância	197
5. Dinâmica relativística	199
Energia relativística	199
6. Teoria quântica	201
A radiação do corpo negro	202
A teoria quântica	204
7. Efeito fotoelétrico	206
8. Modelos atômicos	208
9. Bohr e o átomo de hidrogênio	211
10. A dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza	214

CAPÍTULO 10

Física nuclear..... 219

1. Radioatividade	220
Decaimento radioativo	222
2. Radiações: interações e aplicações	225
Aplicações das radiações	227
3. Reações nucleares	231
Aceleradores de partículas	233
4. Fissão nuclear e fusão nuclear	235
Fusão nuclear	237
5. Reatores nucleares	239
Usinas nucleares no mundo	240
Rejeitos radioativos e acidentes nucleares	241
Reatores de fusão nuclear	243

CAPÍTULO 11

Cosmologia e partículas elementares... 251

1. A criação	252
A criação em outras culturas	253

2. A vida de uma estrela	255
A gigante vermelha	255
De gigante vermelha a supernova.....	257
O buraco negro.....	258
3. Origem do Sistema Solar	259
4. O Universo	262
O Universo finito	262
O Universo em expansão	264
A teoria do <i>big-bang</i>	266
Evidências experimentais do modelo do <i>big-bang</i>	267
Futuro do Universo	268
5. Os tijolos da matéria	269
As três gerações de partículas	271
6. Interações fundamentais e modelo-padrão	273
Horizontes da Física	274

Respostas.....	279

Siglas de vestibulares	285

Sugestões de leitura e sites.....	285

Bibliografia.....	287

Índice remissivo	288

Nelson Morais/Latinstock



UNIDADE

1

Fenômenos elétricos em condutores

Energia e corrente elétrica

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

Eduardo Zappia/Pulsar Imagens



Subestação transmissora de energia elétrica. Caetité (BA), 2015.

A energia elétrica movimenta indústrias, gera calor, refrigera ambientes, garante a troca de informações, tem uma participação efetiva na instrumentação hospitalar e cirúrgica de alta sofisticação e nos garante uma vida melhor com alimentos e remédios.

No mundo tecnológico de hoje, como viver sem a eletricidade?



A importância da eletricidade

Você já imaginou como seria a nossa vida se ficássemos uma semana sem energia elétrica? O texto a seguir passa a ideia de tal situação.

Quando meu pai ainda era menino, numa aldeia polonesa antes da Primeira Guerra Mundial, uma pane geral no sistema elétrico não seria de grande importância. Não havia carros e, portanto, não haveria semáforos apagados; e não havia geladeiras – apenas blocos de gelo ou salas frias –, por isso os alimentos não se perderiam. Umas poucas pessoas muito ricas ficariam no escuro caso os geradores de suas casas deixassem de funcionar, e a única linha de telégrafo talvez deixasse de operar, mas de modo geral a vida continuaria como sempre...

... Mas e hoje? ... Não gostaria de estar por perto caso ocorresse uma pane geral no sistema elétrico...

Em uma semana a cidade entraria em colapso. Os distritos policiais ficariam isolados com os telefones fora de serviço, e logo as baterias dos rádios estariam descarregadas; não seria possível chamar ambulâncias, pois rádios e telefones estariam fora de operação. Alguns poderiam ir a pé ao hospital, mas lá não haveria muito que fazer: os aparelhos de raios X, refrigeração de vacinas e de sangue, ventilação e iluminação não teriam condição de funcionar.

BODANIS, David. *Universo elétrico*. Rio de Janeiro: Record, 2008.

Presença da energia elétrica

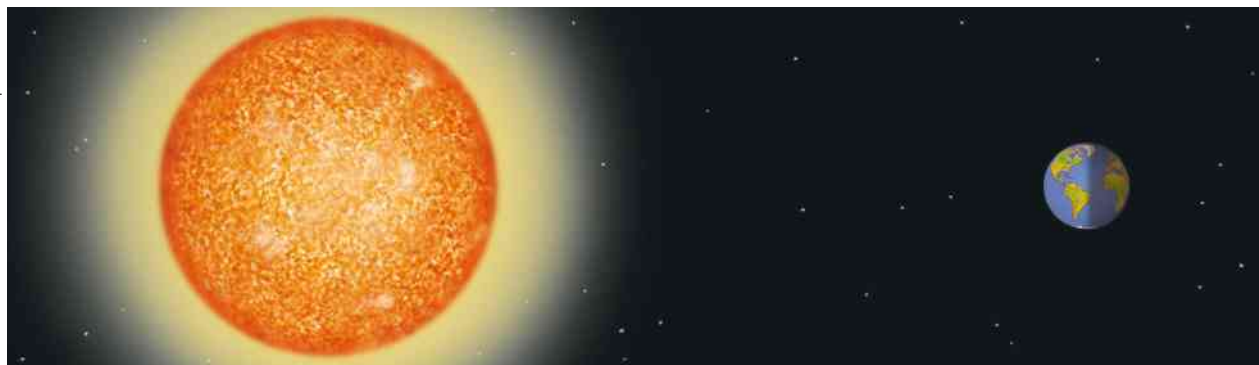
A vida na Terra está diretamente relacionada à capacidade de produção de movimento. Vegetais dependem dos fluidos que escoam entre suas partes e se reproduzem a partir da polinização realizada pelo transporte de partículas, de uma planta a outra, pelo ar ou por agentes vivos. Animais dependem, para executar suas diversas funções vitais, de processos metabólicos e do transporte ativo de nutrientes ao longo de suas células, tecidos, órgãos e sistemas. À capacidade de produção de movimento se dá o nome de energia que, na natureza, aparece sob as mais diversas modalidades: mecânica, química, térmica, elétrica, atômica, nuclear, acústica, luminosa, etc.

A fonte de praticamente toda energia aproveitada em nosso planeta é o Sol, que a produz por um processo chamado de fusão nuclear, assunto que será discutido no capítulo 10. Uma vez convertida em radiação, essa energia é transmitida à Terra e transformada nas diversas formas de energia, como a mecânica, a química, a térmica, etc., necessárias para a geração e a manutenção da vida.

A radiação é uma combinação de campos elétricos e magnéticos, que se mostra como uma forma eficiente de transmissão de energia propagada do Sol à Terra por ondas eletromagnéticas (figura 1.1).

Figura 1.1 A energia liberada pela fusão nuclear no Sol viaja até a Terra por ondas eletromagnéticas. Representação sem escala e em cores fantasia.

Paulo Manzi/Arquivo da editora



Os processos sensoriais e fisiológicos, em nosso corpo, ocorrem por intermediação de campos elétricos e magnéticos. Ao examinarmos a textura de uma superfície, suas rugosidades provocam ações elétricas nas terminações nervosas de nossos dedos. Essas ações elétricas são propagadas ao sistema nervoso central, produzindo as sensações de tato (**figura 1.2**). Quando somos anestesiados, substâncias bloqueadoras de canais iônicos fazem com que a propagação das sensações de dor ao sistema nervoso central seja impedida, pois os meios tornam-se isolantes elétricos diante do bloqueio desses canais.

A energia elétrica, como forma intermediária, é forte colaboradora do progresso tecnológico. É muito mais eficiente converter grandes quantidades de energia mecânica (**figura 1.3**), térmica (**figura 1.4**), eólica (**figura 1.5**) ou nuclear (**figura 1.6**) em elétrica nas estações de geração para, depois, usando linhas de transmissão, enviá-la aos usuários, que, com seus aparelhos, a convertem nas diversas formas de uso: calor, som, luz ou imagem.

Na era da rapidez da produção e transmissão da informação, a energia é convertida em sinais elétricos que são processados em computadores e transmitidos ao redor do globo como ondas eletromagnéticas, por dispositivos de rádio ou de fibras ópticas.



Osni de Oliveira/Arquivo da editora

Figura 1.2 Representação (sem escala e em cores fantasia) da propagação de impulsos nervosos até o cérebro.



André Dile/Pulsar Imagens

Figura 1.3 Usina hidrelétrica de Xingó (entre os estados de Alagoas e Sergipe), 2016.



Cesar Diniz/Pulsar Imagens

Figura 1.4 Usina termelétrica do Complexo termelétrico Jorge Lacerda, em Tubarão (SC), 2015.



João Prudente/Pulsar Imagens

Figura 1.5 Usina eólica Morro do Camelinho, em Gouveia (MG), 2016.



Maurício Simonetti/Pulsar Imagens

Figura 1.6 Usinas nucleares que compõem a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), em Angra dos Reis (RJ), 2015.

Energia elétrica e estrutura da matéria

Na história tecnológica, a humanidade passou pela Idade da Pedra, pela Idade do Bronze e pela Idade do Ferro. Hoje, já estamos há dois séculos com as máquinas térmicas, mas vivemos simultaneamente na “era da eletricidade”.

Embora o século XIX seja considerado como o da consolidação da energia elétrica, a história desse tipo de energia começou muito tempo antes, como vemos no texto da seção **Física tem História**.

Física tem História



Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.



Na Grécia antiga, seis séculos antes de Cristo, Tales de Mileto (625 a.C.-558 a.C.) já havia percebido que um pedaço de **âmbar** – uma resina fóssil –, quando friccionado, adquiria a propriedade de atrair corpos leves.

No entanto, a eletricidade começou a se desenvolver como ciência somente a partir do século XVII. A descoberta da repulsão elétrica e a invenção do gerador de fricção (eletricidade produzida pelo contato da mão com uma esfera girante) tiveram uma participação importante nesse desenvolvimento.

Âmbar – Em grego, a palavra que corresponde a âmbar é *eléktron*, a qual deu origem ao termo eletricidade.



Hulton Archive/Getty Images

Retrato de Tales de Mileto.

No século XVIII, com a contribuição de vários cientistas, a ciência da eletricidade experimentou um desenvolvimento mais rápido. Devemos a Benjamin Franklin (1706-1790) as expressões “eletricidade positiva” e “eletricidade negativa”; a Charles A. de Coulomb (1736-1806) a lei para a força elétrica; a Luigi Galvani (1737-1798) os termos “eletricidade animal” e “eletricidade natural”; e a Alessandro Volta (1745-1827) as pesquisas sobre as pilhas.

No século XIX, dentre os vários cientistas que contribuíram para a consolidação da energia elétrica, podemos citar: John F. Daniell (1790-1845), que aperfeiçoou as pilhas; Hans C. Oersted (1777-1851), que descobriu a associação entre a corrente elétrica e o magnetismo, e André Marie Ampère (1775-1836), que trouxe uma contribuição decisiva com seus trabalhos no campo da Eletroquímica.

No século XX, tivemos a consolidação do eletromagnetismo, associação da eletricidade com o magnetismo, o que propiciou a construção de máquinas e motores que revolucionaram o nosso modo de vida.



Photo Researchers/Latinstock

Retrato de Hans C. Oersted, físico dinamarquês, cujos experimentos com a corrente elétrica são considerados a base do eletromagnetismo.



Shelia Terry/SPL/Latinstock

Benjamin Franklin, político, escritor, filósofo, cientista e diplomata estadunidense, realizando experimentos para demonstrar que os raios são uma forma de eletricidade.

- Em sua opinião, quais são as principais contribuições do eletromagnetismo à sociedade moderna?

A energia elétrica está associada às forças de natureza elétrica. Estas resultam da interação entre corpos que apresentam número de prótons diferente do de elétrons. Barras de âmbar atraem pequenos objetos (figura 1.7), raios aparecem em tempestades (figura 1.8), elétrons energizam LEDs que formam imagens na tela da TV (figura 1.9), como resultado das interações entre partículas invisíveis aos nossos olhos.

Clive Streeter/Getty Images



Figura 1.7 Barra de âmbar atraindo uma pena.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Sergio Ranalli/Pulsar Imagens



Figura 1.8 Raios durante uma tempestade em Londrina (PR), 2015.

Hyvit Dimyadi/Shutterstock/Glow Images



Figura 1.9 TV de LED.

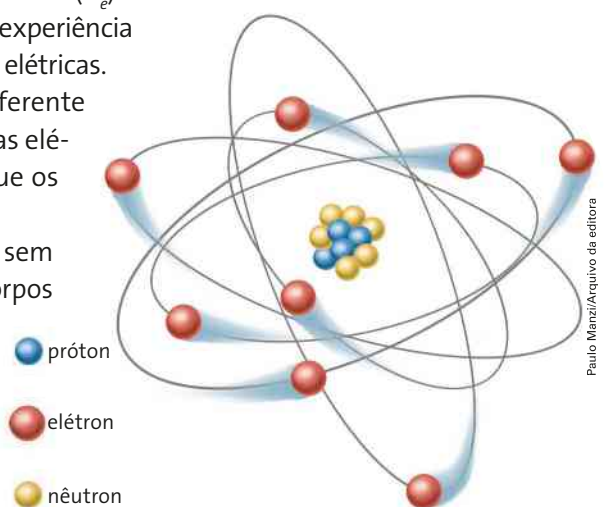
Essa dependência entre a força elétrica e as partículas elementares, isto é, prótons e elétrons, que dá a ela um caráter microscópico, talvez seja o motivo que levou a Eletricidade a ser o último ramo da **Física clássica** a ser desenvolvido.

A matéria é composta de átomos (figura 1.10), que, por sua vez, são constituídos por prótons e elétrons que sofrem atrações e repulsões intensas. O balanço entre as partículas e as forças, na natureza, é tão perfeito que só conseguimos observá-las em situações especiais. Nas situações de equilíbrio os corpos apresentam número de prótons (N_p) igual ao de elétrons (N_e). Corpos nessas condições são chamados de **corpos neutros**. A experiência mostra que entre dois corpos neutros não há troca de forças elétricas.

Quando os corpos possuem número de prótons (N_p) diferente do número de elétrons (N_e), conseguimos observar as forças elétricas existentes entre eles. Nessas condições, dizemos que os **corpos estão eletrizados**.

Não é possível alterar o número de prótons de um corpo sem provocar uma reação nuclear. A maneira usual de eletrizar corpos inicialmente neutros é retirar ou adicionar elétrons.

Física clássica – Parte da Física estudada até aproximadamente o final do século XIX. A Física clássica, portanto, não utiliza os conceitos que surgiram no início do século XX, com a Mecânica quântica e a relatividade especial.



Paulo Manz/Arquivo da editora

Figura 1.10 Modelo atômico utilizado no estudo da Física clássica. Representação sem escala e em cores fantasia.

Assim, considere os seguintes conjuntos de corpos:

- dois corpos A e B, dos quais foram retirados elétrons, resultando em um número de prótons maior que o de elétrons ($N_p > N_e$);
- dois corpos C e D, aos quais foram acrescentados elétrons, resultando em um número de prótons menor que o de elétrons ($N_p < N_e$).

Se os corpos A e B forem colocados um em presença do outro, será possível observar entre eles forças elétricas de repulsão. O mesmo ocorre com os corpos C e D (figura 1.11).

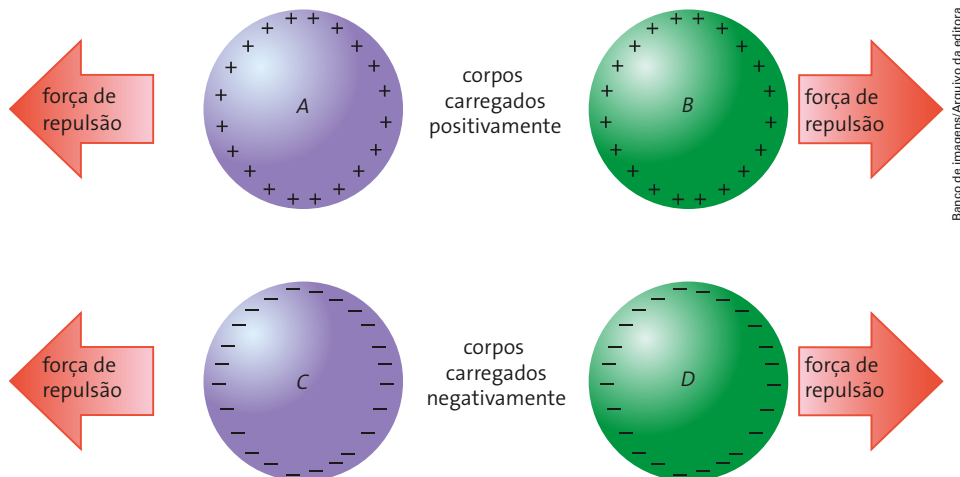


Figura 1.11 Forças de repulsão entre dois corpos eletrizados.

Se os corpos A e D forem colocados um em presença do outro, será possível observar entre eles forças elétricas de atração. Essas forças também aparecem para os pares A e C; B e C; B e D (figura 1.12).

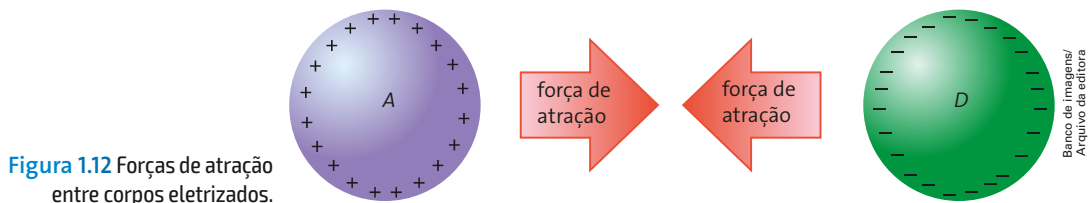


Figura 1.12 Forças de atração entre corpos eletrizados.

Esses fatos permitiram a formulação da hipótese de existência de duas eletrificadas de naturezas diferentes, a qual foi chamada de lei de Du Fay, em homenagem ao químico francês Charles François de Cisternay du Fay (1698-1739). Os conhecimentos a respeito da estrutura da matéria desenvolvidos nos séculos XIX e XX levaram a uma versão mais precisa da lei de Du Fay, estabelecendo-se a ideia de carga elétrica, que pode ser resumida nos pontos a seguir:

- por convenção, a carga elétrica dos prótons é **positiva**, e a dos elétrons é **negativa**;
- prótons e elétrons possuem cargas elétricas de mesmo valor absoluto (e);
- corpos inicialmente neutros que perdem elétrons adquirem carga elétrica positiva;
- corpos inicialmente neutros que recebem elétrons adquirem carga elétrica negativa;
- corpos com carga elétrica de mesmo sinal trocam forças elétricas de repulsão;
- corpos com carga elétrica de sinais opostos trocam forças elétricas de atração.

Exercício resolvido

1. (Enem) Segundo dados do balanço Energético Nacional de 2008, do Ministério das Minas e Energia, a matriz energética brasileira é composta por hidrelétrica (80%), termelétrica (19,9%) e eólica (0,1%). Nas termelétricas, esse percentual é dividido conforme o combustível usado, sendo: gás natural (6,6%), biomassa (5,3%), derivados de petróleo (3,3%), energia nuclear (3,1%) e carvão mineral (1,6%). Com a geração de eletricidade da biomassa, pode-se considerar que ocorre uma compensação do carbono liberado na queima do material vegetal pela absorção desse elemento no crescimento das plantas. Entretanto, estudos indicam que as emissões de metano (CH_4) das hidrelétricas podem ser comparáveis às emissões de CO_2 das termelétricas.

MORET, A. S.; FERREIRA, I. A. As hidrelétricas do Rio Madeira e os impactos socioambientais da eletrificação no Brasil. *Revista Ciência Hoje*, v. 45, n. 265, 2009 (adaptado).

No Brasil, em termos do impacto das fontes de energia no crescimento do efeito estufa, quanto à emissão de gases, as hidrelétricas seriam consideradas como uma fonte:

- a) limpa de energia, contribuindo para minimizar os efeitos desse fenômeno.
- b) eficaz de energia, tomando-se o percentual de oferta e os benefícios verificados.
- c) limpa de energia, não afetando ou alterando os níveis dos gases do efeito estufa.
- d) poluidora, colaborando com níveis altos de gases de efeito estufa em função de seu potencial de oferta.
- e) alternativa, tomando-se por referência a grande emissão de gases de efeito estufa das demais fontes geradoras.

Resolução:

O CH_4 contribui para o aumento do efeito estufa, e as usinas hidrelétricas emitem esse gás em quantidades consideráveis, conforme o texto nos informa. Como o Brasil possui grandes reservas hídricas, a participação das usinas hidrelétricas é muito significativa na nossa matriz energética e, por isso, elas podem ser consideradas poluidoras. No Brasil, podemos considerar que o aumento da exploração desse tipo de produção de energia agrava o efeito estufa. Assim, a alternativa correta é a **d**.

Exercícios



1. As usinas de energia eólica geram eletricidade a partir da força dos ventos. O Ministério de Minas e Energia do Brasil estima que as turbinas eólicas produzam apenas 0,25% da energia consumida no país. Isso ocorre porque elas competem com usinas mais baratas e eficientes: as hidrelétricas, que respondem por 80% da energia do Brasil. O investimento para se construir uma hidrelétrica é de aproximadamente US\$ 100,00 por quilowatt. Os parques eólicos exigem investimento de cerca de US\$ 2.000,00 por quilowatt. Após a instalação dos parques, a energia dos ventos se torna bastante competitiva, custando R\$ 200,00 por megawatt-hora contra R\$ 150,00 por megawatt-hora das hidrelétricas.
- a) Quanto custa a construção de uma usina hidrelétrica de 10 megawatts? **US\$ 100 · 10⁴ ou US\$ 1 000 000**
 - b) Quanto custa a construção de usina eólica de 10 megawatts? **US\$ 2 000 · 10⁴ ou US\$ 20 000 000**
 - c) Suponha que uma lâmpada de 100 watts fique acesa cinco horas por dia. Qual é seu custo mensal se ela for alimentada por uma usina hidrelétrica? **R\$ 2,25**
 - d) Considerando a lâmpada do item **c**, qual é seu custo mensal se for alimentada por uma usina eólica? **R\$ 3,00**
2. Para que um corpo seja eletrizado com carga elétrica negativa, podemos afirmar que, certamente:
- a) foram retirados elétrons do corpo.
 - b) o corpo recebeu prótons.
 - Xc) o corpo recebeu elétrons.**
 - d) foram retirados prótons do corpo.
3. Um corpo A, inicialmente neutro, cede alguns elétrons a um corpo B, também inicialmente neutro.
- a) Quais são os sinais das cargas elétricas adquiridas por A e B? **A: carga elétrica positiva; B: carga elétrica negativa.**
 - b) Que tipo de força elétrica os corpos trocam, na situação final? **Forças de atração.**
4. Três corpos A, B e C estão inicialmente neutros. Sabe-se que o corpo A cede alguns elétrons para os corpos B e C.
- a) Quais são os sinais das cargas elétricas adquiridas por A, B e C? **A: carga elétrica positiva; B: carga elétrica negativa; C: carga elétrica negativa.**
 - b) Que tipo de força elétrica os corpos A e B trocam, na situação final? **Forças de atração.**
 - c) Que tipo de força elétrica os corpos B e C trocam, na situação final? **Forças de repulsão.**



2 Medida da carga elétrica

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir

Se $N_p = N_e$, o corpo está eletrizado ou neutro? Qual é o valor da carga desse corpo? Justifique.



APIC/Getty Images

Figura 1.13 Retrato de Robert A. Millikan, físico estadunidense, ganhador do Prêmio Nobel de Física, em 1923, por sua medição da carga do elétron.

Os prótons e os elétrons são os responsáveis pela carga elétrica dos corpos. Por convenção, os prótons possuem carga elétrica $+e$ e os elétrons possuem carga elétrica $-e$. A carga elétrica do nêutron é nula.

Considere um corpo com N_p (número de prótons) e N_e (número de elétrons), independentemente de seu número de nêutrons. A carga elétrica total desse corpo, Q , é expressa por: $Q = N_p \cdot e + N_e \cdot (-e)$.

Essa relação pode ser simplificada para: $Q = (N_p - N_e) \cdot e$.

Como N_p e N_e sempre representaram números naturais, a diferença $(N_p - N_e)$ é, sempre, um número inteiro que representa o número de elétrons em:

- excesso, caso $N_p < N_e$, ou seja, $N_p - N_e < 0$;
- falta, caso $N_p > N_e$, ou seja, $N_p - N_e > 0$.

Em qualquer das duas situações mencionadas acima, dizemos que o corpo está eletrizado.

Por essa razão, é comum nos textos de Química encontrarmos a carga elétrica de íons dada por números como $+1$, -2 , -3 , $+4$, etc. Por exemplo, quando o íon sódio é representado por Na^{+1} significa que se trata de um átomo de sódio que perdeu um elétron e tem, portanto, $N_p - N_e = 1$. Um íon cloreto, representado por Cl^{-1} , é um átomo de cloro que recebeu um elétron e tem, portanto, $N_p - N_e = -1$.

Assim, fica claro que os valores de cargas elétricas dos corpos são, sempre, múltiplos inteiros da chamada **carga elementar (e)**. Esse fato é chamado de **quantização da carga elétrica**.

Fundamentado nessa ideia, Robert A. Millikan (1868-1953) concebeu um experimento para a medida da carga elementar no Sistema Internacional de Unidades (SI) (**figura 1.13**).

Provocando o atrito de pequenas gotículas de óleo com uma superfície metálica, Millikan obteve minúsculos corpos com alguns elétrons em excesso ou falta. Equilibrando a força peso atuante nessas partículas com a força de natureza elétrica, ele determinou que os valores das cargas elétricas das gotículas eram múltiplos inteiros do número $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

O símbolo C representa **coulomb**, que é a unidade de carga elétrica no SI. Esse nome foi dado em homenagem a Charles A. Coulomb, físico francês responsável, entre outras coisas, pela invenção da balança de torção.

Conclui-se, então, que a carga elementar vale:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

Exercício

- Em uma experiência de laboratório, um técnico constatou que um corpo de prova estava carregado com uma carga elétrica cujo módulo era $7,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Em relação a esse fato classifique, em seu caderno, cada afirmação a seguir em **certa** ou **errada**.
 - Se a carga elétrica desse corpo de prova for positiva, podemos concluir que ele possui somente prótons. **Errada**
 - Se a carga elétrica desse corpo de prova for negativa, ele possui somente um número de prótons maior que o de elétrons. **Errada**
 - Como o valor da carga elétrica do corpo não é múltiplo do valor da carga elétrica elementar, a medida está errada e não merece confiança. **Certa**



A experiência de Volta: corrente elétrica

Em razão do equilíbrio existente entre prótons e elétrons, as forças de natureza elétrica, presentes no Universo desde o início, pouco foram notadas pela humanidade durante a maior parte da sua história. É claro que os ancestrais dos seres humanos observaram, por exemplo, raios que rapidamente desapareciam, levando consigo os mistérios invisíveis de tão maravilhoso fenômeno. Pode-se dizer até que a humanidade conviveu com a Eletricidade por muito tempo, sem compreendê-la.

Apesar dos esforços despendidos desde a Grécia antiga, os mistérios da Eletricidade só começaram a ser efetivamente desvendados quando o experimentador italiano Alessandro Volta verificou que, unindo as pontas livres de dois discos, um de cobre colocado na parte superior de sua língua e um de zinco colocado na parte inferior, ele sentia um formigamento atravessando a língua. Assim surgiu a primeira bateria de corrente contínua.

Volta percebeu, também, que dois metais diferentes sempre produziam esse efeito quando separados por saliva, salmoura ou outro líquido. Mesmo sem entender satisfatoriamente o fenômeno, Volta conseguiu reproduzi-lo em sua bancada de laboratório, montando uma bateria rudimentar e ligando-a com fios metálicos (figura 1.14).

Parecia que, nessa bateria rudimentar, algum material fluía pelos fios como água por um encanamento. Hoje sabemos que não se trata de um material fluindo pelos fios, mas sim de elétrons livres dos metais movimentando-se ordenadamente no seu interior. A esse movimento, que é o responsável pelas transformações de energia de outras modalidades em energia elétrica e vice-versa, foi dado o nome de corrente elétrica.

Corrente elétrica é o movimento ordenado de portadores de carga elétrica.

Para haver corrente elétrica, é necessário que haja partículas eletrizadas livres, isto é, em condições de se movimentar. Os corpos que possuem partículas eletrizadas em condições de se movimentar em seu interior são chamados de **condutores elétricos**.

Os corpos condutores mais facilmente identificáveis são os **condutores metálicos**, uma vez que os metais têm distribuição eletrônica com poucos **elétrons** (um, dois ou três) no último nível de energia.

Como consequência, esses elétrons são fracamente ligados aos átomos, formando nuvens eletrônicas que podem movimentar-se ordenadamente, desde que submetidas às excitações adequadas. Nos fios metálicos, os portadores de carga elétrica são os elétrons.

Figura 1.14 Alessandro Volta demonstrando sua invenção a Napoleão Bonaparte (1769-1821): a pilha voltaica.



Album/akg-images/Latinstock

Nas **soluções eletrolíticas**, os **íons positivos** e os **negativos** têm mobilidade para constituir correntes elétricas (**figura 1.15**), de acordo com as forças elétricas neles aplicadas, por ações físico-químicas.

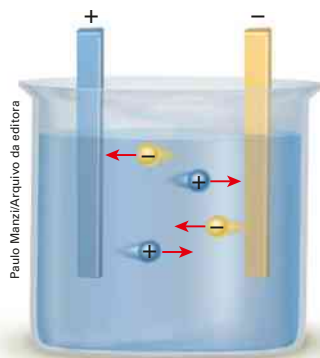


Figura 1.15 Nas soluções eletrolíticas, os portadores de carga elétrica são os íons positivos e os negativos.



Figura 1.16 Nas lâmpadas fluorescentes, os portadores de carga elétrica são os íons e os elétrons.

Os **gases nobres** podem ser ionizados, separando-se alguns de seus elétrons dos átomos, que se tornam íons positivos. Esses elétrons e íons podem constituir corrente elétrica, como numa lâmpada fluorescente (**figura 1.16**).

Concluindo, há três tipos de corrente elétrica:

- **eletrônica**: constituída pelo movimento ordenado de elétrons, própria dos condutores metálicos;
- **iônica**: constituída pelo movimento ordenado de íons, própria das soluções eletrolíticas;
- **mista**: constituída pelo movimento ordenado simultâneo de elétrons e íons, própria dos gases ionizados.

Exercícios

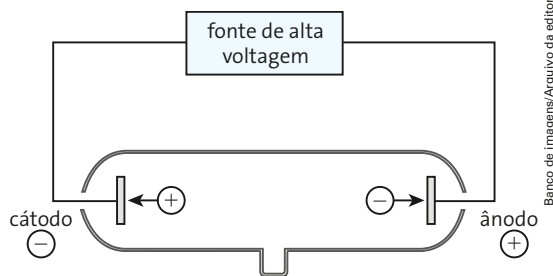


6. Uma bateria tem seus terminais interligados por um fio condutor metálico, conforme mostra a figura.



- Qual é o tipo de corrente elétrica no interior da bateria? **Corrente iônica.**
- Qual é o tipo de corrente elétrica no condutor metálico? **Corrente eletrônica.**

7. Um tubo de vidro evacuado contém hidrogênio ionizado. Nele movem-se, em sentidos opostos, elétrons e íons positivos, como mostra a figura a seguir.



- Qual é o valor da carga elétrica dos íons positivos? $Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 - Qual é o tipo de corrente elétrica no interior do tubo? **Corrente mista.**
8. Considere os seguintes dispositivos elétricos comuns em nosso cotidiano: bateria de automóvel, lâmpada halógena e lâmpada fluorescente. Identifique o tipo de corrente elétrica (eletrônica, iônica ou mista) que pode existir no interior de cada um desses dispositivos.

Bateria de automóvel: corrente iônica; **lâmpada halógena:** corrente eletrônica; **lâmpada fluorescente:** corrente mista.

4 Corrente elétrica: sentido e intensidade

Para caracterizarmos a corrente elétrica de maneira quantitativa, iniciamos atribuindo-lhe um sentido para distinguir os movimentos de partículas eletrizadas, de acordo com os sinais de suas cargas elétricas.

Quando a corrente elétrica é resultado do movimento ordenado de íons positivos, a ela é atribuído o mesmo sentido do movimento. Quando ela é resultado do movimento de elétrons ou de íons negativos, o sentido atribuído à corrente elétrica é oposto ao movimento. Essa atribuição de sentido, entretanto, é apenas uma convenção e, de acordo com ela, há três casos a considerar:

- Nos condutores metálicos, a corrente elétrica (i) tem sentido oposto ao do movimento dos elétrons livres (figura 1.17).
- Nas soluções eletrolíticas, íons positivos em movimento correspondem a uma corrente elétrica (i_1) no sentido de seu movimento. O movimento dos íons negativos, oposto ao dos positivos, corresponde a uma corrente elétrica (i_2) no sentido oposto ao seu movimento. Conforme mostra a figura 1.18, os sentidos de (i_1) e de (i_2) coincidem, implicando uma soma de seus efeitos.

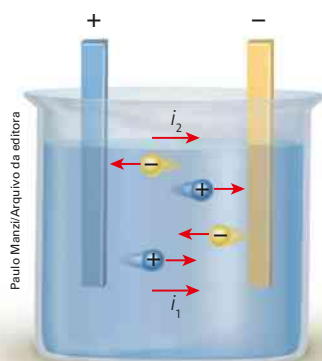


Figura 1.18 Sentido das correntes elétricas em uma solução eletrolítica.

- Nos gases ionizados, íons positivos em movimento correspondem a uma corrente elétrica (i_1) no sentido de seu movimento. O movimento dos elétrons, oposto ao dos íons positivos, corresponde a uma corrente elétrica (i_2) no sentido oposto ao seu movimento. Conforme mostra a figura 1.19, os sentidos de (i_1) e de (i_2) coincidem, implicando uma soma de seus efeitos.

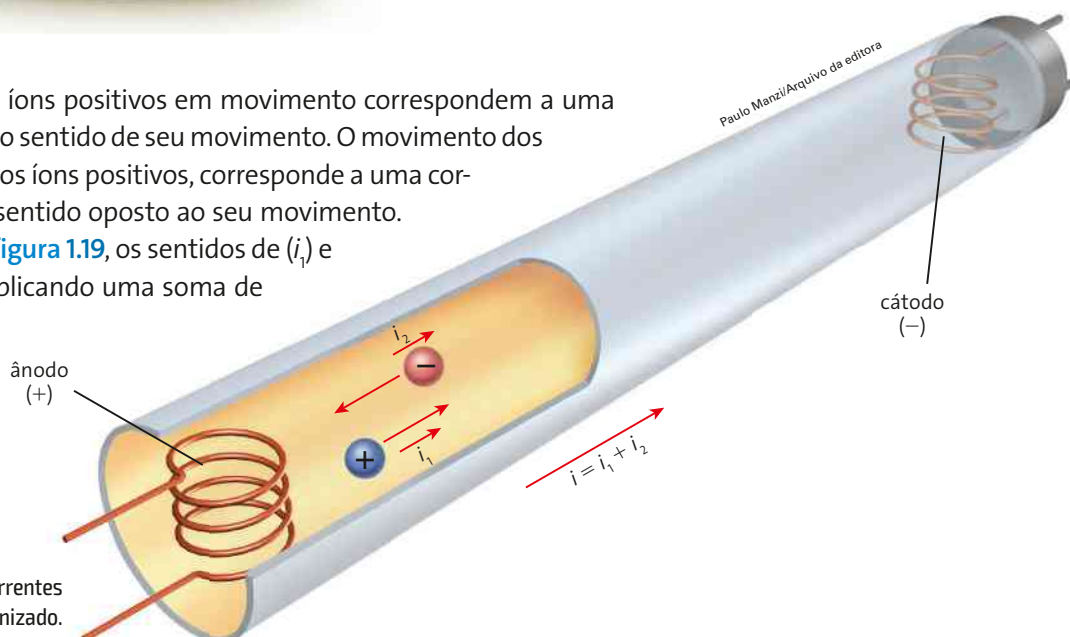


Figura 1.19 Sentido das correntes elétricas em um gás ionizado.

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

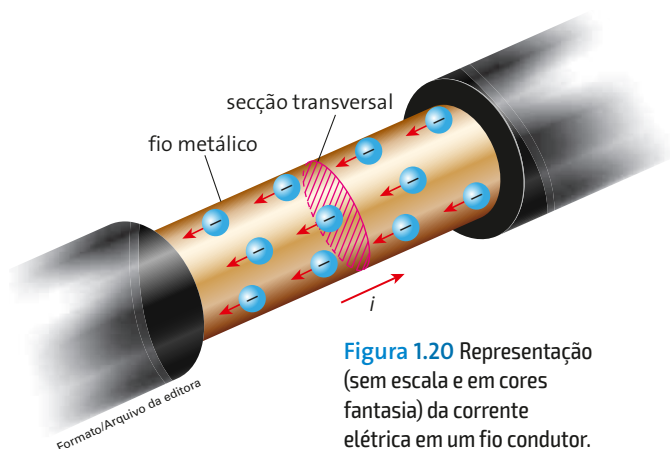


Figura 1.20 Representação (sem escala e em cores fantasia) da corrente elétrica em um fio condutor.

Uma vez estabelecido o sentido convencional da corrente elétrica, é possível propor uma medida para sua intensidade, que será descrita pela letra (i). Para isso, consideremos um pedaço de fio metálico que, ao alimentar uma lâmpada, tenha em seu interior um movimento ordenado de elétrons livres, conforme mostra a **figura 1.20**.

Ao observarmos uma de suas seções transversais, durante certo intervalo de tempo (Δt), verificamos que ela é atravessada por N elétrons livres, correspondendo a uma carga elétrica de valor absoluto, dada por:

$$\Delta Q = N \cdot e$$

Nessas condições, a intensidade média de corrente elétrica (i_m) é dada por:

$$i_m = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Essa expressão é geral e vale tanto para a corrente eletrônica como para a iônica, sendo ΔQ o valor absoluto da carga elétrica correspondente às partículas que atravessam uma seção transversal do corpo percorrido pela corrente elétrica.

No SI a intensidade de corrente elétrica é medida em **ampères (A)**, nomeado em homenagem a André Marie Ampère, físico francês.

Uma corrente de 1 A é aquela devida à passagem de uma carga elétrica de 1 C, em 1 s, pela seção transversal de um corpo sujeito a corrente elétrica.

Embora a expressão acima se refira à intensidade média da corrente elétrica, ela também pode ser utilizada para uma corrente elétrica constante no decorrer do tempo.

Para os casos nos quais a intensidade de corrente elétrica varia com o tempo, utilizamos um diagrama horário. Como exemplo, consideremos que a intensidade de corrente elétrica varia com o tempo conforme mostra o **gráfico da figura 1.21**.

Nesses casos, para obter a intensidade média de corrente elétrica (i_m), devemos determinar a quantidade de carga elétrica (ΔQ), correspondente a um intervalo de tempo (Δt), por meio do cálculo numérico da área sob a curva, conforme mostra o **gráfico da figura 1.22**:

$$\Delta Q = \text{área sob a curva}$$

Corrente elétrica em função do tempo

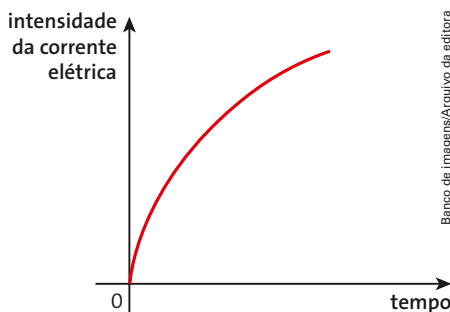


Figura 1.21

Determinação da quantidade de carga elétrica (ΔQ)

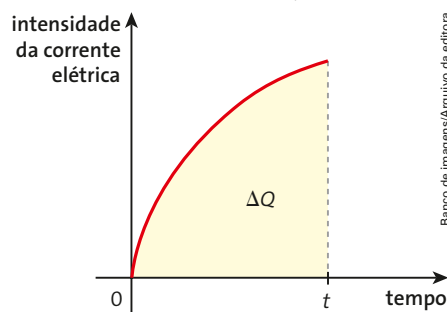
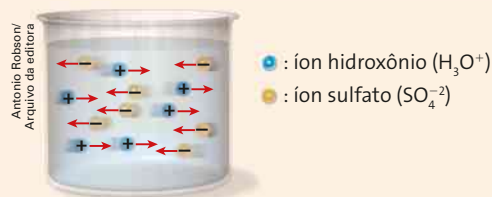


Figura 1.22

Exercício resolvido

2. Considere uma solução aquosa de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Determine a intensidade de corrente elétrica no interior dessa solução supondo que $1,0 \cdot 10^{18}$ íons sulfato e $2,0 \cdot 10^{18}$ íons hidroxônio se movimentem por segundo, conforme a figura (sem escala e em cores fantasia).



Resolução:

A intensidade de corrente elétrica total (i) é a soma algébrica das correntes de íons hidroxônio (H_3O^+) e íons sulfato (SO_4^{2-}). Cada íon hidroxônio possui uma quantidade de carga elétrica correspondente à carga elétrica de 1 próton. Cada íon sulfato possui uma quantidade de carga elétrica correspondente à carga de 2 elétrons. Assim, temos:

$$i_{\text{hidrox.}} = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} = \frac{|2,0 \cdot 10^{18} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}|}{1,0} \Rightarrow i_{\text{hidrox.}} = 0,32 \text{ A}$$

$$i_{\text{sulf.}} = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} = \frac{|1,0 \cdot 10^{18} \cdot 2 \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19})|}{1,0} \Rightarrow i_{\text{sulf.}} = 0,32 \text{ A}$$

O sentido da corrente será o do movimento dos portadores de carga positiva, ou seja, o sentido do movimento dos íons hidroxônio. Portanto:

$$i = i_{\text{hidrox.}} + i_{\text{sulf.}} \Rightarrow i = 0,32 + 0,32 \Rightarrow i = 0,64 \text{ A}$$

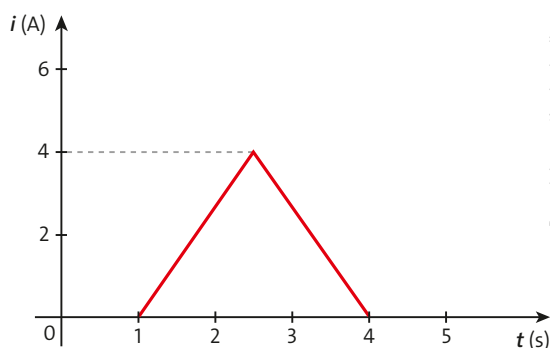
Exercícios



9. Pelas secções transversais de um fio metálico, observa-se a passagem de 10^{18} elétrons por segundo.
- Qual é o valor da corrente elétrica? $i = 0,16 \text{ A}$
 - Qual é a carga elétrica, expressa em coulomb, que atravessa as secções transversais em 10 s? $Q = 1,6 \text{ C}$

10. Observe o gráfico a seguir.

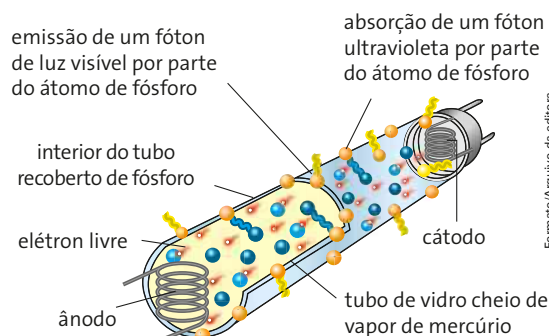
Corrente elétrica em função do tempo



Com base nele, responda:

- Qual é a quantidade de carga elétrica, em coulomb, correspondente ao intervalo de tempo entre 1 s e 4 s? $Q = 6 \text{ C}$
- Qual é a intensidade média da corrente elétrica nesse intervalo de tempo? $i = 2 \text{ A}$

11. Um tubo de vidro evacuado contém hidrogênio ionizado. Nele movem-se em sentidos opostos, como mostra a figura (sem escala e em cores fantasia) abaixo, elétrons e íons positivos com carga de um próton.



Considerando-se que, a cada segundo, $2 \cdot 10^{18}$ íons positivos e $3 \cdot 10^{18}$ elétrons atravessam uma secção transversal do tubo, determine:

- a intensidade de corrente elétrica devida ao movimento dos íons positivos; $i = 0,32 \text{ A}$
- a intensidade de corrente elétrica devida ao movimento dos elétrons; $i = 0,48 \text{ A}$
- a intensidade de corrente total no tubo. $i = 0,8 \text{ A}$



Efeitos da corrente elétrica

Efeito magnético

Toda corrente elétrica num condutor gera, ao seu redor, um campo magnético proporcional à intensidade dela. Esse assunto será visto com mais detalhes no capítulo 6, neste volume.



Sergio Dotta/Arquivo da editora

A passagem da corrente elétrica pelo fio desloca a agulha da bússola da posição norte.

Efeito Joule



Yellow/Shutterstock/Glow Images

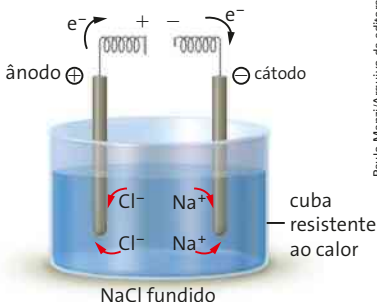
A passagem da corrente elétrica pela resistência do chuveiro, em contato com a água, provoca aquecimento.

Nos condutores metálicos se processa a transformação da energia elétrica em térmica. Esse é o princípio de funcionamento do chuveiro e do ferro elétrico. O efeito Joule pode ser entendido como o resultado das colisões entre os elétrons e os átomos da estrutura do material.

Efeito químico

Corresponde aos fenômenos elétricos nas estruturas moleculares, objeto de estudo da Eletroquímica. A exploração desse efeito é utilizada nas pilhas e na eletrólise, bem como na cromação e na niquelação de objetos.

O funcionamento de uma pilha se baseia na eletrólise, estudada em Eletroquímica. Representação sem escala e em cores fantasia.

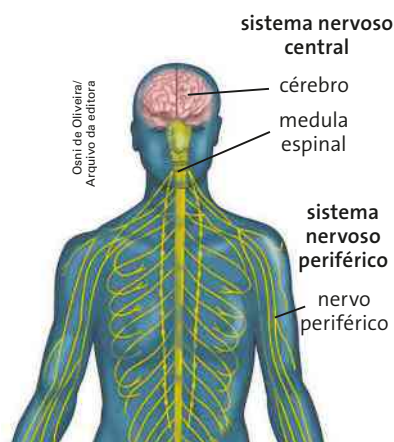


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Efeito fisiológico

Nossos impulsos nervosos são transmitidos por estímulos elétricos. Desse modo, a corrente elétrica, por ínfima que seja, provoca contrações musculares. Dependendo da intensidade, a passagem de corrente elétrica pelo nosso corpo pode provocar danos sérios, até mesmo uma parada cardíaca.

O sistema nervoso humano é responsável por reconhecer e transmitir estímulos, assim como responder a eles. Ele funciona como organizador e integrador das funções das células, dos tecidos e dos órgãos. Representação sem escala e em cores fantasia.



Osni de Oliveira/Arquivo da editora

Efeito luminoso

Também é um fenômeno elétrico de nível molecular. A excitação eletrônica pode dar margem à emissão de radiação visível, causando o efeito que observamos nas lâmpadas.



f11photo/Shutterstock

Visão noturna da cidade do Rio de Janeiro (RJ), 2016.

- Sob a orientação do professor, faça uma pesquisa sobre as intensidades de corrente elétrica e os efeitos que produzem no corpo humano. Pesquise também como o estudo desse assunto vem colaborando na fabricação de próteses que reproduzem o movimento humano.

Experimento



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



Condução de corrente elétrica em soluções eletrolíticas

Nesta atividade prática você vai montar uma pilha. Ao lado reproduzimos a pilha de Volta, ligeiramente modificada, para facilitar a montagem.

O material a ser utilizado é:

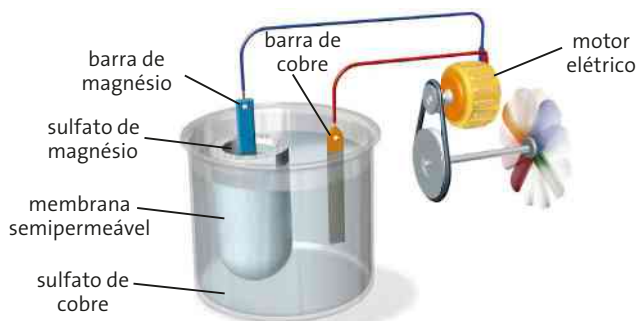
- cuba de vidro;
- membrana semipermeável (pode ser a vela de um filtro de água);
- barra de cobre;
- barra de magnésio;
- sulfato de cobre;
- sulfato de magnésio;
- pequeno motor elétrico (pode ser substituído por uma pequena lâmpada, que acende na situação descrita);
- fios de ligação.

Prepare duas soluções aquosas: uma de sulfato de cobre e outra de sulfato de magnésio. Coloque a membrana semipermeável no interior da cuba.

No interior da membrana, adapte a barra de magnésio, ligada por um fio a um dos polos do motor. Entre a cuba e a membrana, adapte a barra de cobre, ligada por um fio ao outro polo do motor.

Ao se colocar as soluções como foi indicado na representação – isto é, o sulfato de magnésio no interior da membrana e o sulfato de cobre no exterior –, o motor, acionado pela corrente elétrica produzida, movimenta-se.

1. Qual das soluções do experimento perde elétrons? E qual ganha?
2. Com base na resposta anterior, monte, em seu caderno, um esquema que mostre o sentido da corrente elétrica.



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

Antonio Robson/Arquivo da editora

Retomando



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

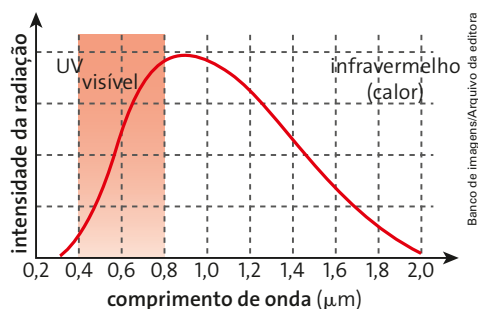


12. (Unifesp) Uma das especificações mais importantes de uma bateria de automóvel é o *ampère-hora* (Ah), uma unidade prática que permite ao consumidor fazer uma avaliação prévia da durabilidade da bateria. Em condições ideais, uma bateria de 50 Ah funciona durante 1 h quando percorrida por uma corrente elétrica de intensidade 50 A, ou durante 25 h, se a intensidade da corrente for 2 A. Na prática, o ampère-hora nominal de uma bateria só é válido para correntes de baixa

intensidade – para correntes de alta intensidade, o valor efetivo do ampère-hora chega a ser um quarto do valor nominal. Tendo em vista essas considerações, pode-se afirmar que o ampère-hora mede a:

- a) potência útil fornecida pela bateria.
- b) potência total consumida pela bateria.
- c) força eletromotriz da bateria.
- d) energia potencial elétrica fornecida pela bateria.
- X e) quantidade de carga elétrica fornecida pela bateria.

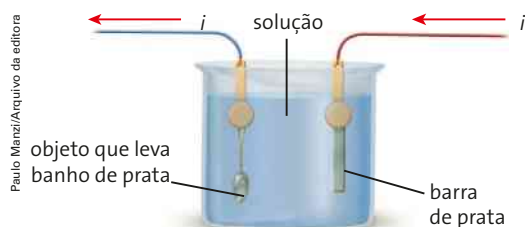
13. (Enem) A passagem de uma quantidade adequada de corrente elétrica pelo filamento de uma lâmpada deixa-o incandescente, produzindo luz. O gráfico abaixo mostra como a intensidade da luz emitida pela lâmpada está distribuída no espectro eletromagnético, estendendo-se desde a região do ultravioleta (UV) até a região do infravermelho.



A eficiência luminosa de uma lâmpada pode ser definida como a razão entre a quantidade de energia emitida na forma de luz visível e a quantidade total de energia gasta para o seu funcionamento. Admitindo-se que essas duas quantidades possam ser estimadas, respectivamente, pela área abaixo da parte da curva correspondente à faixa de luz visível e pela área abaixo de toda a curva, a eficiência luminosa dessa lâmpada seria de aproximadamente

- a) 10%. ☒ c) 25%. e) 75%.
b) 15%. d) 50%.

14. (Unicamp-SP) A figura abaixo mostra como se pode dar um banho de prata em objetos, como por exemplo em talheres. O dispositivo consiste de uma barra de prata e do objeto que se quer banhar imersos em uma solução condutora de eletricidade. Considere que uma corrente de 6,0 A passa pelo circuito e que cada coulomb de carga transporta aproximadamente 1,1 mg de prata.



- a) Calcule a carga que passa nos eletrodos em uma hora. $Q = 21\,600\text{ C}$
b) Determine quantos gramas de prata são depositados sobre o objeto da figura em um banho de 20 minutos. $m = 7,920\text{ g}$

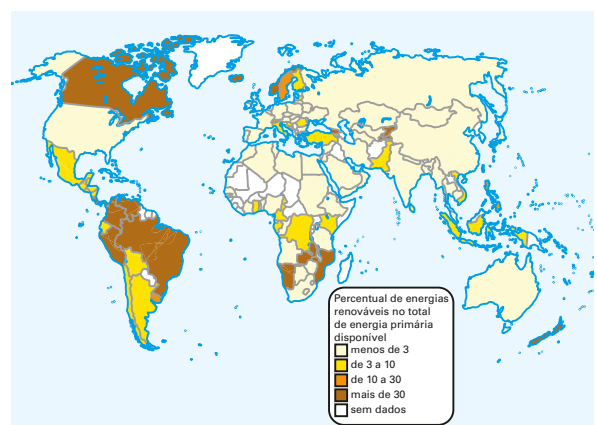
15. (Uerj) A maioria dos relógios digitais é formada por um conjunto de quatro *displays*, compostos por sete filetes luminosos. Para acender cada filete, é necessária uma corrente elétrica de 10 miliampères. O 1º e o 2º *displays* do relógio ilustrado abaixo indicam as horas, e o 3º e o 4º indicam os minutos.



Admita que esse relógio apresente um defeito, passando a indicar, permanentemente, 19 horas e 06 minutos. A pilha que o alimenta está totalmente carregada e é capaz de fornecer uma carga elétrica total de 720 coulombs, consumida apenas pelos *displays*. O tempo, em horas, para a pilha descarregar totalmente é igual a:

- a) 0,2. b) 0,5. ☒ c) 1,0. d) 2,0.

16. (Uerj) O uso de fontes renováveis de energia passou a ser encarado como fundamental para a superação das contradições ecológicas do modelo econômico atual.



Adaptado de: IBGE. *Atlas geográfico escolar*. Ensino Fundamental do 6º ao 9º ano. Rio de Janeiro, 2010.

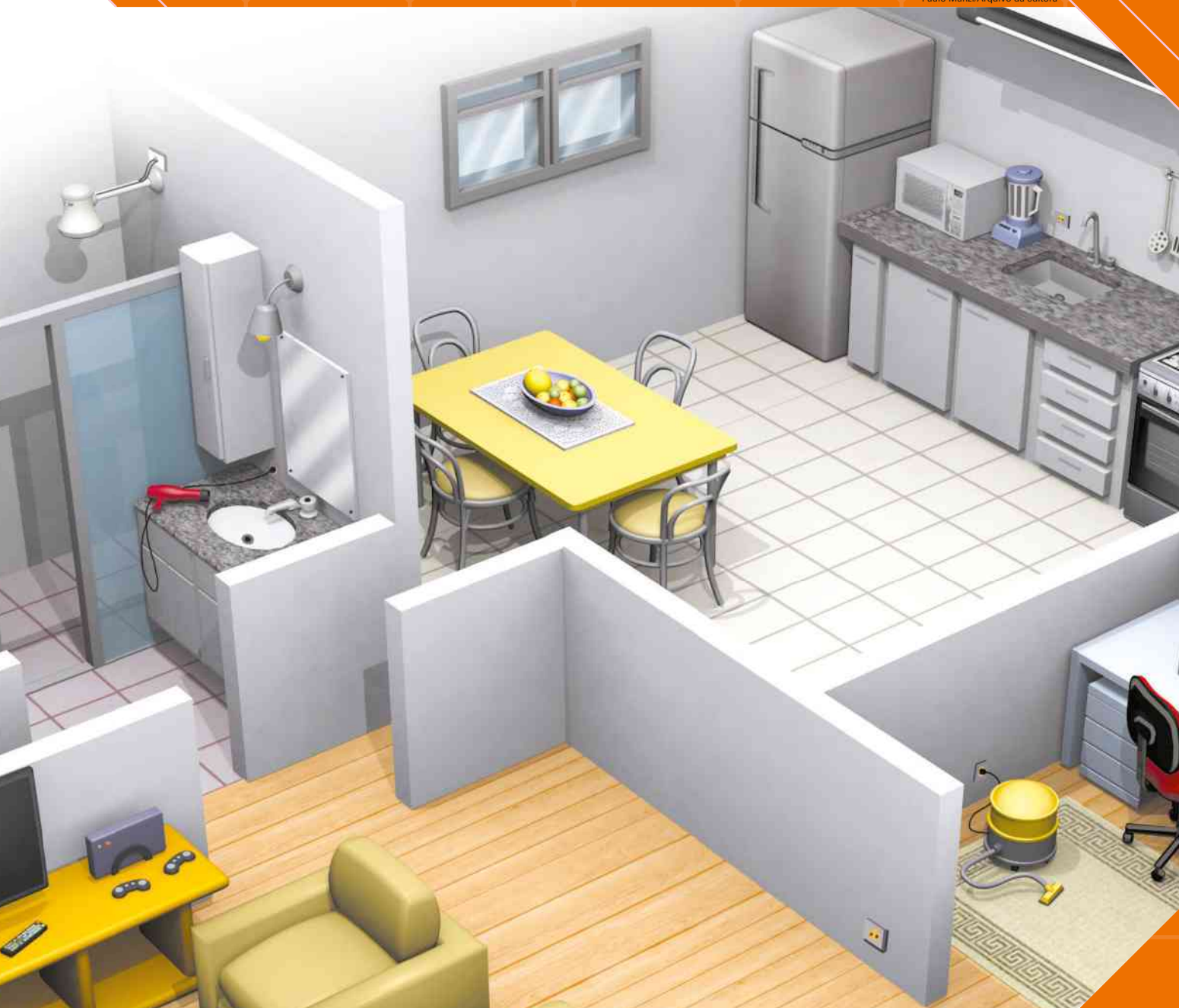
As fontes renováveis que mais contribuem para o percentual verificado na matriz energética brasileira são:

- a) solar e eólica. c) geotérmica e solar.
b) biomassa e solar. ☒ d) hidráulica e biomassa.

Os circuitos elétricos nas residências

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

Paulo Manzi/Arquivo da editora



Há uma grande diversidade de eletrodomésticos que nos auxiliam nas tarefas mais diversas, nos proporcionam entretenimento e melhoram nossa qualidade de vida. Como você sabe se pode ligar determinado aparelho elétrico em uma tomada? E quantos aparelhos elétricos podem ser ligados simultaneamente em uma tomada?



Bipolos e transformações de energia

Ferros elétricos nos ajudam na tarefa de passar roupas; liquidificadores são muito úteis no preparo de um suco; pilhas fornecem energia para o funcionamento de diversos aparelhos, como o controle remoto. O que todos esses aparelhos têm em comum?

Basicamente, todos eles são dispositivos elétricos com dois terminais – **bipolos elétricos** – e transformam energia elétrica em outra modalidade ou vice-versa.

No ferro elétrico, a energia elétrica converte-se em térmica; no liquidificador, a energia elétrica converte-se em mecânica no movimento do motor; e, nas pilhas, a energia química converte-se em elétrica (**figura 2.1**).

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

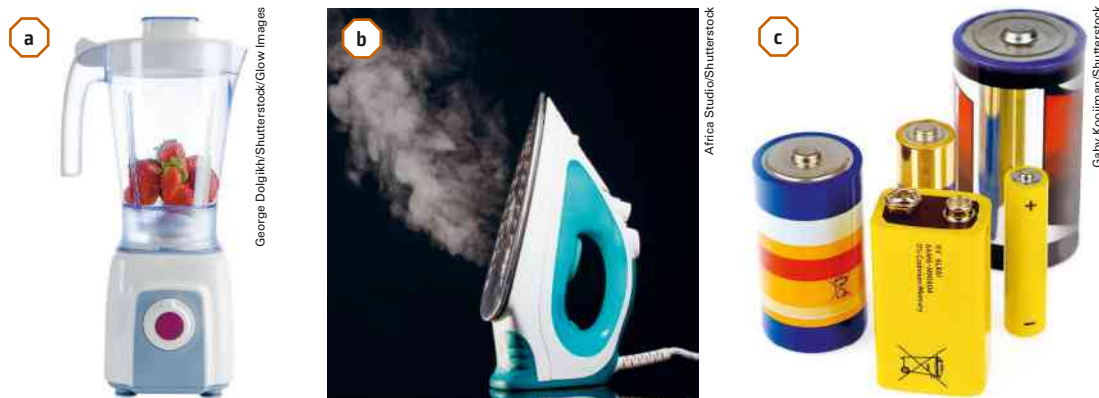


Figura 2.1 Liquidificador (elétrica → mecânica) (a); ferro elétrico (elétrica → térmica) (b); pilha (química → elétrica) (c).

Essas transformações de energia estão associadas ao trabalho de uma força microscópica, que atua nas partículas responsáveis pelas correntes elétricas quando esses dispositivos estão em funcionamento.

Quanto maior a energia transformada (ΔE) em um bipolo, maior a quantidade de carga elétrica (Δq) transportada entre seus extremos.

Diferença de potencial (ddp)

A interpretação física do conceito de **diferença de potencial (ddp)** pode ser entendida em duas situações práticas:

1. Quando dizemos que uma tomada tem tensão elétrica (ddp) de 127 V significa que quando ligamos um ferro elétrico a ela, o funcionamento dele utiliza 127 J de energia da rede de distribuição para cada coulomb de carga elétrica que é transportado entre seus terminais (**figura 2.2.a**). O terminal central das tomadas é um item de segurança; nesse caso, não se trata de um polo.
2. Quando dizemos que uma pilha é de 1,5 V significa que 1,5 J de sua energia química é consumido para cada coulomb de carga elétrica transportado entre seus terminais (**figura 2.2.b**).

Desse modo, a diferença de potencial, também conhecida como tensão elétrica, representada pela letra U , é a energia (ΔE) por unidade de carga elétrica (Δq):

$$U = \frac{\Delta E}{\Delta q}$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de diferença de potencial é o **volt (V)**.

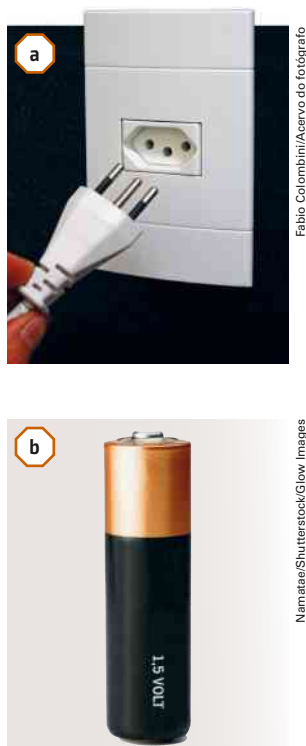


Figura 2.2 Tomada elétrica de 127 V (a) e pilha de 1,5 V (b).

As redes elétricas residenciais são de 127 V e/ou de 220 V. Assim, os aparelhos elétricos (lâmpada, geladeira, televisor, etc.) são fabricados para serem ligados em tomadas elétricas de 127 V ou 220 V (figura 2.3).

Potência em bipolos

Os bipolos são dispositivos associados a transformações de energia. Um ferro elétrico, como já mencionado, transforma continuamente energia elétrica em térmica. Essa capacidade de transformar energia elétrica em térmica é medida pelo calor gerado, em joules por segundo (J/s), que equivale à potência associada à transformação de energia térmica em calor, que no SI é o watt (W).

Por essa razão, todos os aparelhos elétricos devem ter indicados os dados nominais: a **diferença de potencial** (em volt, V) a que devem ser submetidos para funcionar normalmente; e a **potência** (em watt, W), associada à transformação de energia correspondente, a qual é medida em joules por segundo.

Por exemplo, um ferro de passar roupas em que está indicado 127 V – 800 W (figura 2.4) deverá ser submetido a uma diferença de potencial de 127 V para operar normalmente e, nessas condições, utilizará 800 W de potência, ou seja, consumirá 800 J de energia elétrica por segundo, da rede de distribuição, para produzir a mesma quantidade de calor.

RFarrarone/Shutterstock/Glow Images



Figura 2.3 Os carregadores de celulares normalmente funcionam tanto em tomadas de 127 V como de 220 V.



STILLFX/Shutterstock/Glow Images

Carlos Luvizari/Acervo do fotógrafo

Figura 2.4 Dados nominais: voltagem, em volt, e potência, em watt.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Se esse ferro for ligado a uma diferença de potencial maior do que 127 V, consumirá mais do que 800 W e esquentará mais do que o normal, correndo o risco de queimar. Se for ligado a uma diferença de potencial menor do que 127 V, consumirá menos do que 800 W e esquentará menos do que o normal.

Uma lâmpada incandescente de 127 V – 100 W deve ser submetida a uma diferença de potencial de 127 V para operar normalmente e, nessas condições, utilizará 100 W (figura 2.5). Se for ligada a uma diferença de potencial maior do que 127 V, consumirá mais do que 100 W e brilhará mais do que o normal, mas correrá o risco de queimar. Se for ligada a uma diferença de potencial menor do que 127 V, consumirá menos do que 100 W e brilhará menos do que o normal.

A razão entre a potência (P), em watt, e a diferença de potencial (U), em volt, é a intensidade de corrente elétrica (i), em ampère, com a qual o dispositivo (bipolo elétrico) vai funcionar:

$$i = \frac{P}{U} \Rightarrow P = U \cdot i$$



graja/Shutterstock

Figura 2.5 Lâmpada halógena.

Para refletir

Qual é o consumo de energia, em joules, de uma lâmpada de 100 W em uma hora de funcionamento?

Veja resposta no Manual do Professor.

Consumo de energia em uma instalação residencial

As residências são alimentadas por energia elétrica proveniente dos sistemas de distribuição. O serviço prestado à população pelas empresas, públicas ou privadas, que operam esses sistemas é cobrado de acordo com a energia elétrica consumida em cada residência.

Quando se trata de medir o consumo de energia de uma residência, o joule (J) é uma unidade muito pequena. Veja, por exemplo, a energia consumida por um chuveiro, cujo valor típico da potência de operação é 4 000 W, ligado durante meia hora (1800 s), em joules:

$$\Delta E = P \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta E = 4\,000 \cdot 1800 \Rightarrow \Delta E = 7\,200\,000 \text{ J} = 7,2 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Esse resultado nos leva a concluir que o joule (J) é uma unidade muito pequena quando se trata de medir o consumo de energia de uma residência. Para contornar essa dificuldade, as concessionárias de energia elétrica optaram por trabalhar com a potência em quilowatts (kW) e com o tempo em horas, medindo a energia consumida com a unidade quilowatt-hora (kWh) (figura 2.6).



Nº DA INSTALAÇÃO	VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR (R\$)
48102253	18 MAI 2016	36,53

DESCRIÇÃO DE FATURAMENTO		folha.: 1/1
FORNECIMENTO		
CONSUMO X TUSD (VALOR DO kWh)	57,0 kWh X R\$ 0,19896000	11,34
CONSUMO X TE (VALOR DO kWh)	57,0 kWh X R\$ 0,23715000	13,51
TRIBUTOS		
PIS/PASEP (1,22%)		0,31
COFINS (5,62%)		1,49
ITENS FINANCEIROS		
MULTA (2%) - REF VCTO: 04/2016		0,56
OUTROS PRODUTOS E SERVIÇOS		
COSIP LEI 13.479/02		9,32

Composição do fornecimento e tributos cobrados nesta conta - Res. 166/2005					
	Energia	Distribuição	Transmissão	Encargos	Tributos
R\$	13,15	5,15	0,96	5,59	1,80

Figura 2.6 Conta de energia elétrica com destaque para a unidade de medida utilizada.

Nessa nova unidade, o consumo de energia do mesmo chuveiro seria dado por:

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = 4 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h} \Rightarrow \Delta E = 2 \text{ kWh}$$

Comparando-se o quilowatt $\times$ hora (kWh) com o joule (J), temos:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

1. A diferença de potencial entre uma nuvem e a Terra é de 1200 kV. Sabe-se que quando um raio descarrega a nuvem, cerca de 1000 C são transportados pela atmosfera. Qual é a energia elétrica associada ao processo de descarga da nuvem? $E = 1,2 \cdot 10^9 \text{ J} = 1,2 \text{ GJ}$
2. Uma lâmpada de potência nominal 60 W é atravessada por uma corrente de 0,5 A, em condições nominais de uso. Qual o valor de sua diferença de potencial nominal? $U = 120 \text{ V}$

3. A tabela ao lado indica os aparelhos elétricos instalados em uma residência e o número médio de horas diárias que cada um fica ligado.

Supondo que o preço do kWh seja R\$ 0,30, calcule o custo mensal da energia elétrica dessa residência. **R\$ 69,30**



Tempo médio de funcionamento de aparelhos elétricos em uma residência

Dispositivo	Quantidade	Potência (W)	Tempo de funcionamento (horas/dia)
televisor	1	80	5
lâmpada	10	20	2
máquina de lavar roupas	1	100	1
computador	1	200	4
chuveiro	1	4 000	1
ferro de passar roupas	1	2 000	0,5
secador de cabelos	1	2 000	0,5

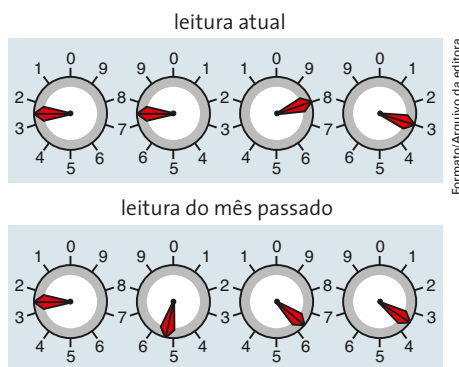
Fonte: Dados fictícios.

4. Uma pilha de lanterna que armazena 4000 J de energia química alimenta uma pequena lâmpada de dados nominais 1,5 V – 0,45 W. Em quanto tempo de funcionamento a pilha gasta toda a sua energia química (descarrega)? $t = 2,47 \text{ h}$
5. Na figura ao lado, temos as condições nominais impressas em um aparelho de ar condicionado. Com base nessas informações, responda:
 - a) Esse aparelho de ar condicionado pode ser ligado em 127 V? Justifique.
 - b) Em condições de refrigeração máxima, qual é o consumo mensal (30 dias), em kWh, se esse aparelho ficar ligado durante 4 horas por dia?

$$E = 252\,000 \text{ Wh} = 252 \text{ kWh}$$

6. (Enem) A energia elétrica consumida nas residências é medida, em quilowatt-hora, por meio de um relógio medidor de consumo. Nesse relógio, da direita para a esquerda, tem-se o ponteiro da unidade, da dezena, da centena e do milhar. Se um ponteiro estiver entre dois números, considera-se o último número ultrapassado pelo ponteiro. Suponha que as medidas indicadas nos esquemas seguintes tenham sido feitas em uma cidade em que o preço do quilowatt-hora fosse de R\$ 0,20.

CONDICIONADOR DE AR		
TIPO: MULTI-SPLIT		
MODELO: LGNAM24 (12 000)		
FASE	1ª	
FREQUÊNCIA	60 Hz	
TENSÃO	220 V~	
REFRIGERAÇÃO	MÍN.	MÁX.
CAPACIDADE	12 000 Btu/h	16 500 Btu/h
CONSUMO	1 950 W	2 100 W
CORRENTE	9,0 A	10,0 A
GÁS REFRIGERANTE R 22 1,92 kg		
Utilize um disjuntor ou um fusível de retardo		



GONÇALVES FILHO, A.; BAROLLI, E. *Instalação elétrica*. São Paulo: Scipione, 1997.

O valor a ser pago pelo consumo de energia elétrica registrado seria de:

- a) R\$ 41,80. b) R\$ 42,00. c) R\$ 43,00. d) R\$ 43,80. **x e) R\$ 44,00.**

2 Classificação dos bipolos – resistência elétrica

Os dispositivos elétricos podem ser classificados, quanto à transformação de energia, em **geradores** e **receptores**.

Geradores elétricos

Os geradores transformam outra modalidade de energia em energia elétrica. Isso significa que os portadores de carga correspondentes à corrente elétrica que atravessam o gerador têm sua energia potencial elétrica aumentada, isto é, o sentido da corrente no interior do gerador é do menor potencial (B) para o maior (A), conforme mostra a [figura 2.7](#). São exemplos de gerador: a pilha, a bateria, a usina hidrelétrica, etc.

A [figura 2.8](#) mostra a representação esquemática de um circuito bastante elementar, constituído por uma fonte de tensão, fios de ligação e um aparelho elétrico qualquer (no caso, uma lâmpada). A esse circuito foi acrescentada uma chave liga/desliga.

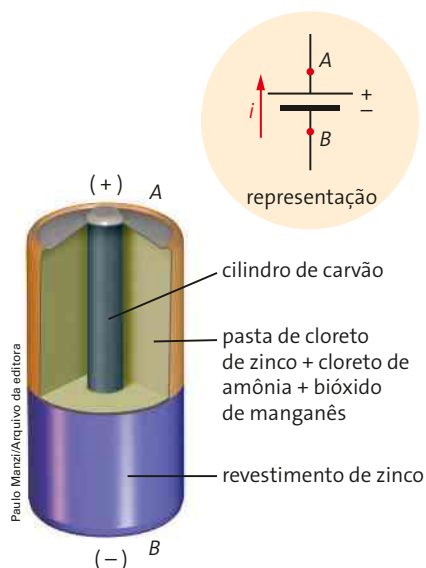


Figura 2.7 Pilha comum e sua representação esquemática nos circuitos.

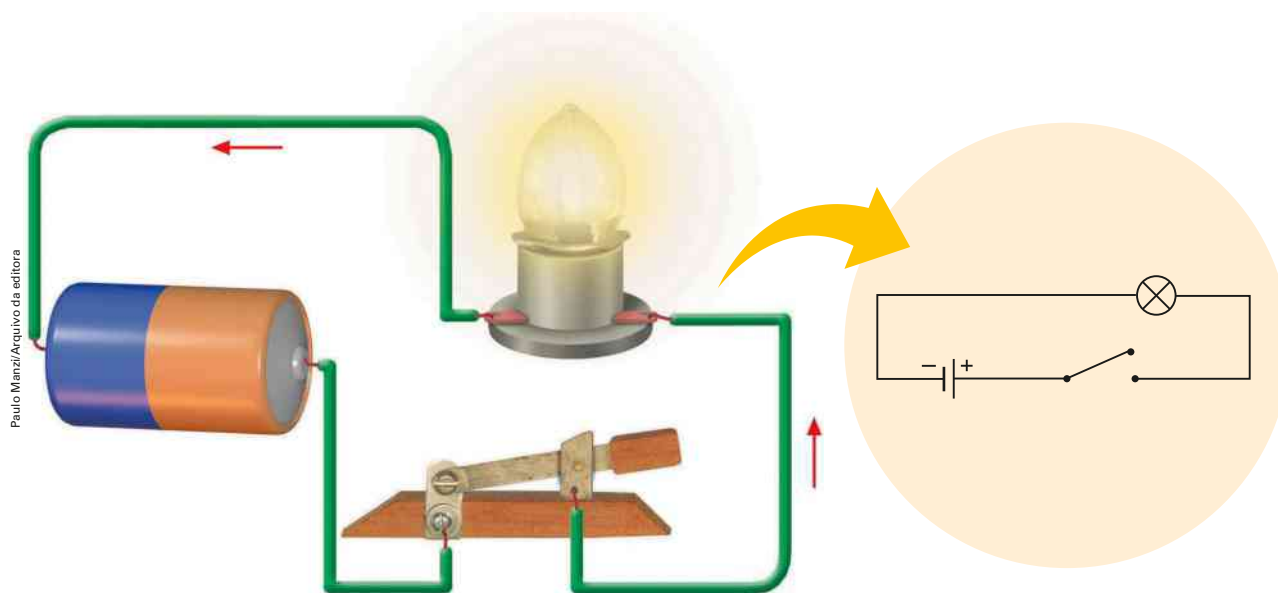


Figura 2.8 Um circuito simples e sua representação esquemática.

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

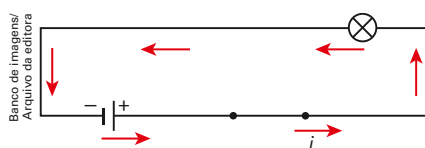


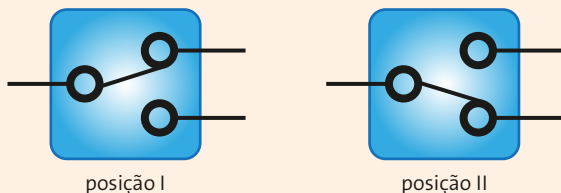
Figura 2.9 Sentido da corrente elétrica em um circuito simples.

Se a chave estiver aberta, os portadores de carga não circulam e o aparelho ficará desligado.

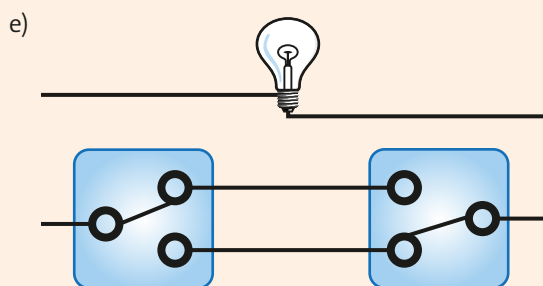
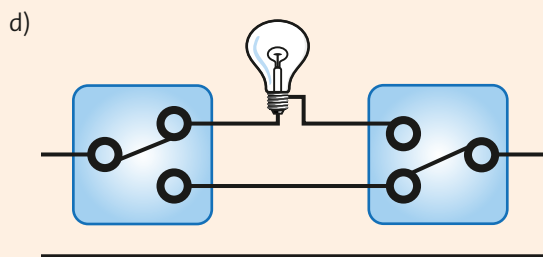
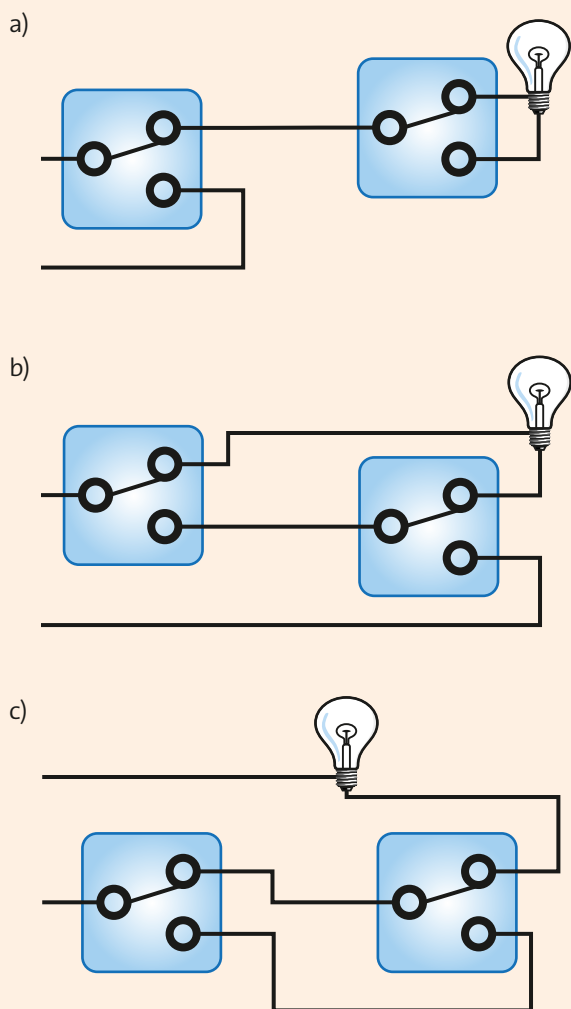
Vamos determinar o sentido da corrente elétrica na representação esquemática do circuito. Para isso, devemos olhar para o gerador. É ele que determina a diferença de potencial, que “dá as cartas” para o funcionamento do circuito. Assinalamos o sentido da corrente no gerador e em seguida o acompanhamos em todo o circuito. Dessa forma, com a chave fechada, o sentido da corrente na representação esquemática é anti-horário, conforme a [figura 2.9](#).

Exercício resolvido

1. (Enem) Para ligar ou desligar uma mesma lâmpada a partir de dois interruptores, conectam-se os interruptores para que a mudança de posição de um deles faça ligar ou desligar a lâmpada, não importando qual a posição do outro. Essa ligação é conhecida como interruptores paralelos. Esse interruptor é uma chave de duas posições constituída por um polo e dois terminais, conforme mostrado nas figuras de um mesmo interruptor. Na posição **I** a chave conecta o polo ao terminal superior, e na posição **II** a chave o conecta ao terminal inferior.

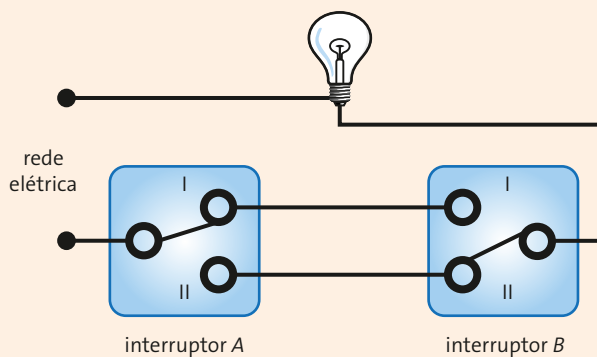


O circuito que cumpre a finalidade de funcionamento descrita no texto é:



Resolução:

O arranjo de interruptores conhecido como paralelo é representado na figura. Observe que qualquer um dos dois faz ligar ou desligar a lâmpada:



As possibilidades de ligação são as seguintes:

Interruptor A	Interruptor B	Lâmpada
posição I	posição I	acesa
posição I	posição II	apagada
posição II	posição I	apagada
posição II	posição II	acesa

A alternativa correta é a **e**.

Receptores elétricos

Os receptores, ao contrário dos geradores, transformam energia elétrica em outra modalidade de energia. São exemplos de receptor: a lâmpada, o liquidificador, o ferro de passar roupas, o rádio, etc. Eles são consumidores de energia elétrica e, de acordo com a sua finalidade, podem ser agrupados em duas categorias: os **resistivos** e os **ativos**.

Os **receptores resistivos** transformam energia elétrica exclusivamente em energia térmica. É o caso do chuveiro elétrico, do forno de resistências elétricas, do ferro de passar roupas e das lâmpadas incandescentes, as quais têm como efeito secundário a emissão de luz, ou incandescência luminosa. Nessa categoria enquadram-se os condutores em geral.

Os **receptores ativos** transformam energia elétrica em alguma outra modalidade de energia, desde que não seja exclusivamente a térmica. São os aparelhos de som, os televisores, os telefones e os motores elétricos em geral.

Os receptores ativos são chamados simplesmente de **receptores** e os resistivos, de **resistores**.

Como nos receptores a energia elétrica é transformada em outra modalidade, isso significa que os portadores de carga correspondentes à corrente elétrica que atravessam o receptor têm sua energia potencial elétrica diminuída, isto é, acompanhando o sentido da corrente, neles o potencial diminui.

Os resistores são representados por uma grandeza física denominada **resistência elétrica (R)**. Assim, a resistência elétrica (R) de um condutor submetido a uma diferença de potencial (U) e, como consequência, sendo percorrido por uma corrente elétrica de intensidade (i) é dada por (figura 2.10):

$$R = \frac{U}{i} \Rightarrow U = R \cdot i$$

Nos circuitos elétricos, os resistores são representados conforme a figura 2.11.

Para determinada tensão (ddp), a intensidade da corrente elétrica será tanto maior quanto menor for a resistência elétrica. Assim, a grandeza **resistência elétrica** está associada, basicamente, a dois fatores:

- mobilidade dos portadores de carga livres;
- quantidade de portadores de carga livres de que o condutor dispõe.

No SI, a unidade de ddp é o **volt (V)**, a de corrente elétrica é o **ampère (A)**, a de resistência elétrica é o **ohm (Ω)**.

Particularmente nos resistores, a potência elétrica pode ser expressa em função de sua resistência.

Sendo $P = U \cdot i$ e $U = R \cdot i$, temos:

$$P = R \cdot i^2$$

Sendo $i = \frac{U}{R}$, a potência elétrica num resistor também pode ser dada por:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

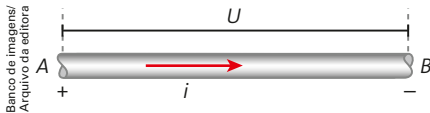


Figura 2.10 Representação de um condutor AB , sujeito a uma diferença de potencial U e percorrido por uma corrente elétrica i .

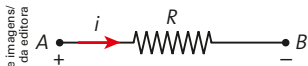


Figura 2.11 Representação esquemática de um resistor.

Exercício resolvido

2. (UFTM-MG) Na compra de uma torradeira elétrica, um cliente de uma loja de eletrodomésticos leu na embalagem do produto as seguintes informações: $P = 720 \text{ W}$ e $U = 120 \text{ V}$. Preocupado com o alto consumo de energia elétrica desse tipo de aparelho, fez alguns cálculos rápidos antes de efetuar a compra.



Sabendo que ele pretende usar a torradeira durante 15 minutos por dia, em média, reproduza os cálculos do cliente, determinando:

- a) a resistência elétrica da torradeira.
- b) o valor, em reais, a ser pago pelo cliente, ao final de 30 dias, devido ao uso da torradeira, considerando que $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ de energia elétrica custa R\$ 0,40.



Resolução:

- a) Como $P = \frac{U^2}{R}$ temos: $720 = \frac{(120)^2}{R}$ e, portanto:
 $R = 20 \, \Omega$.

- b) A energia gasta é dada por
 $0,72 \text{ kW} \cdot 0,25 \cdot 30 \text{ h} = 5,4 \text{ kWh}$.
Como cada kWh custa R\$ 0,40, o valor em reais a ser pago pelo cliente é:
 $5,4 \cdot 0,40 = 2,16$.

7. a) A diferença de tamanho está relacionada com a máxima corrente elétrica em cada uma delas.



ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

Exercícios

7. As pilhas mais comuns comercializadas são de dois tipos: “AA” e “AAA”.



- a) Se ambas são de 1,5 V, por que uma é maior que a outra?
 - b) Nas pilhas, que forma de energia é transformada em energia elétrica? **Energia química.**
8. Considere um secador de cabelos de $2800 \text{ W} - 220 \text{ V}$ em funcionamento de acordo com as condições nominais.
- a) Como você classifica o secador de cabelos: receptor ou resistor? **Receptor.**
 - b) Qual é a intensidade de corrente elétrica no secador?
 $i = 12,7 \text{ A}$
9. Considere os seguintes aparelhos elétricos: lâmpada ($100 \text{ W} - 127 \text{ V}$), ferro de passar roupas ($2200 \text{ W} - 220 \text{ V}$) e chuveiro ($4800 \text{ W} - 220 \text{ V}$). **9. a) A lâmpada.**
- a) Qual deles possui maior resistência elétrica?
 - b) Em funcionamento, durante o mesmo intervalo de tempo, qual deles consome mais energia elétrica?
O chuveiro.
10. Analisando as duas expressões para o cálculo da potência de um resistor ($P = R \cdot i^2$ e $P = \frac{U^2}{R}$), observamos que a primeira parece sugerir que, quanto maior a resistência, maior a potência e, a segunda, quanto maior a resistência, menor a potência. Como você explica essa aparente contradição? **Veja resposta no**

11. Em determinada residência pode-se ligar aparelhos elétricos tanto em 127 V como em 220 V . Nessa residência, existe um chuveiro elétrico de $2200 \text{ W} - 127 \text{ V}$ que, no inverno, não aquece a água adequadamente. Sabendo-se que a corrente elétrica máxima disponível na residência é 30 A , veja as alternativas apresentadas para resolver o problema:

Alternativa I: Ligar o chuveiro em 220 V .

Alternativa II: Trocar o chuveiro. Nesse caso, temos três opções para o novo chuveiro:

- a) $2200 \text{ W} - 220 \text{ V}$
- b) $4400 \text{ W} - 127 \text{ V}$
- X c) $4400 \text{ W} - 220 \text{ V}$**

Por qual solução você optaria? Justifique.

12. Para usar um aquecedor de $850 \text{ W} - 220 \text{ V}$, não dispondo de uma tomada de 220 V , uma pessoa resolveu ligá-lo em uma tomada de 127 V . Considere os seguintes dados:

- A resistência elétrica do aquecedor é constante.
- No aquecedor, toda a energia elétrica é transformada em térmica.

Nessas condições, qual é a potência do aquecedor?
 $P = 283 \text{ W}$

13. (Acafe-SC) Eletricidade em casa!
Suponha que você se mude de São Paulo, onde a tensão da rede é 110 V , para Florianópolis, onde a tensão da rede é 220 V , e traga consigo um aquecedor elétrico. Você pode manter a mesma potência do aquecedor substituindo a resistência original de $8,0 \, \Omega$ por outra, cujo valor, em Ω , seja:

- a) 16
- X b) 32**
- c) 4
- d) 2
- e) 64

Manual do Professor.

3 Leis de Ohm

Gráfico da ddp em função da corrente elétrica para um condutor que obedece à primeira lei de Ohm

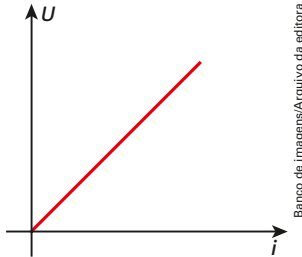


Figura 2.12

Gráfico da ddp em função da corrente elétrica para um condutor não ôhmico

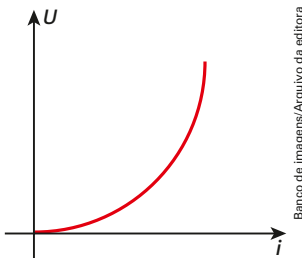


Figura 2.13

Georg Simon Ohm, realizando experimentos com condutores elétricos, observou que, em alguns deles, em particular nos metálicos, ao variar a diferença de potencial (U) aplicada entre seus terminais, a intensidade de corrente (i) que os atravessava variava na mesma proporção. Esse fato, conhecido como **primeira lei de Ohm**, pode ser expresso de várias maneiras:

- a razão entre U e i é constante, ou seja:

$$\frac{U_1}{i_1} = \frac{U_2}{i_2} = \dots = \frac{U_n}{i_n} = \text{constante};$$

- a resistência elétrica tem sempre o mesmo valor, isto é:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n;$$

- U e i são duas grandezas diretamente proporcionais. Nesse caso, o gráfico de U em função de i é uma reta passando pela origem (figura 2.12).

Os condutores que satisfazem essas condições são chamados **condutores ôhmicos** ou **resistores ôhmicos**.

Observações

- Nem todos os condutores são ôhmicos, isto é, nem todos os condutores seguem a primeira lei de Ohm. Aqueles que não seguem são chamados **condutores não ôhmicos**. Nesse caso, os gráficos de U em função de i não são retas passando pela origem (figura 2.13).
- A resistência elétrica (R) de um resistor não ôhmico pode ser calculada para cada par (U ; i), obtendo-se um valor diferente para cada um deles.
- Mesmo os condutores ôhmicos podem apresentar variações no valor da resistência, quando submetidos a altas temperaturas.

Em geral, a resistência de um condutor depende dos pontos em que estabelecermos a tensão. Por exemplo, no corpo humano a resistência elétrica entre os dois polegares é diferente daquela entre a ponta do pé e a cabeça. Além disso, nos contatos da pele com o circuito energizado, a resistência depende da umidade da pele (figura 2.14). Quanto mais úmida, menor é a resistência.



Figura 2.14 Arranjo experimental para a medida de resistência elétrica do corpo humano considerando diferentes pontos de contato.

Segunda lei de Ohm

Nas instalações elétricas residenciais e nas linhas de transmissão (figura 2.15), os fios e cabos condutores metálicos são utilizados para o transporte de energia elétrica.

Esses fios e cabos deveriam, idealmente, não apresentar perdas de energia quando utilizados. Entretanto, quando ligados em circuitos reais, apresentam perdas pelo fato de sua resistência elétrica (R) ser diretamente proporcional ao comprimento do fio (L) e inversamente proporcional à área de sua seção transversal (A). Esse fato é conhecido como **segunda lei de Ohm**.

Por essa razão se discute muito o aproveitamento do potencial hidrelétrico da Amazônia. A distância da Amazônia aos centros de consumo de energia é muito grande, implicando a necessidade da instalação de longas linhas de transmissão; portanto, com muitas perdas.

Para melhorar uma instalação residencial, são usados fios de ligação mais grossos, para diminuir as perdas. Em geral, os fios são descritos pelo seu número AWG: quanto maior for esse número, menor será a área da seção transversal do fio (figura 2.16).



Figura 2.15 Linhas de transmissão de energia elétrica da Usina Hidrelétrica Santo Antônio, em Porto Velho (RO), 2016.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

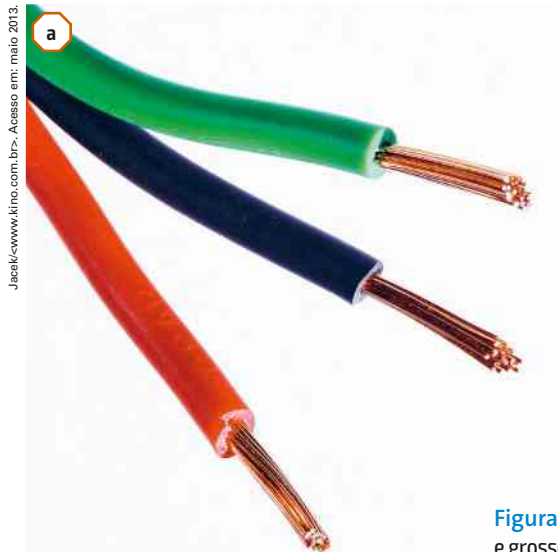


Figura 2.16 Fios: fino (AWG 0,4 mm -26) (a) e grosso (AWG 0,6 mm -22) (b).

Para expressar a segunda lei de Ohm, consideremos um fio homogêneo (figura 2.17) de comprimento (L) e área da seção transversal (A).

A resistência elétrica do fio é dada por:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

em que ρ representa a dependência em relação ao material de que o fio é constituído e recebe o nome de resistividade elétrica.



Figura 2.17 Representação de um fio homogêneo de comprimento L e área da seção transversal A .

Exercício resolvido

3. Um ferro de passar roupas comum transforma a potência de 850 W, quando ligado em 127 V. Um técnico afirma que a resistência desse ferro é muito maior do que a dos fios de ligação (AWG-16) que levam a energia elétrica até as tomadas.

- Obtenha a resistência do ferro.
- Um fio de cobre AWG-16 tem seção transversal de $1,31 \text{ mm}^2$. A resistividade do cobre é $1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Calcule a resistência correspondente a 10 m desse fio. Observe que $1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$.
- Compare, em termos percentuais, a resistência desse fio em relação à do ferro. A afirmação do técnico procede?



Resolução:

- a) A resistência do ferro de passar roupas é obtida em:

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow 850 = \frac{(127)^2}{R} \Rightarrow R = 19 \Omega$$

- b) A resistência elétrica do fio é dada por:

$$R_{\text{fio}} = \rho \frac{L}{A} \Rightarrow R_{\text{fio}} = 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{10}{1,31 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow R_{\text{fio}} = 0,12 \Omega$$

- c) Em termos percentuais, a razão (f) entre a resistência do fio e a do ferro é:

$$f = \frac{R_{\text{fio}}}{R_{\text{ferro}}} 100\%, \text{ isto é, } f = \frac{0,12}{19} 100\% \Rightarrow f = 0,63\%$$

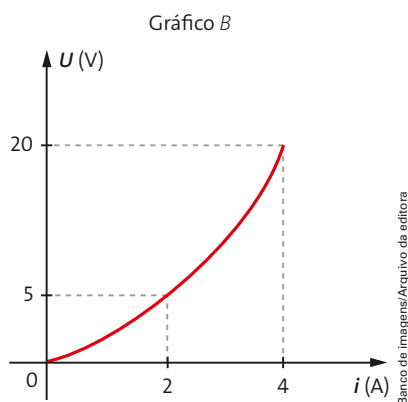
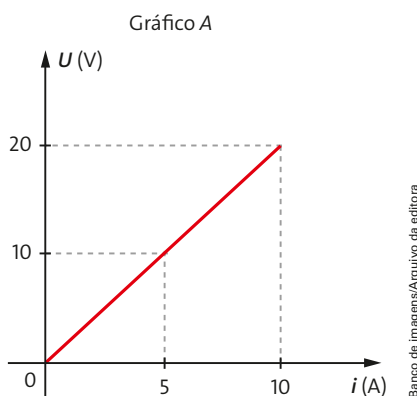
A afirmação do técnico procede, pois a resistência correspondente a 10 m do fio é apenas 0,63% da do ferro.



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

Exercícios

14. Com a finalidade de verificar a validade das leis de Ohm, em um experimento de laboratório são obtidos os gráficos tensão $\times$ corrente para dois condutores, A e B.



- Para qual deles é válida a primeira lei de Ohm? **Para o resistor representado no gráfico A.**
 - Qual será a resistência do condutor B quando a tensão nele aplicada for de 20 V? **$R_B = 5 \Omega$**
 - Qual será a resistência do condutor A se a tensão nele aplicada for de 8 V? **$R_A = 2 \Omega$**
15. Um chuveiro é construído para ser ligado em 220 V e, nessas condições, fornece uma potência de 4400 W. Supondo que o chuveiro funciona como um condutor ôhmico, qual é sua resistência elétrica se for ligado em 110 V? **$R = 11 \Omega$**
16. Um condutor utilizado na construção de um equipamento eletrônico não segue a lei de Ohm e sua corrente é dada pela equação: $i = 5 \cdot U^2$, com U medido em V e i medido em A. Calcule a resistência elétrica do condutor quando $U = 2,0 \text{ V}$. **$R = 0,1 \Omega$**
17. Para levar a energia elétrica da caixa de relógio até uma residência usam-se dois fios de cobre com 10,0 m de comprimento e seção transversal de $4,0 \text{ mm}^2$ cada um. Considerando que a resistividade elétrica do cobre é $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$:
- Qual é a resistência elétrica R de cada fio desse trecho do circuito? **$R = 4 \cdot 10^{-2} \Omega$**
 - Se a potência total fornecida à residência é de 3300 W, a uma tensão de 110 V, que porcentagem da potência total é dissipada nesse trecho do circuito? **2,2%**



4 Associações: série e paralelo

Em várias situações práticas, é comum precisarmos de certo valor de resistência que não está disponível isoladamente ou, ainda, ligar um aparelho em uma rede cuja tensão é maior que a especificada para o aparelho. Em tais circunstâncias, torna-se necessário associar os dispositivos em série e/ou em paralelo, a fim de atingir o objetivo desejado.

Antes de analisar as associações em série, em paralelo e em série-paralelo (associação mista), é necessário esclarecer alguns pontos.

Fio ideal

Para a montagem de um circuito elétrico qualquer, precisamos de fios de ligação. A função dos fios é conduzir a energia elétrica, com o deslocamento dos portadores de carga. Os fios ideais conduzem a energia elétrica aos aparelhos neles ligados, sem que haja dissipação de energia no transporte dos portadores de cargas.

Em um fio ideal, o trabalho da força elétrica para deslocar certa quantidade de carga (Δq) de um ponto X até outro ponto Y é nulo. Isso significa que os dois pontos têm o mesmo potencial elétrico.

A [figura 2.18](#) ilustra um fio, considerado ideal, e os dois pontos X e Y . Entre os pontos não há diferença de potencial, mas flui uma corrente elétrica.

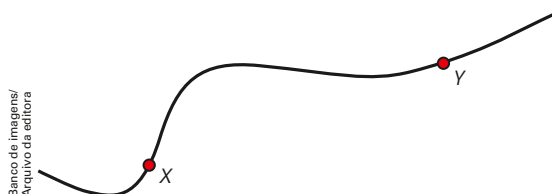


Figura 2.18 Se a resistência do fio for nula, a força elétrica não realiza trabalho no deslocamento dos portadores de carga.

Em situações práticas consideramos que os fios são ideais quando suas resistências são muito menores que os elementos que eles interligam.

Lei dos nós

Em um circuito elétrico, podemos ter vários fios ligados em um mesmo ponto. Denominamos **nó** o ponto de junção de três ou mais fios. A [figura 2.19](#) ilustra o nó A , ponto de junção dos fios 1, 2 e 3, e uma superfície imaginária que contém esse nó.

Pelo princípio da conservação da carga elétrica, o fluxo de cargas que entram na superfície deve ser igual ao das que saem dela. Essa é uma imposição física, que equivale a dizer que o nó não é uma fonte nem tampouco um dissipador de cargas elétricas. Assim, devemos ter:

$$i_1 = i_2 + i_3$$

De modo geral, podemos enunciar que o somatório das correntes que têm sentido de aproximação do nó deve ser igual ao das correntes que têm sentido de afastamento dele.

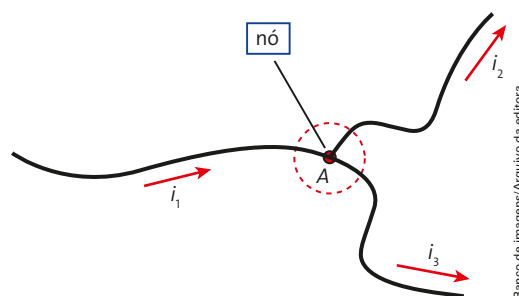


Figura 2.19 A soma das correntes elétricas que chegam a um nó é igual à soma das correntes elétricas que saem dele.

Associação em série

Dois ou mais dispositivos elétricos estão **associados em série** quando entre eles não existem nós (figura 2.20). Como decorrência, esses dispositivos são percorridos pela **mesma corrente elétrica**.

Na figura 2.21, temos a representação esquemática dessa associação. Os pontos A e C são os terminais da associação.



Figura 2.20 A corrente elétrica é a mesma nas duas lâmpadas associadas em série.

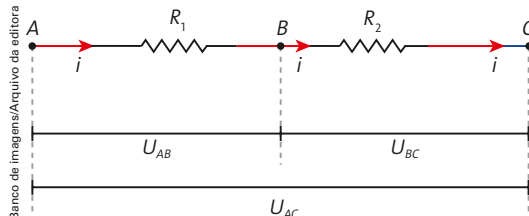


Figura 2.21 Representação esquemática da associação de dois resistores em série.

Com base na figura, a tensão entre os terminais da associação é a soma das tensões em cada resistor:

$$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$$

Essa propriedade é um dos destaques da associação em série. Como cada resistor está submetido a uma parcela da tensão total, essa associação é usada para distribuir a tensão total entre dois ou mais resistores.

Se os resistores são idênticos, as tensões a que estão submetidos também são idênticas. Como exemplo, podemos considerar duas lâmpadas idênticas, fabricadas para funcionar sob tensão de 6 V, num local em que somente se dispõe de uma bateria (fonte) de 12 V. Ligando-se essas duas lâmpadas em série, a tensão em cada uma será exatamente 6 V, e elas funcionarão em condições normais (figura 2.22).

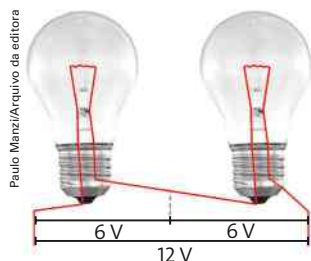


Figura 2.22 Representação de duas lâmpadas iguais ligadas em série. Cada uma fica submetida à metade da tensão total.

A desvantagem da associação em série é que, se uma das lâmpadas se queima, o circuito fica aberto, e a outra lâmpada deixa de funcionar.

Observações:

- Como a intensidade da corrente elétrica (i) é a mesma em todos os resistores de uma associação em série, as potências dissipadas em cada um deles são diretamente proporcionais às suas resistências: à maior resistência corresponde a maior potência dissipada, pois $P = R \cdot i^2$.
- As tensões individuais são proporcionais às resistências, pois $U = R \cdot i$. Como a corrente é a mesma para todos, podemos escrever: $\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$.
- Os resistores R_1 e R_2 podem ser substituídos por um único resistor (figura 2.23), denominado **resistor equivalente** ($R_{eq.}$). Este, ligado aos pontos A e C, e submetido à diferença de potencial U_{AC} , é percorrido pela corrente i . Como $U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$, temos, pela definição de resistência:

$$R_{eq.} \cdot i = R_1 \cdot i + R_2 \cdot i \Rightarrow R_{eq.} = R_1 + R_2$$

De modo geral, para vários resistores associados em série, temos:

$$R_{eq.} = \sum R$$

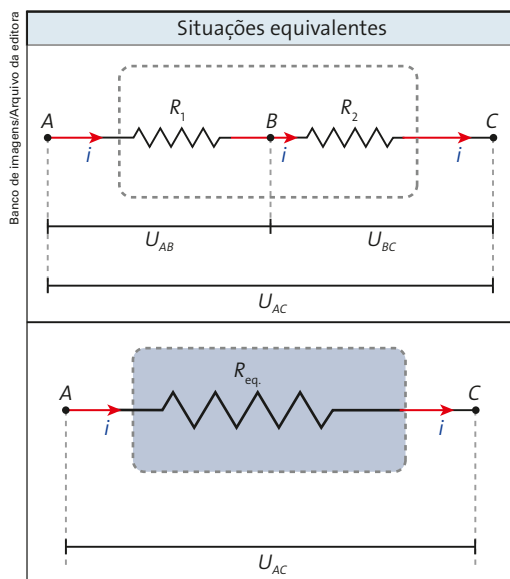


Figura 2.23 Resistor equivalente à associação em série de dois resistores.

Associação em paralelo

Como vimos, em uma associação em série, os elementos não funcionam de maneira independente, ou seja, se desligamos um deles o circuito fica aberto e os outros também param de funcionar.

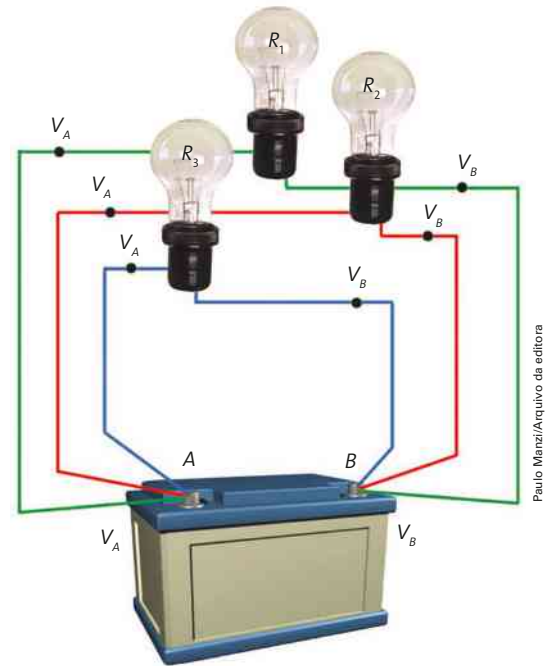
Essa situação não é conveniente, por exemplo, numa residência. O fato de apagar ou acender a lâmpada de um ambiente não deve interferir no funcionamento dos outros aparelhos. Para resolver esse problema, é utilizada a **associação em paralelo**.

Dizemos que dois ou mais aparelhos elétricos estão associados em **paralelo** se estiverem submetidos à **mesma tensão**.

Como exemplo, vamos considerar que, na bateria de 12 V de um automóvel, estão ligadas, em paralelo, três lâmpadas diferentes, cujas resistências são R_1 , R_2 e R_3 (figura 2.24).

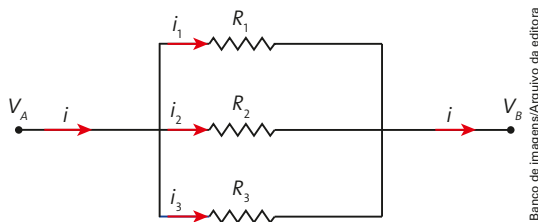
As três lâmpadas funcionam de maneira independente. O fato de apagar qualquer uma delas não interfere no funcionamento das outras, pois elas continuam sob a mesma tensão e com a mesma resistência.

Podemos representar esquematicamente a associação das três lâmpadas utilizando suas resistências, conforme ilustra a figura 2.25.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 2.24 Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) de três lâmpadas associadas em paralelo a uma bateria.



Banco de Imagens/Arquivo da editora

Figura 2.25 Esquema da associação em paralelo de três resistores. Observe que $U_{AB} = V_A - V_B$ é a tensão em qualquer um dos resistores.

Observações:

- Na associação em paralelo, pela lei dos nós:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

- À menor resistência corresponde a maior potência dissipada, pois $P = \frac{U^2}{R}$, e a tensão (U) é a mesma para todos os resistores.
- A intensidade da corrente elétrica em cada resistor é inversamente proporcional à sua resistência. Isso ocorre porque, pela definição de resistência, $U = R \cdot i$; logo:

$$R_1 \cdot i_1 = R_2 \cdot i_2 = R_3 \cdot i_3$$

$$\text{Assim, temos: } \frac{i_1}{i_2} = \frac{R_2}{R_1} \text{ e } \frac{i_2}{i_3} = \frac{R_3}{R_2}$$

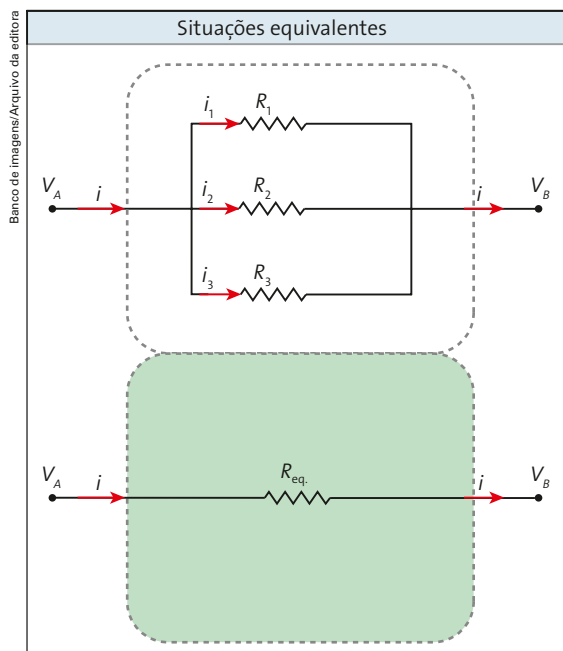


Figura 2.26 Resistor equivalente à associação de três resistores em paralelo.

- Para a associação em paralelo, podemos também usar a ideia de substituir todos os resistores associados por um único: o resistor equivalente.

Conforme a **figura 2.26**, temos:

$$\begin{cases} i = i_1 + i_2 + i_3 \\ i = \frac{U}{R} \end{cases}$$

$$\text{Assim: } \frac{U_{AB}}{R_{eq.}} = \frac{U_{AB}}{R_1} + \frac{U_{AB}}{R_2} + \frac{U_{AB}}{R_3}$$

$$\text{Logo: } \frac{1}{R_{eq.}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Para apenas dois resistores, a equação anterior pode ser desenvolvida como:

$$\frac{1}{R_{eq.}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$$

$$R_{eq.} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Exercício resolvido

- 4.** (UFMG) Reginaldo queria aprender sobre associação de lâmpadas em série e em paralelo. Para isso, usou duas boquilhas de porcelana para colocar as lâmpadas. Em cada lâmpada, lê-se: 60 W e 127 V.



Indique, a seguir, a alternativa que completa **corretamente** o enunciado:

Ao ligar as lâmpadas da maneira mostrada na figura ao lado, numa tomada de 127 V, Reginaldo observou que:

- as duas lâmpadas brilhavam da mesma maneira, cada uma com uma potência de 60 W.
- as duas lâmpadas brilhavam da mesma maneira, mas cada uma com uma potência de 30 W.
- o brilho da lâmpada 1 era maior que o brilho da lâmpada 2.
- o brilho da lâmpada 1 era menor que o brilho da lâmpada 2.

Resolução:

A figura mostra ambas as lâmpadas em paralelo e ligadas corretamente à tomada. Logo, ambas estão submetidas a uma tensão de 127 V e apresentam potência de 60 W, brilhando da mesma maneira.

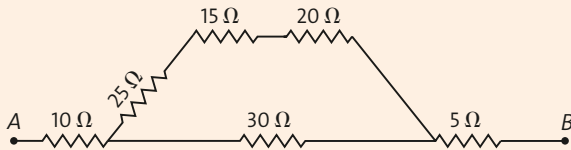
Alternativa **a**.

Associação mista de resistores

Vimos os tipos básicos de associações de resistores – série e paralelo. Composto-se esses dois tipos de associação, podemos montar uma grande variedade de circuitos elétricos. Os resistores associados pela mistura desses dois tipos também podem ser substituídos por um resistor que isoladamente corresponde ao conjunto, ou seja, um resistor equivalente. A substituição é feita por partes, até ser atingida a meta final: reduzir a um único resistor que seja equivalente à associação. Acompanhe o exercício resolvido 5.

Exercício resolvido

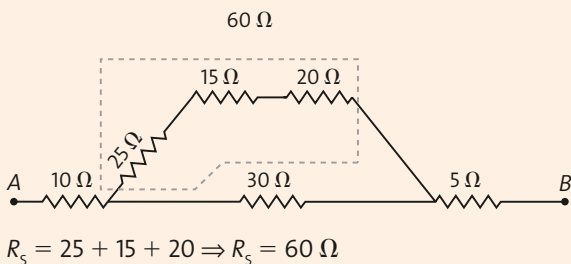
5. A figura ilustra vários resistores associados, que não estão exclusivamente nem em série nem em paralelo.



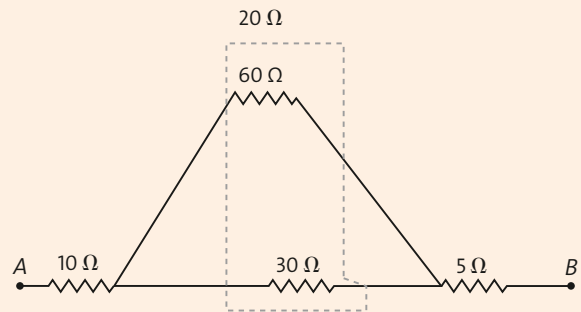
Determine o resistor equivalente entre os pontos A e B.

Resolução:

Começemos simplificando os trechos em que os resistores estão em série, conforme mostra a figura.

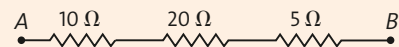


Em seguida, resolvemos as associações em paralelo.



$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{60} + \frac{1}{30} = \frac{1+2}{60} = \frac{1}{20} \Rightarrow R_p = 20 \Omega$$

O circuito equivalente é:



Como estão todos em série:

$$R = 10 + 20 + 5 \Rightarrow R = 35 \Omega$$

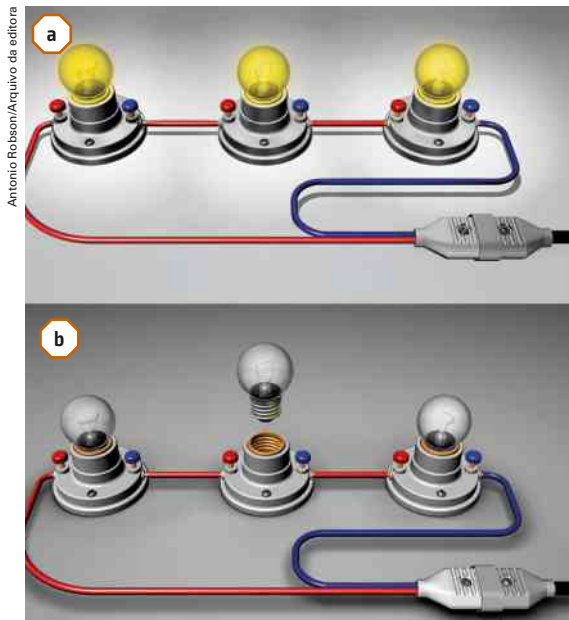
Ilustrações técnicas: Banco de Imagens/Arquivo da editora

Exercícios

Veja as respostas dos exercícios 18, 19.a e 20 no Manual do Professor.



18. As três lâmpadas mostradas na figura (sem escala e em cores fantasia) a seguir estão associadas em série e acesas (figura a). Quando uma delas é retirada do circuito, conforme mostra a figura b, as outras duas apagam.



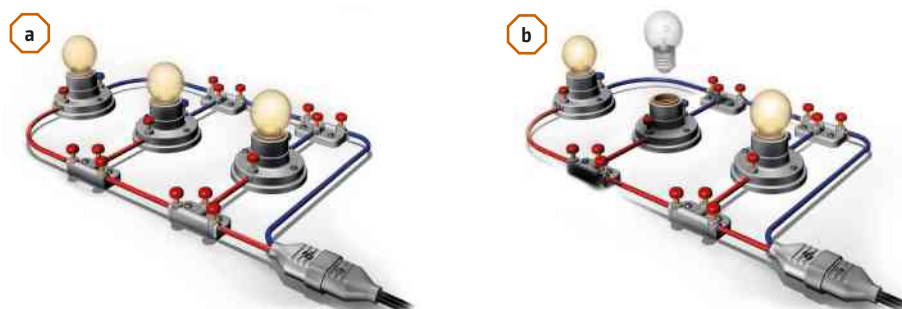
Explique por que isso acontece.

19. Uma lâmpada possui dados nominais 12 V – 48 W. Para colocá-la em funcionamento, dispõe-se de uma fonte de tensão de 120 V, fios de ligação e um resistor auxiliar.

- Utilizando os elementos descritos, faça um esquema, no seu caderno, de como a lâmpada deve ser associada ao resistor para funcionar dentro das condições nominais.
- Qual é a intensidade da corrente elétrica que percorre a lâmpada, se ela está funcionando de acordo com as especificações? $i = 4 \text{ A}$
- Determine a tensão no resistor auxiliar, bem como o valor de sua resistência. $U = 108 \text{ V}; R = 27 \Omega$
- Qual é a resistência equivalente do circuito formado pela lâmpada e pelo resistor auxiliar? $R = 30 \Omega$

20. Em razão dos movimentos repetitivos de ligar e desligar aparelhos elétricos, pode haver mau contato entre os pinos de conexão dos aparelhos e a tomada na parede. O mau contato corresponde a uma resistência de valor muito alto. Isso acarreta maior dissipação de potência, o que deixa a tomada com regiões escurecidas, em razão dos aquecimentos localizados, e diminui o desempenho dos aparelhos. Em suma, há desperdício de energia elétrica. Como você explica o fato de a maior potência ser dissipada na região de mau contato?

21. As três lâmpadas da figura (sem escala e em cores fantasia) a seguir estão associadas em paralelo. Quando uma delas é retirada, as outras lâmpadas continuam a ter a mesma luminosidade, ou seja, não há alteração nas correntes que as atravessam.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Explique por que isso acontece. [Veja resposta no Manual do Professor.](#)

22. Duas lâmpadas, uma de 6 W – 12 V e outra de 12 W – 12 V, estão associadas em paralelo e ligadas a uma bateria de 12 V.
- Qual é a intensidade de corrente elétrica fornecida pela bateria? $i = 1,5 \text{ A}$
 - Determine a resistência equivalente da associação das duas lâmpadas. $R = 8 \, \Omega$
 - Qual é a potência total dissipada pela associação das duas lâmpadas? $P = 18 \text{ W}$
23. Na tabela estão indicados os dispositivos elétricos existentes em uma residência, alimentada por uma ddp de 127 V, bem como a quantidade de cada um, sua potência e tempo de funcionamento em horas por dia.

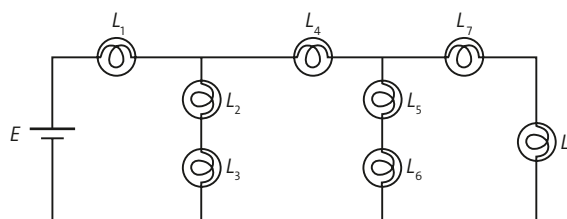


Funcionamento de dispositivos elétricos de uma residência

Dispositivo	Quantidade	Potência (W)	Tempo de funcionamento (horas/dia)
televisor	1	80	5
lâmpada	10	100	2
máquina de lavar roupas	1	100	1
computador	1	200	4
chuveiro	1	4 000	1
ferro de passar roupas	1	2 000	0,5
secador de cabelos	1	2 000	0,5

Fonte: Dados fictícios.

- Se todos os dispositivos estiverem no mesmo circuito, qual é a potência total dele? $P = 9 380 \text{ W}$
 - Sabendo-se que, por norma de engenharia, a potência máxima de cada circuito é 2 400 W, determine o número mínimo de circuitos necessários para que todos os aparelhos possam funcionar. **4 circuitos.**
24. (Enem) Considere a seguinte situação hipotética: ao preparar o palco para a apresentação de uma peça de teatro, o iluminador deveria colocar três atores sob luzes que tinham igual brilho e os demais sob luzes de menor brilho. O iluminador determinou, então, aos técnicos, que instalassem no palco oito lâmpadas incandescentes com a mesma especificação (L_1 a L_8), interligadas em um circuito com uma bateria, conforme mostra a figura.



Banco de Imagens/Arquivo da editora

Nessa situação, quais são as três lâmpadas que acendem com o mesmo brilho por apresentarem igual valor de corrente fluindo nelas, sob as quais devem se posicionar os três atores?

- L_1, L_2 e L_3
- L_2, L_3 e L_4
- L_2, L_5 e L_7
- L_4, L_5 e L_6
- L_4, L_7 e L_8

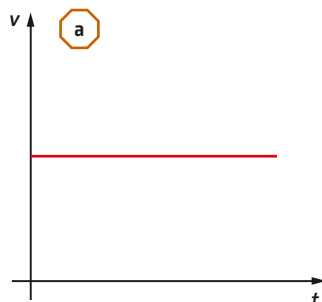


Instalações elétricas residenciais

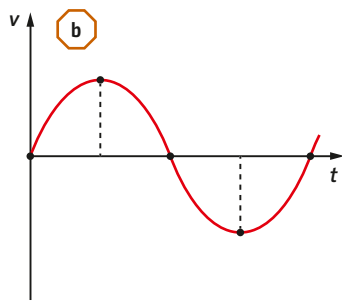
Diferentemente das pilhas e baterias, que apresentam potenciais elétricos constantes, os potenciais fornecidos às residências pelas redes elétricas são alternados (AC); em decorrência, as correntes que circularão nos circuitos também serão (figura 2.27).



Gráficos da tensão elétrica em função do tempo



Banco de Imagens/Arquivo da editora



Banco de Imagens/Arquivo da editora

Figura 2.27 Tensão constante (a); tensão alternada (b).

Física tem História



Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

A guerra das correntes

No final do século XIX, dois gigantes do setor elétrico travaram uma batalha feroz que passou a ser conhecida como "a guerra das correntes".

De um lado, Thomas Edison (1847-1931), inventor da primeira lâmpada funcional e de muitos outros dispositivos elétricos, instalou em Manhattan uma pequena rede local para distribuir energia usando corrente contínua. Nesse sistema, a eletricidade flui sempre no mesmo sentido, sofrendo grandes perdas no caminho, pela resistência das linhas. Para distâncias superiores a 2 km, seria preciso usar uma corrente inicial tão forte que queimaria lâmpadas e motores, ou fabricar cabos de uma grossura impraticável.

Do outro lado da disputa estava George Westinghouse (1846-1914), inventor do sistema de freios ferroviários a ar comprimido que havia comprado patentes de Nikola Tesla (1856-1943), ex-funcionário e desafeto de Edison. Tesla introduzira importantes aperfeiçoamentos no método de corrente alternada, no qual a corrente flui ora num sentido ora no outro. A ideia era usar uma tensão mais alta para transmitir a energia a longas distâncias e reduzi-la até um nível conveniente no local de consumo.

[...] Edison lançou mão de todos os truques de *marketing* para desacreditar a corrente alternada. Chegou até a promover o uso do sistema rival na recém-inventada cadeira elétrica, para demonstrar o perigo da alta voltagem.

Por fim, a primeira tentativa bem-sucedida de distribuir eletricidade a longa distância foi demonstrada em 1891, durante a "Exibição Eletrotécnica de Frankfurt", na Alemanha. A energia – gerada sob a forma alternada numa fábrica de cimento 175 km mais ao sul – era transportada por linhas elevadas para acender um conjunto de mil lâmpadas na entrada da exposição e, ironicamente, acionar uma roda-d'água artificial. O sucesso espetacular do evento foi um fator decisivo na questão, e escolheu-se o método alternado.

Em poucos anos, o número de geradores cresceu para dez, e as linhas de transmissão chegaram a Nova York. A Broadway parecia arder à luz das lâmpadas; trens e metrô enchiam a cidade de ruído. A energia elétrica, elemento crucial para quase toda a tecnologia moderna, logo estaria em toda parte.

MOSLEY, Michael; LYNCH, John. *Uma história da ciência: experiência, poder e paixão*. Rio de Janeiro: Zahar, 2011. p. 179.

- De acordo com o texto, qual é a principal vantagem da corrente alternada em relação à corrente contínua no fornecimento de energia elétrica?



Figura 2.28 Caixa de entrada de energia elétrica em uma residência.

É comum, em circuitos de corrente alternada, trabalhar com o **valor eficaz da tensão**: aquele que, se permanece constante, resulta na mesma quantidade de energia elétrica transformada. Dessa forma, é possível analisar os circuitos de tensão alternada como se ela fosse constante.

Na maior parte das residências em nosso país, chegam ao medidor de entrada da instalação três fios: **dois fios fases** e um **fio neutro** (figura 2.28). Nesse caso, as tensões disponíveis são 127 V e 220 V.

Como vimos, para que o fato de, por exemplo, uma lâmpada estar acesa ou apagada não interfira no funcionamento dos outros dispositivos elétricos, é comum nas residências que todos os aparelhos elétricos estejam associados em paralelo.

Como na associação em paralelo a corrente total é a soma das correntes dos componentes, para não sobrecarregar os fios é comum dividir a instalação em grupos de circuitos, e as correntes mais elevadas passam apenas pelos fios de entrada da rede externa. Esses fios de entrada serão então mais grossos, para suportar essas elevadas correntes.

A figura 2.29 mostra o esquema de uma instalação residencial com três circuitos: um para a sala, outro para a cozinha e um terceiro para o chuveiro. A alta potência desse último aparelho justifica a necessidade de um circuito separado para ele, com fios mais grossos.

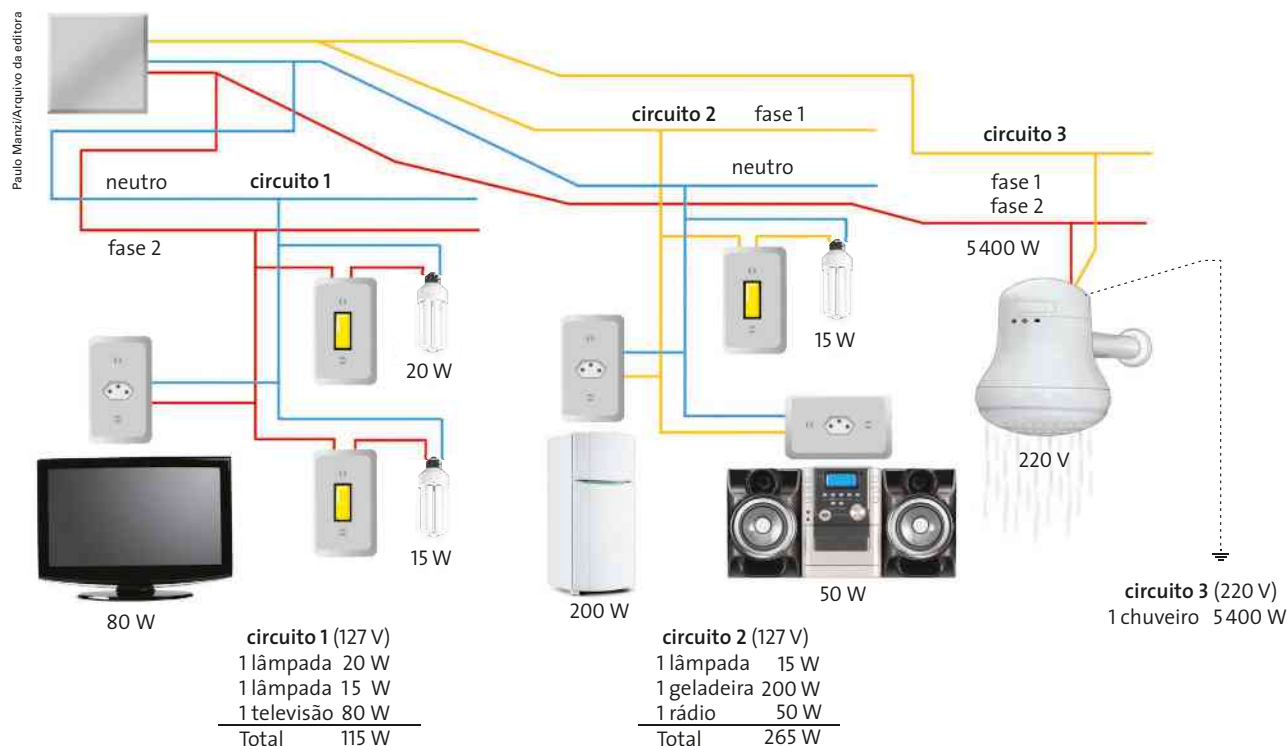


Figura 2.29 Esquema do circuito elétrico de uma residência. Representação sem escala e em cores fantasia.

No circuito que utiliza a fase 2 e o fio neutro (circuito 1), a tensão é 127 V. O mesmo é válido para o circuito 2 (127 V), que utiliza a fase 1 e o neutro. Já para o circuito 3, que utiliza as fases 1 e 2 e o neutro, a tensão é 220 V.

Vejamos agora alguns cuidados para a segurança dos usuários e da instalação.

Observe na figura que, em todas as lâmpadas, o interruptor liga, ou desliga, o fio energizado – o fio fase – e não o neutro. Do ponto de vista do funcionamento da lâmpada, não faria diferença se o interruptor ligasse ou desligasse o neutro. No entanto, se a lâmpada queimar, uma pessoa poderá levar um choque se quiser trocá-la após desligar o interruptor e o fio interrompido for o neutro, pois o bocal estará energizado.

Um **curto-circuito** pode elevar demasiadamente a intensidade da corrente elétrica, aquecendo os fios, com risco de incêndio. Para evitar que as correntes atinjam valores elevados, os circuitos precisam de elementos de proteção. Dentre esses elementos, um dos mais antigos é o chamado **fusível tipo rolha** (figura 2.30).

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

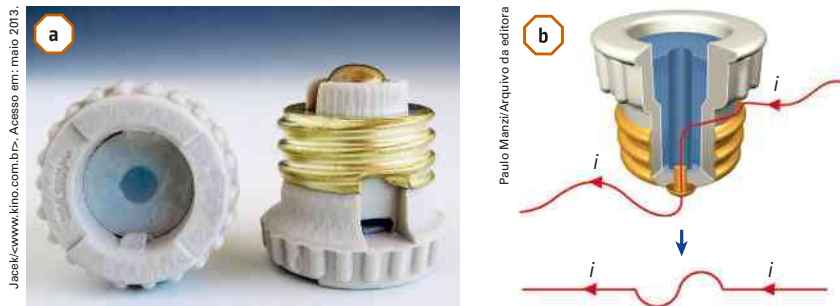


Figura 2.30 Fusível tipo rolha (a) e a representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) de um fusível (b).

Esse elemento de proteção recebe o nome de fusível porque é passível de fusão quando a corrente elétrica supera determinado valor. A figura 2.31 mostra outro tipo de fusível: o de cartucho.

Atualmente, os elementos de segurança mais utilizados são os **disjuntores**. Assim como os fusíveis, eles se abrem quando a intensidade da corrente excede determinados valores, mas podem ser rearmados após corrigido o problema, reduzindo o custo da manutenção (figura 2.32).



Figura 2.31 Fusível de cartucho.



Figura 2.32 Disjuntor. A chave permite rearmar o elemento depois de corrigido o problema.

Além de elementos de proteção geral, na chegada da rede externa, as normas de segurança determinam que cada circuito tenha o seu próprio elemento de proteção. Isso permite que se possa fazer a manutenção em uma parte da casa, sem desligar a energia elétrica de outros circuitos. É o que ocorre quando se usam, por exemplo, disjuntores para circuitos individuais. Outro elemento de segurança é o **fio terra**. A ligação à terra é representada pelo símbolo da figura 2.33.

Suponha que, por algum defeito, um dos fios energizados do chuveiro encoste na sua carcaça metálica externa. Se uma pessoa com o corpo molhado encostar na carcaça, poderá levar um choque de grande intensidade. Para evitar esse risco, liga-se a carcaça à terra por um fio bem grosso que desviará a maior parte da energia elétrica para o solo se houver algum defeito.

Em alguns países existe a exigência desses fios terra em todas as tomadas. Nesse caso, mesmo as tomadas de 127 V, tem três furos: fase, neutro e terra (figura 2.34). No Brasil, essa norma já entrou em vigor.

Em resumo, temos:

- **Fios fase e neutro:** são usados para distribuir a energia da rede elétrica às tomadas e aparelhos em geral de uma residência. O fio fase é energizado (potencial elétrico de 127 V) e o neutro possui potencial próximo de zero.
- **Fio terra:** usado para prevenir a queima de equipamentos elétricos e choques, por exemplo.

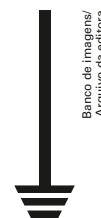


Figura 2.33 Representação esquemática do fio terra.



Figura 2.34 Tomada de 127 V com três furos: fios fase, neutro e terra.

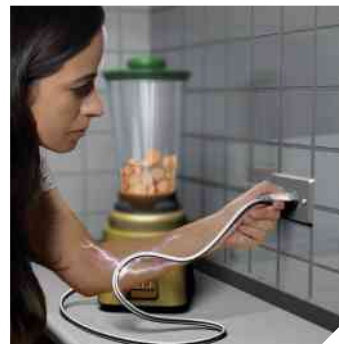


Choque elétrico e curto-circuito

Basicamente, existem três categorias de choque elétrico:

- 1. Choque produzido por contato com o circuito energizado:** ocorre pelo contato direto da pessoa com a parte energizada da instalação (fio fase). O choque dura enquanto permanecer o contato e a fonte de energia estiver ligada. As consequências podem ser pequenas contrações ou até lesões irreparáveis.

Choque produzido por contato com o circuito energizado dos fios desencapados de equipamentos elétricos.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

- 2. Choque produzido por contato com o corpo eletrizado:** ocorre por eletricidade estática. A duração desse tipo de choque é muito pequena, apenas o suficiente para descarregar a eletricidade contida no elemento energizado.

Na maioria das vezes esse tipo de choque elétrico não causa danos, em razão da curtíssima duração.



- 3. Choque produzido por raio (descarga atmosférica):** ocorre quando acontece uma descarga atmosférica e esta entra em contato direto ou indireto com uma pessoa. Os efeitos desse tipo de choque são terríveis e imediatos. Podem ocorrer queimaduras graves e até a morte imediata.

A pele humana seca é um bom isolante, dando ao corpo humano uma resistência elétrica da ordem de $100\,000\ \Omega$. Porém, com a pele molhada, a resistência média do corpo humano, medida da palma de uma das mãos à palma da outra, ou até a planta do pé, é da ordem de $1500\ \Omega$. O rompimento da pele por ação da corrente elétrica reduz essa resistência a cerca de $500\ \Omega$.

Ao passar pelo corpo humano, dependendo da intensidade, a corrente elétrica pode danificar os tecidos (nervoso e cerebral), provocar coágulos nos vasos sanguíneos e queimaduras na pele, além de paralisar a respiração e os músculos cardíacos. Veja a tabela ao lado.



Sergio Ranalli/Pulsar Imagens

O Brasil é o país com maior incidência de raios no mundo. Londrina (PR), 2015.



Efeitos estimados da corrente elétrica

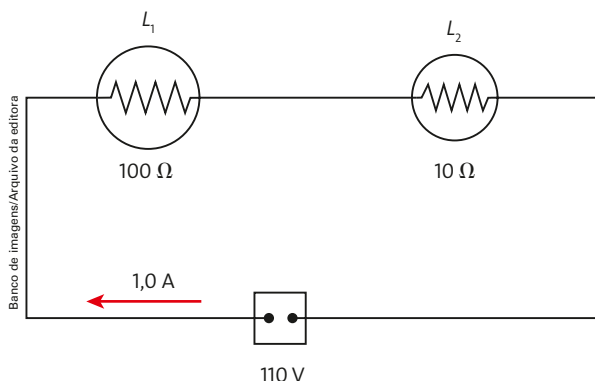
Corrente elétrica	Efeito
0,0010 A = 1,0 mA	Praticamente não causa danos.
0,100 A = 100 mA	Ataque cardíaco.
2,0 A	Parada cardíaca.

Fonte: UNIVERSIDADE Federal Rural do Rio de Janeiro.
Disponível em: <www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/eletric.htm>.
Acesso em: 11 jan. 2016.

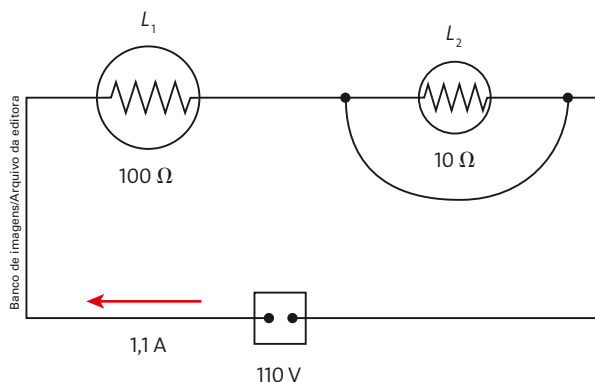
Curto-circuito

Estabelece-se um curto-circuito quando dois pontos de um circuito são interligados por um fio ideal. Se, em razão do superaquecimento do fio, a intensidade de corrente elétrica aumentar acima do limite suportado, pode ocorrer um incêndio. Vejamos dois exemplos.

Na figura, temos a ilustração de duas lâmpadas ligadas em série a uma ddp de 110 V. A intensidade de corrente elétrica é de 1,0 A nas duas lâmpadas.



Se provocamos um curto-circuito na lâmpada L_2 , ela apaga, pois não passa corrente elétrica por seu filamento. A intensidade de corrente elétrica aumenta para 1,1 A e a potência dissipada na lâmpada L_1 aumenta 21%, o que pode, ou não, fazer com que ela queime. A figura mostra a lâmpada L_2 em curto-circuito.



E se o curto-circuito é provocado na lâmpada L_1 ? Nesse caso, temos corrente elétrica somente na lâmpada L_2 , cujo valor se eleva para 11 A, o que significa que a potência dissipada em calor na resistência elétrica da lâmpada L_1 aumenta 121 vezes, de 10 W para 1210 W. Isso certamente provocará a queima da lâmpada e o derretimento dos fios.

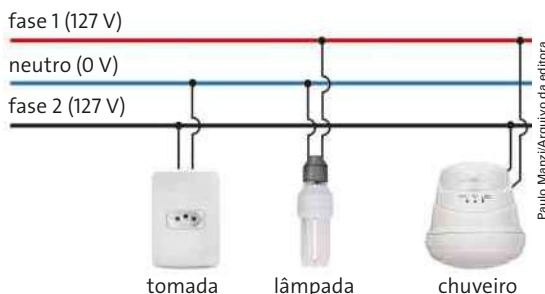
Nas residências, o curto-circuito ocorre se o fio fase entra em contato direto com o neutro, em razão, por exemplo, de uma fiação malconservada ou de um defeito na tomada ou no plugue do equipamento elétrico.

Como as resistências elétricas dos fios de ligação são muito menores do que a resistência do equipamento ligado à rede, um curto-circuito provoca um aumento excessivo na corrente elétrica. Se não houver um dispositivo de proteção (fusível), a potência dissipada em calor nos fios pode provocar um incêndio.

1. Explique por que o choque é mais perigoso se a pessoa estiver molhada, por exemplo, tomando um banho.
2. De acordo com o texto, curto-circuito pode ser sinônimo de incêndio? Justifique.

Exercícios

25. A figura a seguir é o esquema de uma parte de um circuito elétrico de uma residência alimentado por uma rede bifásica (dois fios fases e um neutro). A tensão entre um dos fios fase e o neutro é 127 V e, entre os dois fios fase, é 220 V.



A secção transversal (bitola) dos fios deve ser coerente com os aparelhos que serão ligados nos circuitos elétricos, para que eles funcionem perfeitamente. Veja a tabela a seguir.

Bitola do fio condutor a ser utilizada em função do tipo de circuito, da tensão e da potência máxima

Tipo de circuito	Tensão (volt)	Potência máxima (watt)	Bitola do fio (mm ²)
lâmpada	127	1500	1,5
tomada	127	2 000	2,5
tomada	220	4 000	2,5
chuveiro	220	6 000	6,0

Com base na tabela, devem ser usadas para as ligações da tomada, lâmpada e chuveiro, respectivamente, as seguintes bitolas dos fios, em mm²:

- a) 1,5; 2,5; 6,0. c) 6,0; 1,5; 2,5. e) 1,5; 6,0; 2,5.
b) 2,5; 6,0; 1,5. **x** d) 2,5; 1,5; 6,0.

26. Nas residências é comum o uso de benjamins – adaptadores que possibilitam ligar, simultaneamente, até três aparelhos elétricos em uma mesma tomada.



Para utilizar um benjamim, é necessário tomar alguns cuidados para evitar danos na instalação elétrica em razão de uma sobrecarga de corrente elétrica.

É importante saber que devemos somar as potências de todos os aparelhos que serão ligados ao benjamim para verificar se a corrente elétrica não é superior à máxima permitida para os fios de ligação da tomada e do disjuntor da rede elétrica.

Na cozinha de uma residência, estão ligados, em um benjamim, uma geladeira (130 W), um liquidificador (300 W) e um forno de micro-ondas (1200 W). A tomada é ligada à rede elétrica de 120 V com fios de 1,5 mm² que suportam, no máximo, 11 A. A rede elétrica é protegida por um disjuntor de 30 A. Se os três aparelhos elétricos são colocados ao mesmo tempo em funcionamento:

- a) o disjuntor desliga, pois a corrente elétrica exigida pelos três aparelhos é superior à corrente máxima suportada por ele.
x b) o disjuntor não desliga, mas há sério risco de incêndio em razão de a corrente elétrica exigida pelos três aparelhos ser superior à corrente máxima suportada pelos fios.
c) o disjuntor não desliga, e não há risco de incêndio porque a corrente elétrica exigida pelos três aparelhos é menor do que a máxima suportada pelos fios.
d) o disjuntor desliga e somente a geladeira continua funcionando normalmente.
e) o disjuntor não desliga, mas somente o forno de micro-ondas funciona.

27. A rede elétrica da casa de Pedro é de 120 V e é protegida por um disjuntor de 30 A. Com a chegada do inverno, ele resolveu trocar seu chuveiro de 2400 W por outro, de 3200 W, para melhorar o aquecimento da água. Ele observou que, ao ligar o novo chuveiro, se o televisão de 160 W também estivesse ligado, o disjuntor desligava, interrompendo a corrente elétrica. Sabe-se que, no horário do banho de Pedro, ficam em funcionamento uma geladeira de 120 W e três lâmpadas de 60 W cada. Ele concluiu que

- a) em hipótese nenhuma um televisão e um chuveiro podem ser ligados simultaneamente.
b) o televisão interfere no funcionamento do chuveiro, causando um aumento na voltagem da rede elétrica, o que provoca o desligamento do disjuntor.
x c) com o televisão ligado, a intensidade da corrente elétrica é superior a 30 A, fazendo com que o disjuntor desligue o circuito.
d) a soma das potências de todos os dispositivos elétricos ligados simultaneamente deve ser, no máximo, igual a 3500 W.
e) o chuveiro deveria ser trocado por um de 3200 W – 220 V, pois assim haveria o aquecimento da água desejado sem ultrapassar o limite de 30 A do disjuntor.



Georg Simon Ohm

Georg Simon Ohm, físico alemão, nasceu na Baviera, Alemanha, em 1789 e faleceu em Munique, em 1854. De família humilde, foi educado pelo pai, Johann Wolfgang Ohm, um notável autodidata que deu aos filhos uma educação de alto nível.

Em 1805, Ohm ingressou na Universidade de Erlangen, mas, em vez de se concentrar nos estudos, preferia dançar, patinar no gelo e jogar bilhar, o que fez seu pai obrigá-lo a abandonar a universidade após três semestres. Em 1806, foi então enviado à Suíça, onde se tornou professor de Matemática na escola de Gottstadt.

Em 1811, passou a lecionar Matemática e Física no Liceu Jesuíta de Colônia. Na nova instituição, Ohm contava com seu próprio laboratório de Física, com todos os equipamentos de que necessitava para seus experimentos. Depois das notícias do descobrimento do eletromagnetismo por Oersted em 1820, ele prosseguiu com trabalhos experimentais em seu laboratório, pesquisando medições de corrente e tensões.

Em 1827, convencido de suas descobertas, publicou *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*, livro em que apresenta sua teoria sobre a eletricidade. Dentre suas descobertas, destaca-se a de uma relação fundamental que, para homenagear seu descobridor, recebe seu nome: a Lei de Ohm.

Apesar de hoje reconhecer a grande influência de seu trabalho na teoria e nas aplicações de eletricidade, as descobertas de Ohm foram recebidas com frieza, o que o fez renunciar ao cargo em Colônia. Depois disso, em 1833, aceitou um cargo na Escola Politécnica de Nuremberg, onde recebeu o título de professor.

Em 1841, seu trabalho finalmente começou a ser reconhecido, e Ohm recebeu a Medalha Copley da Royal Society de Londres, tendo sido incorporado ao grupo como membro estrangeiro um ano depois.

Em 1852, Ohm finalmente alcançou seu maior objetivo: tornou-se professor titular da cátedra de Física da Universidade de Munique.



Retrato de Georg Simon Ohm (1789-1854).

Popperfoto/Getty Images

Fontes de dados: *Encyclopædia Britannica*; UOL Educação; Opera mundi. Disponível em: <www.britannica.com/biography/Georg-Simon-Ohm>; <<http://educacao.uol.com.br/biografias/georg-simon-ohm.htm>>; <<http://operamundi.uol.com.br/conteudo/historia/35921/hoje+na+historia+1854+++morre+o+fisico+georg+simon+ohm.shtml>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

Faça uma pesquisa sobre outros trabalhos realizados por Georg Simon Ohm.

Trabalho em equipe



Esta é uma atividade de campo para ser feita em equipe, sob a orientação do professor. Ela poderá ser realizada no bairro em que moram. Cada equipe escolhe aleatoriamente dez famílias para fazer uma pesquisa sobre consumo de energia. Elaborem um questionário que englobe os seguintes pontos:

- Tensão da rede elétrica (127 V e/ou 220 V).
- Equipamentos elétricos utilizados na residência, com a tensão, a potência e o tempo de uso diário.
- Consumo de energia elétrica dos últimos três meses (solicitem a conta de luz para verificação).
- Preço do kWh com impostos.

Montem um painel para apresentar os resultados da pesquisa em sala de aula. Depois, façam um levantamento dos equipamentos que mais consomem energia e elaborem um relatório com orientações para economizar energia ao utilizar esses equipamentos. Distribuem o relatório à comunidade local.

Experimento



ATENÇÃO!

Esta é uma atividade apenas de leitura e cálculo. Você não deve tocar em nenhum fio ou aparelho que estiver ligado, isso pode causar danos a sua saúde.

O propósito desta atividade é familiarizá-lo com as leis físicas e com os fundamentos de uma instalação elétrica residencial. Para isso, siga os passos abaixo.

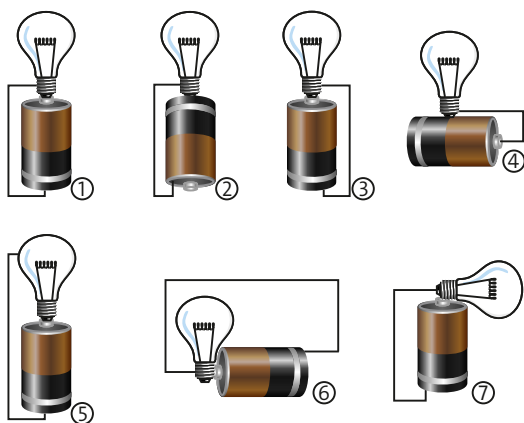
1. Certifique-se do valor da tensão de alimentação em sua cidade: 127 V ou 220 V.
2. Selecione os seguintes dispositivos: lâmpadas, televisão, computador, secador de cabelos, ferro de passar roupas, chuveiro, geladeira e máquina de lavar roupas. Verifique os dados nominais e a corrente de cada um deles.
3. Faça uma estimativa do tempo que cada um fica ligado, por dia. Estime o consumo mensal de energia da residência em kWh e verifique se é compatível com o medido pela concessionária de energia.
4. Calcule a corrente total, com todos os dispositivos ligados em paralelo. Em seguida, examine a divisão de correntes pelos disjuntores no quadro de força, verificando sua coerência com o cálculo da corrente total.

Retomando



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

- 28.** (Enem) Um curioso estudante, empolgado com a aula de circuito elétrico que assistiu na escola, resolve desmontar sua lanterna. Utilizando-se da lâmpada e da pilha, retiradas do equipamento, e de um fio com as extremidades descascadas, faz as seguintes ligações com a intenção de acender a lâmpada:



Ilustrações: Banco de Imagens/Arquivo da editora

CONÇALVES FILHO, A.; BAROLLI, E. *Instalação elétrica: investigando e aprendendo*. São Paulo: Scipione, 1997. Adaptado.

Tendo por base os esquemas mostrados, em quais casos a lâmpada acendeu?

- a) (1), (3), (6) c) (1), (3), (5) e) (1), (2), (5)
b) (3), (4), (5) **x** d) (1), (3), (7)

- 29.** (Enem) Podemos estimar o consumo de energia elétrica de uma casa considerando as principais fontes desse consumo. Pense na situação em que apenas os aparelhos que constam da tabela abaixo fossem utilizados diariamente da mesma forma.

Tabela: A tabela fornece a potência e o tempo efetivo de uso diário de cada aparelho doméstico.

Aparelho	Potência (kW)	Tempo de uso diário (horas)
ar-condicionado	1,5	8
chuveiro elétrico	3,3	$\frac{1}{3}$
freezer	0,2	10
geladeira	0,35	10
lâmpadas	0,10	6

Supondo que o mês tenha 30 dias e que o custo de 1 kWh é de R\$ 0,40, o consumo de energia elétrica mensal dessa casa é de aproximadamente:

- a) R\$ 135,00.
b) R\$ 165,00.
c) R\$ 190,00.
d) R\$ 210,00.
x e) R\$ 230,00.



30. (Enem) Todo carro possui uma caixa de fusíveis, que são utilizados para proteção dos circuitos elétricos. Os fusíveis são constituídos de um material de baixo ponto de fusão, como o estanho, por exemplo, e se fundem quando percorridos por uma corrente elétrica igual ou maior do que aquela que são capazes de suportar. O quadro a seguir mostra uma série de fusíveis e os valores de corrente por eles suportados.

Fusível	Corrente elétrica (A)
azul	1,5
amarelo	2,5
laranja	5,0
preto	7,5
vermelho	10,0

Um farol usa uma lâmpada de gás halogênio de 55 W de potência que opera com 36 V. Os dois faróis são ligados separadamente, com um fusível para cada um, mas, após um mau funcionamento, o motorista passou a conectá-los em paralelo, usando apenas um fusível. Dessa forma, admitindo-se que a fiação suporte a carga dos dois faróis, o menor valor de fusível adequado para proteção desse novo circuito é o:

- a) azul. **x** c) laranja. e) vermelho.
b) preto. d) amarelo.

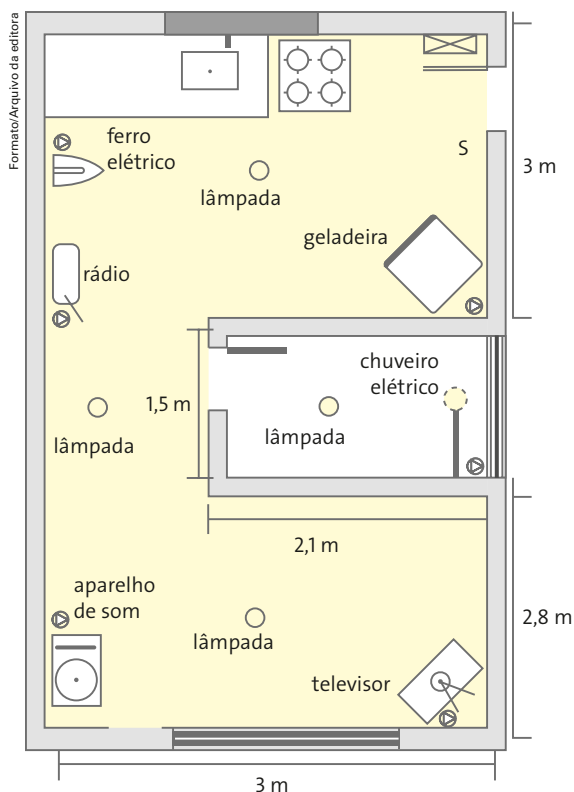
31. (Enem) A instalação elétrica de uma casa envolve várias etapas, desde a alocação dos dispositivos, instrumentos e aparelhos elétricos, até a escolha dos materiais que a compõem, passando pelo dimensionamento da potência requerida, da fiação necessária, dos eletrodutos*, entre outras. Para cada aparelho elétrico existe um valor de potência associado. Valores típicos de potências para alguns aparelhos elétricos são apresentados no quadro seguinte:

Aparelho	Potência (W)
aparelho de som	120
chuveiro elétrico	3 000
ferro elétrico	500
televisor	200
geladeira	200
rádio	50

*Eletrodutos são condutos por onde passa a fiação de uma instalação elétrica, com a finalidade de protegê-la.

A escolha das lâmpadas é essencial para obtenção de uma boa iluminação. A potência da lâmpada deverá estar de acordo com o tamanho do cômodo a ser iluminado. O quadro a seguir mostra a relação entre as áreas dos cômodos (em m²) e as potências das lâmpadas (em W), e foi utilizado como referência para o primeiro pavimento de uma residência.

Área do cômodo (m ²)	Potência da lâmpada (W)		
	Sala/copa/cozinha	Quarto, varanda e corredor	Banheiro
até 6,0	60	60	60
6,0 a 7,5	100	100	60
7,5 a 10,5	100	100	100



Obs.: Para efeito dos cálculos das áreas, as paredes são desconsideradas.

Considerando a planta baixa fornecida, com todos os aparelhos em funcionamento, a potência total, em watts, será de:

- a) 4 070. c) 4 320. e) 4 470.
b) 4 270. **x** d) 4 390.

Geradores e receptores elétricos

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

Sunny studio/Shutterstock



A bateria de um celular é um bipolo reversível: funciona ora como gerador, ora como receptor.



Bipolos ativos

Para alimentar as partes elétricas de um carro, como lâmpadas e ignição, usa-se uma bateria que converte energia química em elétrica. Outro exemplo de dispositivo que faz essa conversão são as pilhas (figura 3.1) utilizadas para ligar um aparelho de som, um barbeador elétrico ou um controle remoto. Dispositivos ou máquinas que transformam energia de outra modalidade em elétrica são chamados de **geradores elétricos**.

Em um ventilador (figura 3.2.a), em uma enceradeira (figura 3.2.b) ou em um barbeador elétrico (figura 3.2.c), a energia elétrica converte-se em mecânica, produzindo os movimentos necessários. Em um aparelho de som, a energia elétrica é transformada em sonora e, em um computador, em informação a ser processada. Dispositivos ou máquinas em que a energia elétrica é convertida em outra modalidade além da térmica são chamados **receptores elétricos**.



Charles D. Winters/Latinstock

Figura 3.1 Pilhas e baterias – geradores – são bipolos ativos.



fotofrince/Shutterstock



cleaning/Alamy/Other Images



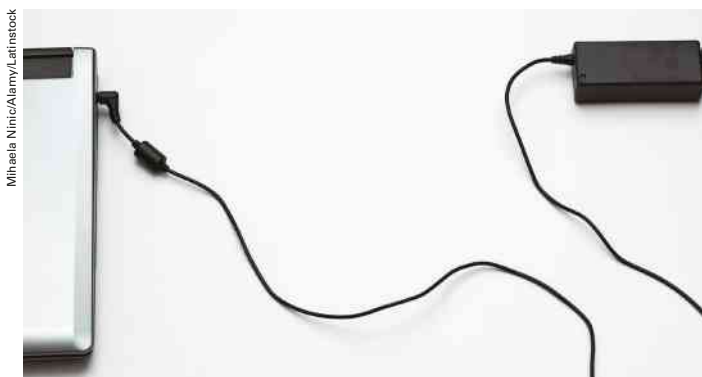
shutswis/Shutterstock/Glow Images

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Figura 3.2 Ventilador (a), enceradeira (b) e barbeador elétrico (c) – receptores – são bipolos ativos.

Geradores e **receptores** recebem o nome genérico de **bipolos ativos**. Alguns deles podem funcionar tanto como geradores quanto como receptores. É o caso da bateria de um *notebook* (figura 3.3), que normalmente converte energia química em elétrica, fazendo-o funcionar, operando, portanto, como gerador. Entretanto, de tempos em tempos, temos que carregá-la ligando-a na tomada para que a energia elétrica se transforme em química novamente.

Dispositivos ou máquinas que podem funcionar como geradores ou como receptores recebem o nome de **bipolos reversíveis**.



Mihaela Ninic/Alamy/Latinstock



JIPEN/Shutterstock/Glow Images

Figura 3.3 Uma bateria de computador pode funcionar tanto como gerador quanto como receptor.

2 Geradores elétricos

Uma pilha comum de lanterna é um exemplo de gerador, isto é, em seu interior ocorre uma transformação de energia química em elétrica. Quando uma corrente elétrica se estabelece, os portadores de carga ganham energia potencial elétrica à custa da conversão de energia química.

Para cada unidade de carga que atravessa um gerador há, em correspondência, uma quantidade de energia de outra modalidade que se transforma em energia elétrica. A diferença de energia de outra modalidade gasta por um gerador na transformação, por unidade de carga, chama-se **força eletromotriz** (ou *fem*, de símbolo ε):

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{\Delta q}$$



Figura 3.4 A força eletromotriz da pilha é 1,5 V.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de força eletromotriz é o volt (V), ou o joule por coulomb (J/C). Assim, em uma pilha de 1,5 V, para cada 1 C de carga que se movimenta em seu interior, 1,5 J de energia química é consumido (figura 3.4). Caso não houvesse perda de energia durante o movimento dos portadores de carga, pela resistência ou pelo efeito Joule, essa energia corresponderia ao aumento de energia potencial elétrica.

A designação “força” não é apropriada, pois a *fem* (medida em volts) tem a mesma natureza que uma diferença de potencial. O nome “força eletromotriz” permanece em uso apenas por motivos históricos.

A figura 3.5 ilustra uma pilha sendo utilizada para alimentar uma lâmpada. Nessas condições, há corrente elétrica nos diversos dispositivos do circuito, isto é, há portadores de carga realizando movimento ordenado entre as diversas partes do circuito elétrico montado.

Do ponto de vista das transformações de energia que ocorrem no gerador (pilha), podemos distinguir:

- quando os portadores de carga atravessam o gerador, recebem energia proveniente da transformação de energia química em elétrica;
- parte da energia recebida por esses portadores é dissipada durante seu movimento interno ao gerador;
- o restante da energia recebida pelos portadores é utilizado para alimentar o circuito externo, acendendo a lâmpada.

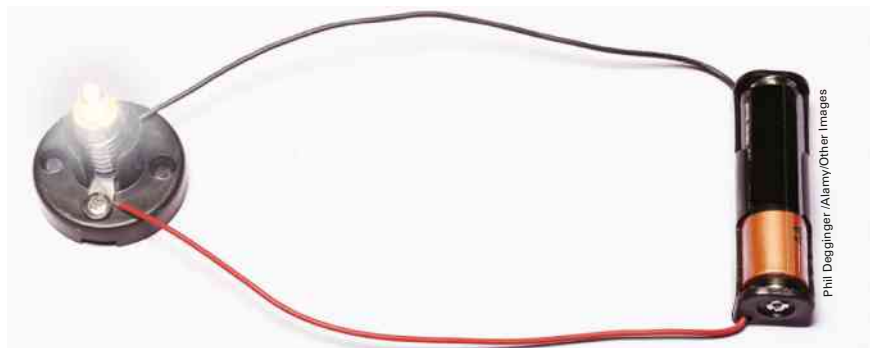


Figura 3.5 Circuito elétrico formado por uma lâmpada ligada por fios aos polos de uma pilha.

Assim, esquematicamente, podemos dizer que, em um gerador, a energia de outra modalidade, ao ser convertida em potencial elétrica, compõe-se de duas partes de natureza elétrica: uma útil e outra dissipada (figura 3.6).



Figura 3.6 Representação das formas de energia em um gerador elétrico.

Podemos fazer o **balanço energético do gerador** pelas potências associadas às energias descritas acima. Assim, temos:

- **Potência total (P_t)** – A potência total (P_t) está relacionada à energia de outra modalidade consumida no processo de transformação. Sendo $\Delta E_t = \varepsilon \cdot \Delta q$ e dividindo ambos os membros por Δt , obtemos:

$$\frac{\Delta E_t}{\Delta t} = \varepsilon \cdot \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow P_t = \varepsilon \cdot i$$

A potência total é o produto da *fem* ε pela intensidade de corrente elétrica i que atravessa o circuito.

- **Potência útil (P_u)** – Como a potência útil (P_u) fornecida pelo gerador ao circuito externo é de natureza elétrica, podemos considerar o circuito como um todo, submetido a uma diferença de potencial U e atravessado por uma corrente de intensidade i . Portanto:

$$P_u = U \cdot i$$

- **Potência dissipada (P_d)** – A potência dissipada (P_d) corresponde a uma perda de energia durante o movimento dos portadores de carga no interior do gerador. Considera-se que essa perda se dá em razão de uma resistência interna (r), intrínseca à construção do gerador. Portanto:

$$P_d = r \cdot i^2$$

De acordo com o princípio de conservação de energia, podemos escrever:

$$P_t = P_u + P_d \Rightarrow \varepsilon \cdot i = U \cdot i + r \cdot i^2$$

Simplificando, obtemos:

$$U = \varepsilon - r \cdot i$$

Essa expressão, chamada de **equação característica do gerador**, relaciona a diferença de potencial U com a corrente i , em um gerador; ε e r são constantes que dependem de como o gerador foi construído.

Na **figura 3.7**, temos a representação de um gerador elétrico. A corrente elétrica vai do polo de menor potencial elétrico para o de maior potencial elétrico. Isso significa que os portadores de carga ganham energia potencial elétrica ao atravessar o gerador.

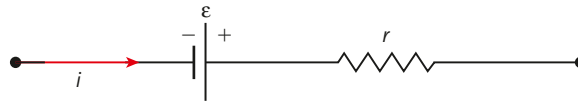


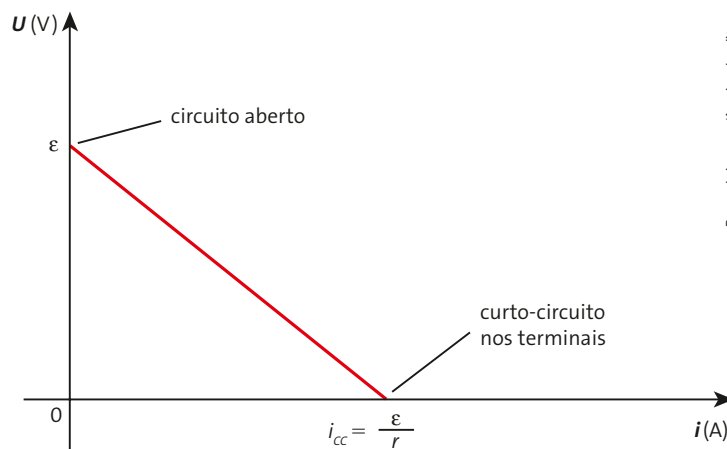
Figura 3.7 Representação esquemática de um gerador elétrico. A corrente elétrica vai do polo negativo para o polo positivo do gerador.

Banco de Imagens/Arquivo da editora

Curva característica

A função $U = \varepsilon - r \cdot i$, em que ε e r são constantes, é uma função de primeiro grau na variável i . O gráfico dessa função é uma reta (**figura 3.8**), na qual destacamos dois pontos notáveis: o do **circuito aberto** e o do **curto-circuito**.

 **Gráfico da função $U = \varepsilon - r \cdot i$ de um gerador elétrico**



Banco de Imagens/Arquivo da editora

Figura 3.8

Se $i = 0$, não há consumo de energia em razão da resistência interna; assim, a *ddp* entre os terminais do gerador é a própria força eletromotriz (ε). Dizemos que o circuito está aberto, pois não há circulação de portadores de carga. Medir a *ddp* entre os terminais de uma bateria, com o circuito aberto, é o procedimento usual para sabermos qual é sua força eletromotriz.

Para que os dois polos do gerador tenham o mesmo potencial elétrico, basta que os liguemos com um fio ideal. O gerador ficará numa situação de curto-circuito (i_{cc} é a corrente de curto-circuito): a potência útil será nula, e toda a energia de outra modalidade que se transforma em energia elétrica se dissipará internamente, no próprio gerador. Se o gerador for, por exemplo, uma pilha comum, observaremos que ela se descarregará rapidamente. Podemos dizer que, exceto em situações acidentais, o interesse em relação ao curto-circuito é meramente teórico, pois, na prática, danificamos o gerador ao provocá-lo.

Rendimento

O rendimento de um gerador (η), assim como de qualquer dispositivo que transforma ou transfere energia, é calculado pela razão entre a potência útil (P_u) e a potência total (P_t):

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \Rightarrow \eta = \frac{U \cdot i}{\varepsilon \cdot i} \Rightarrow \eta = \frac{U}{\varepsilon}$$

É comum expressarmos o rendimento em termos de porcentagem:

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon} \cdot 100\%$$

Pela lei da conservação da energia, uma máquina não pode produzir mais energia do que recebe. Assim, o rendimento é sempre menor do que 1, a não ser na situação teórica de gerador ideal, em que obteríamos $\eta = 1$ (rendimento igual a 100%).

Exercícios



1. Em relação à conversão de energia nos bipolos ativos, julgue as afirmativas a seguir:

- I. Em um bipolo ativo, toda a energia elétrica se converte em térmica.
- II. Os motores elétricos convertem energia elétrica em mecânica.
- III. Em um liquidificador, a energia se converte de mecânica em elétrica.
- IV. Quando uma bateria alimenta um *notebook*, sua energia química se converte em elétrica.

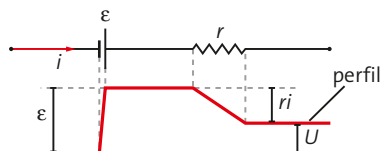
Podemos dizer que estão corretas somente as afirmativas:

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

2. A bateria de um *notebook* de potência 3,0 W é alimentada com uma *ddp* de 12 V e uma corrente de 0,5 A durante uma hora.

- a) Que quantidade de energia química foi fornecida durante a carga da bateria? $\Delta E = 6 \text{ Wh} = 21\,600 \text{ J}$
- b) Durante quanto tempo a bateria manteve o *notebook* em funcionamento? $\Delta t = 2 \text{ h}$

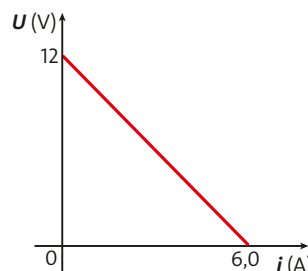
3. Para representar os ganhos ou as perdas de energia potencial dos portadores de carga elétrica, utiliza-se um esquema denominado **perfil dos potenciais**. A figura representa o perfil dos potenciais de uma pilha de *fem* ε , resistência interna r , percorrida por uma corrente elétrica i .



Com base na figura, julgue as afirmativas a seguir:

- I. Quando os portadores de carga elétrica vão do polo negativo para o polo positivo da pilha, ganham energia potencial elétrica. **Correta.**
- II. Como na resistência r os portadores de carga perdem energia potencial elétrica, o extremo esquerdo do resistor (r) é positivo e o extremo direito, negativo. **Correta.**
- III. A *ddp* U entre os extremos da pilha é dada por: $U = \varepsilon - r \cdot i$. **Correta.**

4. O gráfico a seguir representa a curva característica de um gerador.



- a) Quais são a *fem* e a resistência interna desse gerador? $E = 12 \text{ V}$; $r = 2 \, \Omega$
- b) Escreva no caderno a equação do gerador. $U = 12 - 2i \text{ (SI)}$
- c) Se a corrente elétrica no gerador for de 3 A, qual será a *ddp* entre seus polos? $U = 6 \text{ V}$
- d) Se na condição do item anterior o gerador estiver suprindo energia para um resistor, qual é a resistência desse elemento? $R = 2 \, \Omega$

3 Associações de geradores

Em várias situações, é necessário alimentar circuitos com *ddps* ou correntes que não estão disponíveis em um único gerador. Esse é, por exemplo, o caso do rádio de pilha, cujos circuitos devem ser alimentados com *ddp* de 3 V, mas as pilhas disponíveis são de 1,5 V. Nessas situações, utiliza-se a associação de geradores. Tal como ocorre com os resistores, há dois tipos básicos de associação de geradores: em série e em paralelo.

Associação de geradores em série

Dois ou mais geradores estão associados **em série** quando percorridos pela **mesma corrente elétrica** (figura 3.9).

A tensão total da associação esquematizada é a soma das tensões:

$$U = U_1 + U_2 \Rightarrow U = \varepsilon_1 - r_1 \cdot i + \varepsilon_2 - r_2 \cdot i$$

Essa expressão pode ser escrita assim:

$$U = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - (r_1 + r_2) \cdot i$$

Sendo $\varepsilon_{eq} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ e $r_{eq} = r_1 + r_2$, obtemos:

$$U = \varepsilon_{eq} - r_{eq} \cdot i$$

O gerador equivalente tem uma *fem* igual à soma das *fem* dos geradores associados. A resistência interna desse gerador é igual à soma das resistências internas dos geradores associados. Por exemplo, quando associamos em série quatro pilhas iguais de 1,5 V e 0,5 Ω , obtemos um gerador equivalente de *fem* 6,0 V e resistência interna de 2,0 Ω .



Figura 3.9 Associação de duas pilhas em série e a respectiva representação esquemática.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Exercício resolvido

1. O poraquê (*Electrophorus electricus*) é um peixe que contém células elétricas (eletrocitos) dispostas em série, enfileiradas em sua cauda.



Cada célula tem uma *fem* $\varepsilon = 60$ mV (0,060 V). Num espécime típico, esse conjunto de células é capaz de gerar tensões de até 480 V, com descargas que produzem correntes elétricas de intensidade máxima de até 1,0 A.

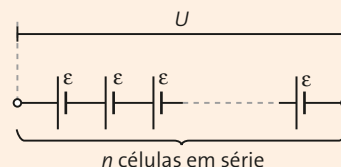
- a) Em seu caderno, faça um esquema representando a associação dessas células elétricas na cauda do poraquê.

Indique nesse esquema o número n de células elétricas que o poraquê pode ter. Justifique a sua avaliação.

- b) Qual a potência elétrica máxima que o poraquê é capaz de gerar?

Resolução:

- a) O esquema seguinte ilustra a sequência de geradores ideais em série.



A força eletromotriz do gerador equivalente é:

$$\varepsilon_{eq} = n\varepsilon.$$

$$\text{Assim, } 480 = n \cdot 0,06 \Rightarrow n = 8\,000 \text{ células.}$$

- b) Como $P = U \cdot i$, considerando a intensidade de corrente máxima, temos:

$$P_{\text{máx.}} = 480 \cdot 1,0 \Rightarrow P_{\text{máx.}} = 480 \text{ W}$$

Associação de geradores em paralelo

Dois ou mais geradores estão associados **em paralelo** quando submetidos à **mesma ddp** (figura 3.10). Nesse caso, é feita somente a associação de geradores iguais.

A corrente elétrica total da associação esquematizada é a soma das correntes em cada gerador:

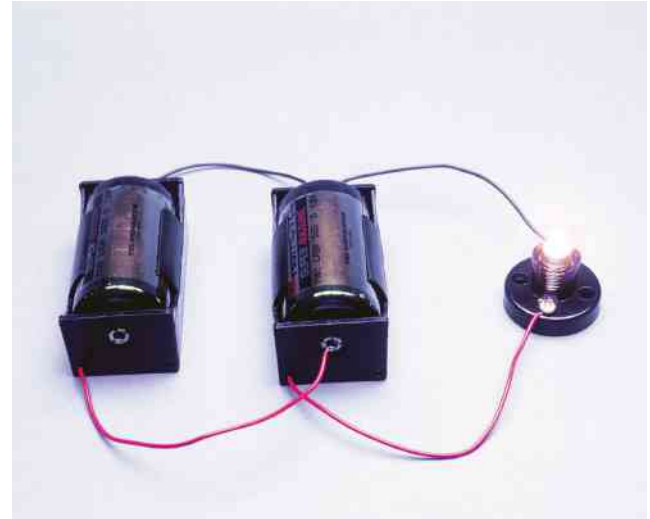
$$i = i_1 + i_2 \Rightarrow i_1 = i_2 = \frac{i}{2}$$

Assim, temos $U = \varepsilon - r \cdot \frac{i}{2}$ em cada gerador.

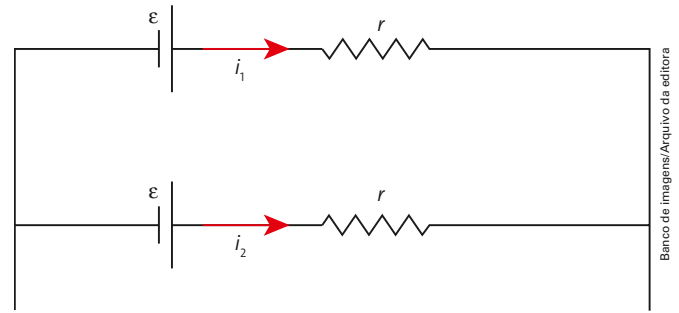
O gerador equivalente é dado por: $U = \varepsilon_{eq} - r_{eq} \cdot i$, no qual:

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon \text{ e } r_{eq} = \frac{r}{2}$$

O gerador equivalente tem uma *fem* igual à dos geradores associados. A resistência interna desse gerador é menor que a dos geradores associados. Por exemplo, quando associamos em paralelo quatro pilhas iguais de 1,5 V e 1,0 Ω , obtemos um gerador equivalente de *fem* 1,5 V e resistência interna de 0,25 Ω .



Doug Science Source/Creative RM/Getty Images



Banco de imagens/Arquivo da editora

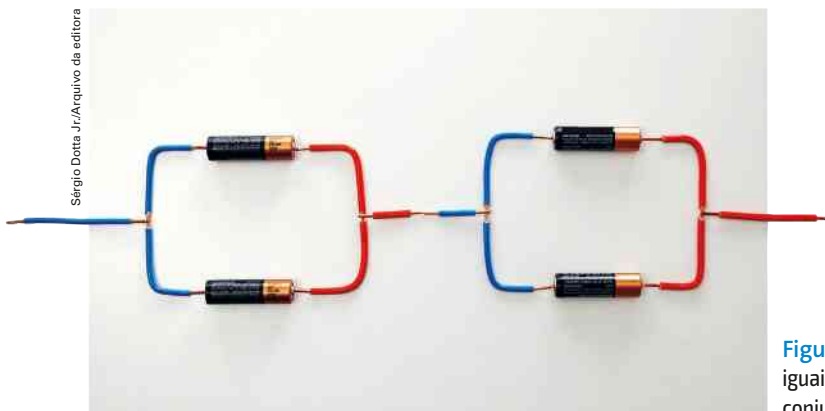
Figura 3.10 Associação de duas pilhas em paralelo e a respectiva representação esquemática.

Associação mista de geradores

A durabilidade de cada pilha depende da corrente elétrica que a atravessa. Quando associamos pilhas em paralelo, aumentamos sua durabilidade ao mesmo tempo em que reduzimos sua resistência interna.

A **associação mista** (figura 3.11) é a combinação de dois objetivos: ao mesmo tempo em que proporciona maior durabilidade, aumenta a *fem*.

O procedimento para determinar o gerador equivalente é o mesmo usado no caso dos resistores: associamos cada conjunto de duas pilhas em paralelo e, em seguida, fazemos a associação em série.



Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Figura 3.11 Associação mista de quatro pilhas iguais: duas a duas em paralelo, e os dois conjuntos em série.

Exercícios

5. Uma pessoa comprou uma lanterna que utiliza quatro pilhas de 1,5 V cada. Ao inserir as pilhas na lanterna, a pessoa procedeu conforme a figura (sem escala e em cores fantasia).



Nessa situação, é correto afirmar que:

- a) a lâmpada da lanterna vai queimar.
x b) a lâmpada da lanterna não vai acender.
 c) as pilhas durarão pouco tempo.

- d) a lanterna funcionará normalmente.
 e) o brilho da lâmpada da lanterna será acima do normal.

6. Considere quatro pilhas iguais de 1,5 V e $1,0 \, \Omega$ cada uma. Se você associar duas a duas em série e, em seguida, associar os dois conjuntos em paralelo, quais são a *fem* e a resistência interna equivalentes da associação?
*Equivalente de cada série: $\mathcal{E} = 3 \, \text{V}$; $r = 2 \, \Omega$.
 Duas dessas séries em paralelo: $\mathcal{E} = 3 \, \text{V}$; $r = 1 \, \Omega$.*
7. Você dispõe de três pilhas iguais de 1,5 V e $1,0 \, \Omega$ cada. Como você deve associar essas pilhas para obter uma *fem* equivalente de 3,0 V e uma corrente de curto-circuito de 2,0 A?
Duas em paralelo e o conjunto em série com a outra.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.



4 Receptores elétricos

O motor de um liquidificador é um exemplo de receptor elétrico (figura 3.12), isto é, em seu interior ocorre uma transformação de energia elétrica em mecânica durante o movimento de rotação. Quando uma corrente elétrica se estabelece em um receptor, os portadores de carga perdem energia potencial elétrica em razão da conversão em energia mecânica.

Para cada unidade de carga que atravessa um receptor, há, em correspondência, uma quantidade de energia elétrica que se transforma em energia de outra modalidade e não térmica.

A quantidade de energia de outra modalidade, não térmica, obtida em um receptor na transformação, por unidade de carga, chama-se **força contraeletromotriz (*fem*) $\mathcal{E}'$** e é dada por:

$$\mathcal{E}' = \frac{\Delta E}{\Delta q}$$

No SI, a unidade de força contraeletromotriz é o volt (V), ou joule por coulomb (J/C). Assim, em um motor de *fem* 25 V, por exemplo, para cada 1 C de carga que se movimenta em seu interior, 25 J de energia elétrica transformam-se em mecânica útil. Caso não houvesse perda de energia durante o movimento dos portadores de carga, essa energia corresponderia à diminuição de energia potencial elétrica.

A figura 3.13 ilustra a representação esquemática de um receptor.

Do ponto de vista das transformações de energia que ocorrem no receptor, podemos distinguir:

- quando os portadores de carga atravessam o receptor cedem energia potencial elétrica;
- parte da energia cedida pelos portadores de carga é dissipada durante seu movimento interno no receptor;
- o restante da energia cedida pelos portadores de carga é transformado em energia (útil).

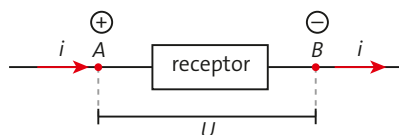


Figura 3.13 Representação esquemática de um receptor. A corrente elétrica vai do polo positivo para o negativo.

Assim, podemos dizer que, em um receptor, a energia potencial elétrica, ao ser convertida em outra modalidade, compõe-se de duas partes: uma útil e outra dissipada (**figura 3.14**).

Podemos fazer o **balanço energético do receptor** pelas potências associadas às energias descritas acima. Assim, temos:

- **Potência total (P_t)** – Como a potência total está relacionada à energia potencial elétrica consumida no processo de transformação, podemos considerar a ddp total no circuito igual a U e a corrente elétrica igual a i e escrever:

$$P_t = U \cdot i$$

- **Potência útil (P_u)** – Como a potência útil obtida pelo receptor é de natureza não elétrica, de acordo com a definição de força contraeletromotriz:

$$\Delta E_u = \varepsilon' \cdot \Delta q$$

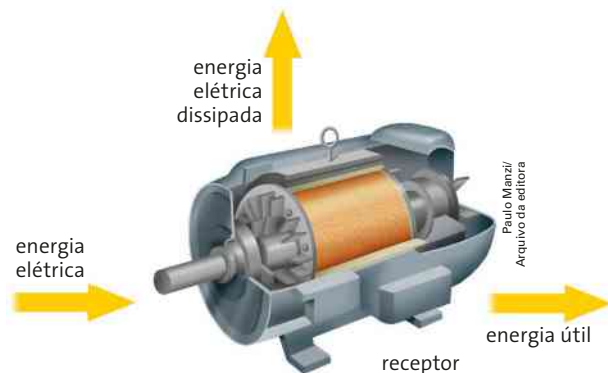


Figura 3.14 Representação das formas de energia em um receptor elétrico.

Dividindo membro a membro pelo intervalo de tempo, temos:

$$\frac{\Delta E_u}{\Delta t} = \varepsilon' \cdot \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow P_u = \varepsilon' \cdot i$$

Nessa expressão, i é a intensidade de corrente que atravessa o receptor.

- **Potência dissipada (P_d)** – A potência dissipada corresponde a uma perda de energia durante o movimento dos portadores de carga no interior do receptor. Essa perda ocorre em razão de uma resistência interna (r') intrínseca à construção do gerador. Portanto:

$$P_d = r' \cdot i^2$$

De acordo com a conservação de energia, podemos escrever:

$$P_t = P_u + P_d \Rightarrow U \cdot i = \varepsilon' \cdot i + r' \cdot i^2$$

Simplificando, obtemos:

$$U = \varepsilon' + r' \cdot i$$

Essa expressão, que relaciona a diferença de potencial U com a corrente i , em um receptor, é chamada de **equação característica do receptor**, na qual ε' e r' são constantes que dependem de como o receptor foi construído.

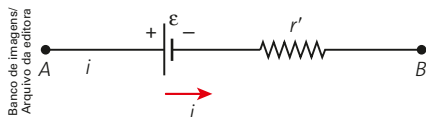


Figura 3.15 Representação de um receptor elétrico. A corrente elétrica vai do polo positivo para o polo negativo do receptor.

Gráfico da curva característica de um receptor

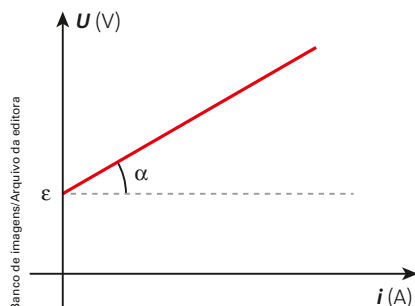


Figura 3.16

Na **figura 3.15**, temos a representação de um receptor elétrico. A corrente elétrica vai do polo de maior potencial elétrico para o de menor. Isso significa que os portadores de carga perdem energia potencial elétrica ao atravessar o receptor.

Curva característica

A função $U = \varepsilon' + r'i$, em que ε' e r' são constantes, é uma função de primeiro grau na variável i , cujo gráfico é uma reta (**figura 3.16**). O coeficiente angular da reta nos fornece, numericamente, o valor da resistência interna do receptor:

$$r' \stackrel{N}{=} \operatorname{tg} \alpha$$

Rendimento

O rendimento do receptor é a razão entre a potência útil e a total:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \Rightarrow \eta = \frac{\varepsilon' \cdot i}{U \cdot i} \Rightarrow \eta = \frac{\varepsilon'}{U}$$

Usualmente expressamos o rendimento em porcentagem:

$$\eta = \frac{\varepsilon'}{U} \cdot 100\%$$

Na prática, o rendimento sempre é menor que 1 (ou seja, menor do que 100%), a não ser na situação teórica de um receptor ideal.

Bipolos reversíveis

Para que possamos receber e realizar chamadas sem utilizar qualquer tomada, a bateria do celular (**figura 3.17**) converte energia química em elétrica, isto é, opera como gerador. Para recarregar a bateria, ligamos o celular por meio de um conversor (“carregador”) a uma tomada. Então, o processo se inverte. A bateria, operando como receptor, converte energia elétrica em química. Mas como é possível a bateria do celular ser um gerador e um receptor?



Figura 3.17 Bateria de celular: bipolo reversível.

Isso é possível porque alguns bipolos, como baterias e certos motores elétricos, são reversíveis, isto é, apresentam a propriedade de operar como gerador ou receptor, dependendo do sentido da corrente. A **figura 3.18** mostra as curvas características dos bipolos ativos, que ilustram essa propriedade.

Curvas características dos dipolos ativos

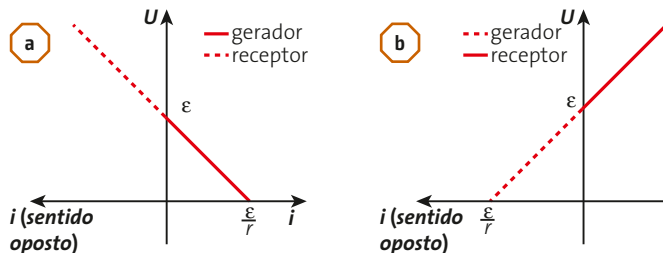


Figura 3.18 Gerador como receptor (a) e receptor como gerador (b).

Prolongando a reta que representa um gerador para o eixo “negativo” da corrente, observa-se o comportamento de receptor. Analogamente, prolongando a reta que representa um receptor para o eixo “negativo” da corrente, observa-se o comportamento de gerador.

Exercícios

9. b) $P_{\text{útil}} = 450 \text{ W}$; $P_{\text{total}} = 500 \text{ W}$; $P_{\text{dissipada}} = 50 \text{ W}$



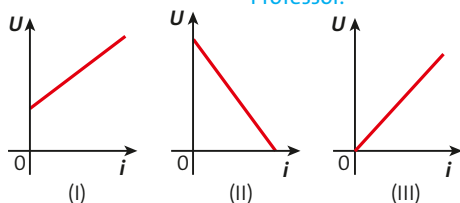
8. Em uma bateria de 12 V, 2 C de carga são transportados entre os polos. Para essa operação:
- Qual é a diminuição de energia química? $\Delta E = 24 \text{ J}$
 - Em condições reais, o aumento de energia potencial elétrica é igual à diminuição de energia química? Justifique. **Não, pois parte da energia será dissipada.**

9. Um motor elétrico tem resistência interna de $2,0 \Omega$ e está ligado a uma ddp de 100 V. Verifica-se que ele é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade igual a 5,0 A. Determine:
- a força contraeletromotriz do motor; $\mathcal{E}' = 90 \text{ V}$
 - as potências total, útil e dissipada internamente;
 - a potência dissipada se o eixo do motor for bloqueado, ou seja, impedido de girar.

$$P_{\text{dissipada}} = 5000 \text{ W}$$

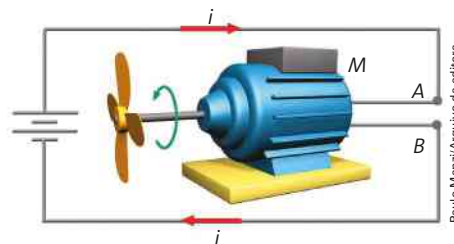
10. Um motor elétrico de 25 V e $12,5 \Omega$ é atravessado por uma corrente de intensidade 4 A.
- Qual é a ddp nos terminais do motor? $U = 75 \text{ V}$
 - Determine o rendimento desse motor. $\eta = 33,3\%$

11. Os três gráficos apresentados a seguir, que mostram o comportamento da ddp U em função da corrente elétrica, representam as curvas características de três elementos elétricos: **Resposta no Manual do Professor.**



Associe cada gráfico ao respectivo elemento.

12. (UEPB) Um motor elétrico M (figura a seguir), ligado a uma bateria que lhe aplica uma diferença de potencial (voltagem) $V_{AB} = 15 \text{ V}$, fornece-lhe uma corrente de 6,0 A. O motor possui uma resistência interna de $0,30 \Omega$. Em virtude desta resistência, parte da energia fornecida ao motor pela bateria é transformada em calor (o motor se aquece), sendo a energia restante transformada em energia mecânica de rotação do motor.



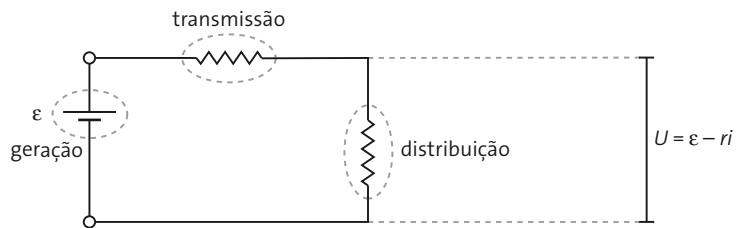
Baseando-se nestas informações, pode-se afirmar que:

- A potência total desenvolvida no motor é 80 W.
- A potência total desenvolvida no motor e a potência mecânica de rotação do motor são, respectivamente, 90 W e 79,8 W.
- x c) A potência dissipada por efeito Joule no interior do motor é 10,8 W.
- A potência mecânica de rotação do motor é 78 W.
- A potência total desenvolvida no motor e a potência dissipada por efeito Joule no interior do motor são, respectivamente, 80 W e 10,6 W.

5 Circuitos elétricos

As associações dos diversos tipos de bipolos são chamadas de **circuitos elétricos**. Um exemplo de circuito elétrico é o conjunto formado pelas pilhas e os componentes eletrônicos de um aparelho de som portátil, que proporciona a recepção de ondas eletromagnéticas e a conversão destas em sinais elétricos capazes de emitir sons audíveis. Outro exemplo é um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia, que está representado de maneira simplificada na **figura 3.19**.

Figura 3.19 Sistema de geração representado por um gerador ideal. A transmissão é representada por uma resistência interna associada às perdas, e o sistema de distribuição, por um circuito equivalente, sobre o qual a ddp final é aplicada.



A distribuição de energia nos diversos componentes de um circuito elétrico, ou o balanço energético, obedece a duas leis, conforme veremos a seguir.

Leis de Kirchhoff

Para a resolução de circuitos elétricos, utilizaremos conceitos sintetizados em duas leis pelo físico alemão Gustav R. Kirchhoff. Elas são conhecidas como **leis de Kirchhoff**.

Lei dos nós – A soma das intensidades das correntes elétricas que chegam a um nó é igual à soma das intensidades das correntes elétricas que saem dele, conforme vimos no capítulo 2 (**figura 3.20**).

De acordo com o princípio de conservação da carga elétrica, temos:

$$i_1 + i_2 = i_3$$

Lei das malhas – Em qualquer malha de um circuito elétrico, a soma das diferenças de potencial elétrico é nula.

No circuito mostrado na **figura 3.21**, temos três malhas: ABCFA, ABDEA e CDEFC.

Aplicando a lei das malhas para esse circuito, obtemos:

- ABCFA: $20 - 2 \cdot i_1 - 10 = 0$;
- ABDEA: $20 - 2 \cdot i_1 - 5 \cdot i_2 = 0$;
- CDEFC: $-5 \cdot i_2 + 10 = 0$.

A resolução dessas equações, com a lei dos nós, nos fornece os valores das correntes elétricas i_1 , i_2 e i_3 .

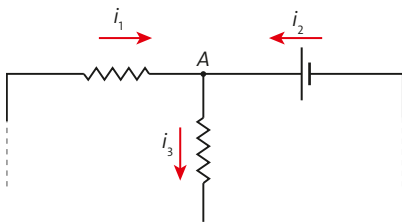


Figura 3.20 No nó A, a soma das correntes i_1 e i_2 é igual a i_3 .

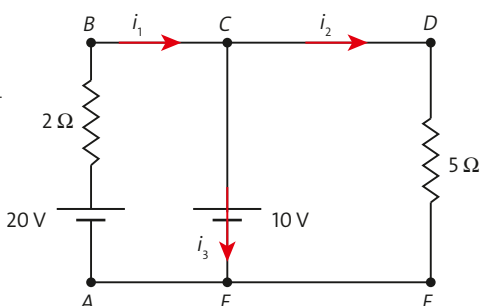
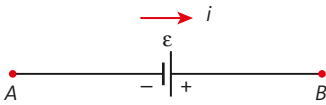
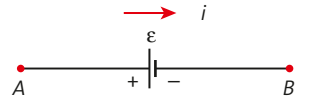
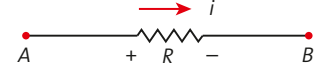
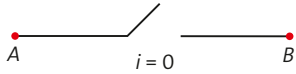
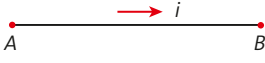


Figura 3.21 Circuito elétrico constituído de três malhas.

No quadro a seguir, apresentamos os principais elementos de um circuito elétrico.

Principais elementos de um circuito			
Componente	Função	Símbolo	U
Gerador	Transforma qualquer modalidade de energia em energia elétrica.		$A \rightarrow B: +\varepsilon$ $B \rightarrow A: -\varepsilon$
Receptor	Transforma energia elétrica em outra modalidade que não seja exclusivamente térmica.		$A \rightarrow B: -\varepsilon$ $B \rightarrow A: +\varepsilon$
Resistor	Transforma energia elétrica em energia térmica.		$A \rightarrow B: -Ri$ $B \rightarrow A: +Ri$
Fio ideal	Conduz a corrente elétrica sem dissipação de energia.		0
Interruptor	Interrompe a passagem de corrente elétrica (chave aberta).		Fechada: 0
			Aberta: U_{AB}
Fusível	Limita a intensidade de corrente elétrica.		0

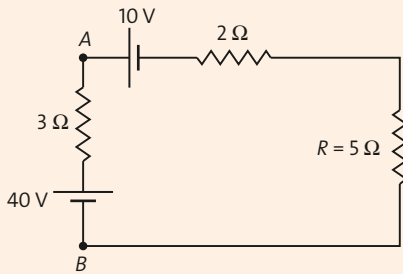
Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Circuito de malha única

O circuito elétrico cujos elementos (gerador, receptor, resistor, chave, etc.) estão ligados em série formando um único caminho para a corrente elétrica é denominado **circuito de malha única**. Esse tipo de circuito não apresenta nós. Acompanhe, no exercício resolvido 2, como procedemos com um circuito com essa configuração.

Exercício resolvido

2. Um gerador de *fem* 40 V e resistência interna $3\ \Omega$ é ligado em série a um receptor de *fem* 10 V e resistência interna $2\ \Omega$ e a um resistor $R = 5\ \Omega$, conforme mostra a figura.



Determine:

- a intensidade da corrente elétrica no circuito;
- a *ddp* entre os pontos A e B.

Resolução:

- O sentido da corrente elétrica no circuito é horário, ou seja, através do gerador é de B para A. Portanto, de acordo com a lei das malhas, escrevemos:

$$40 - 3i - 10 - 2i - 5i = 0 \Rightarrow 30 = 10i \Rightarrow i = 3\text{ A}$$

- A *ddp* entre os pontos A e B é:

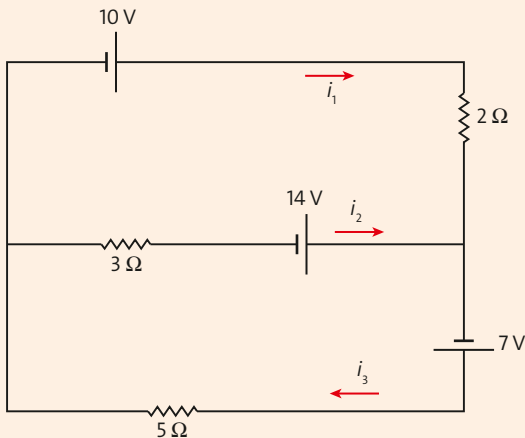
$$U_{AB} = \varepsilon_{eq.} - r_{eq.} \cdot i \Rightarrow U_{AB} = 40 - 3 \cdot 3 \Rightarrow U_{AB} = 31\text{ V}$$

Circuito com várias malhas

Para os circuitos com várias malhas, inicialmente localizamos os nós e aplicamos as leis dos nós. Em seguida, separamos cada uma das malhas e aplicamos a lei das malhas. Veja, no exercício resolvido 3, como proceder com um circuito com essa configuração.

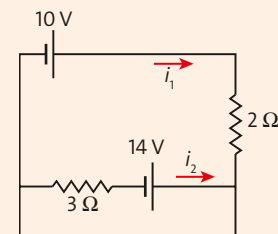
Exercício resolvido

3. Determine as intensidades das correntes elétricas i_1 , i_2 e i_3 no circuito dado na figura a seguir.



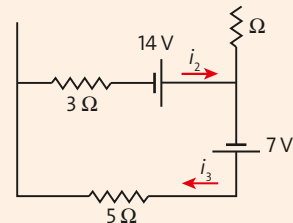
Resolução:

De acordo com a lei dos nós, temos: $i_3 = i_1 + i_2$ (I)
Aplicando a lei das malhas na figura a seguir, obtemos:



$$10 - 2i_1 - 14 + 3i_2 = 0 \Rightarrow 3i_2 - 2i_1 = 4 \text{ (II)}$$

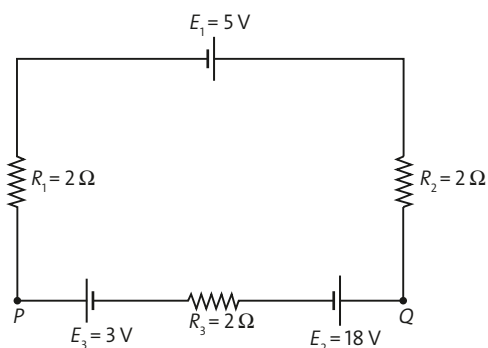
Aplicando a lei das malhas na figura a seguir, obtemos:



$$-3i_2 + 14 + 7 - 5i_3 = 0 \Rightarrow 3i_2 + 5i_3 = 21 \text{ (III)}$$

Resolvendo o sistema de três equações e três incógnitas, obtemos: $i_1 = 1\text{ A}$; $i_2 = 2\text{ A}$; e $i_3 = 3\text{ A}$.

13. A figura abaixo mostra um circuito constituído por uma única malha.



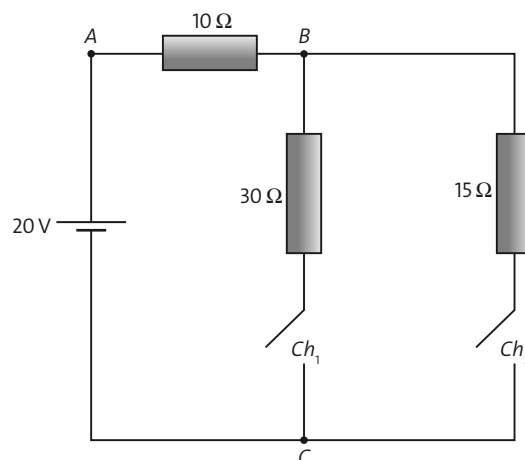
E_1 : receptor; E_2 : gerador; E_3 : receptor.

- a) Classifique E_1 , E_2 e E_3 como gerador ou receptor.
 b) Determine a intensidade e o sentido da corrente elétrica no circuito. $i = \frac{5}{3}$ A, sentido anti-horário

14. Um motor elétrico, de *fem* 12 V e resistência interna 5 Ω, e um resistor, de 20 Ω, associados em paralelo, são ligados aos terminais de um gerador de *fem* 24 V e resistência interna 2 Ω.

- a) Construa, em seu caderno, uma figura correspondente ao circuito elétrico com os elementos citados.
 b) Qual é a intensidade de corrente elétrica que passa pelo motor? $i = 1,44$ A

15. Na figura a seguir, um gerador ideal (resistência interna nula) de 20 V é ligado a um circuito com três lâmpadas incandescentes, representadas por suas resistências elétricas. Ch_1 e Ch_2 são duas chaves liga/desliga.



- a) Com a chave Ch_1 fechada e a Ch_2 aberta, qual é a *ddp* entre os pontos B e C? $U = 15$ V
 b) O que acontece com a *ddp* entre os pontos B e C se a Ch_2 for fechada: aumenta, diminui ou permanece constante? Justifique. Diminui.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

6 Amperímetro e voltímetro

Suponha que uma pessoa queira medir a altura da coluna de um líquido colocado em um recipiente e só dispõe de uma grossa régua de madeira. A inserção da régua no recipiente certamente fará o nível do líquido subir e interferirá na grandeza (altura) a ser medida (figura 3.22).



Figura 3.22 O instrumento de medida interfere no resultado. Representação sem escala e em cores fantasia.

Em geral, ao efetuarmos a medida de uma grandeza, procuramos utilizar um aparelho de medida que interfira o mínimo possível no resultado. Um aparelho de medida que atende a essa condição, ou seja, que praticamente não interfere na medida efetuada é denominado **medidor ideal**. Na prática, os medidores são considerados ideais quando sua interferência nas grandezas medidas ocorre dentro de limites aceitáveis.

Em particular, nos circuitos elétricos, dois instrumentos de medida são muito utilizados: o **amperímetro** (figura 3.23.a), que mede a intensidade da corrente elétrica, e o **voltímetro** (figura 3.23.b), que mede a *ddp* (tensão).

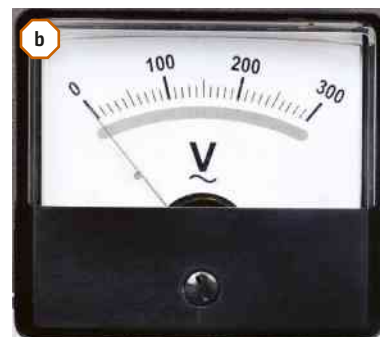
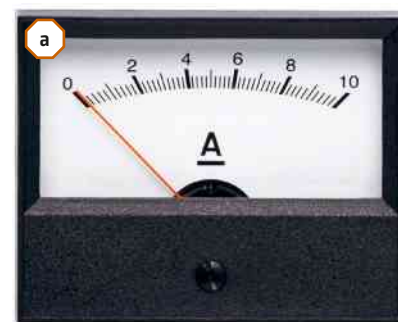
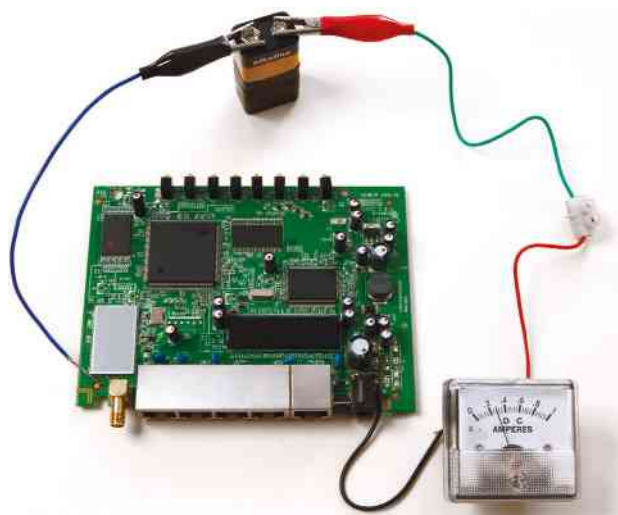


Figura 3.23 Aparelhos de medida elétrica: amperímetro (a) e voltímetro (b).

Para que o amperímetro possa medir a corrente elétrica em um elemento qualquer do circuito (gerador, receptor ou resistor), deve ser associado **em série** com o elemento (figura 3.24) e, para que interfira o mínimo possível na medida, deve apresentar uma **resistência elétrica praticamente nula**. De modo geral, quanto menor for a resistência elétrica do amperímetro, quando comparada com a do elemento, melhor será a precisão da medida.



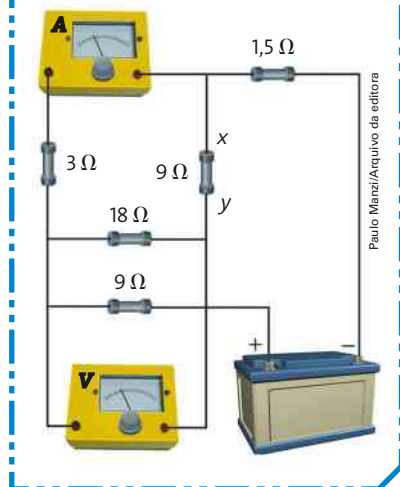
Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Figura 3.24 O amperímetro é ligado em série com o aparelho cuja corrente elétrica se quer medir.

Veja resposta no Manual do Professor.

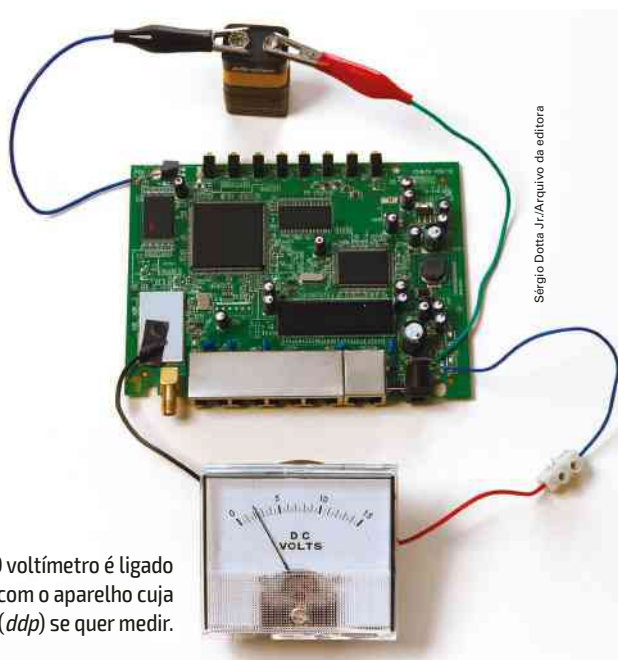
Para refletir

No circuito representado na figura abaixo, qual é o resistor cuja corrente elétrica o amperímetro está medindo? E qual é o resistor cuja tensão o voltmímetro está medindo?



Paulo Manz/Arquivo da editora

Para que o voltmímetro possa medir a tensão (*ddp*) em um elemento qualquer do circuito (gerador, receptor ou resistor), deve ser associado **em paralelo** com o elemento (figura 3.25) e, para que interfira o mínimo possível na medida, deve apresentar uma **resistência elétrica extremamente alta** (infinita). De modo geral, quanto maior for a resistência elétrica do voltmímetro, quando comparada à do elemento, melhor será a precisão da medida.

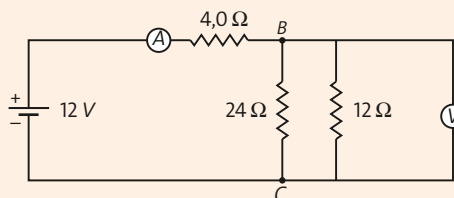


Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Figura 3.25 O voltmímetro é ligado em paralelo com o aparelho cuja tensão (*ddp*) se quer medir.

Exercício resolvido

4. No circuito mostrado na figura, A é um amperímetro e V é um voltímetro, ambos ideais: a resistência interna do amperímetro é nula e a do voltímetro é infinita.



- Quais são o sentido e a intensidade da corrente elétrica no amperímetro?
- Qual é a indicação do voltímetro?

Resolução:

- De acordo com as polaridades do gerador, o sentido da corrente elétrica no amperímetro é da esquerda para a direita.

Os resistores de $24\ \Omega$ e $12\ \Omega$ estão em paralelo:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{24} + \frac{1}{12} \Rightarrow R_p = 8\ \Omega$$

Assim, simplificamos o circuito para dois resistores, um de $4\ \Omega$ e outro de $8\ \Omega$, associados em série. De acordo com a lei das malhas, obtemos:

$$12 = 4i + 8i \Rightarrow i = 1,0\ \text{A}$$

Portanto, a indicação do amperímetro é $1,0\ \text{A}$.

- O voltímetro indica a ddp entre os pontos B e C. Sendo o resistor equivalente desse trecho igual a $8\ \Omega$ e a intensidade de corrente elétrica igual a $1,0\ \text{A}$, a tensão indicada pelo voltímetro é:

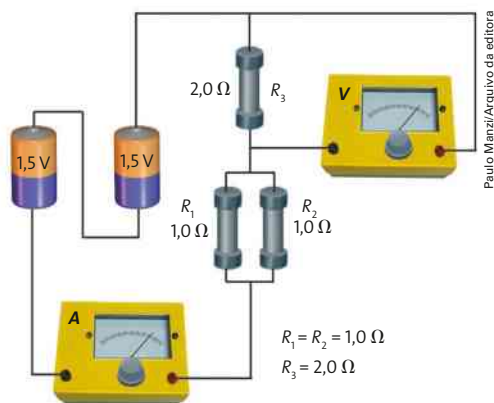
$$U = R_p \cdot i \Rightarrow U = 8 \cdot 1 \Rightarrow U = 8,0\ \text{V}$$

A indicação do voltímetro é $8,0\ \text{V}$.

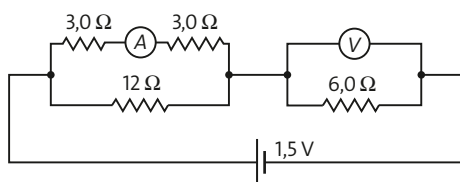
Exercícios



16. Duas pilhas ideais (resistência interna nula) de $1,5\ \text{V}$ alimentam um circuito formado por três resistores associados conforme mostra a figura. Considere que o amperímetro e o voltímetro são aparelhos ideais. Que medida cada aparelho indica? $i = 1,2\ \text{A}$; $U = 2,4\ \text{V}$



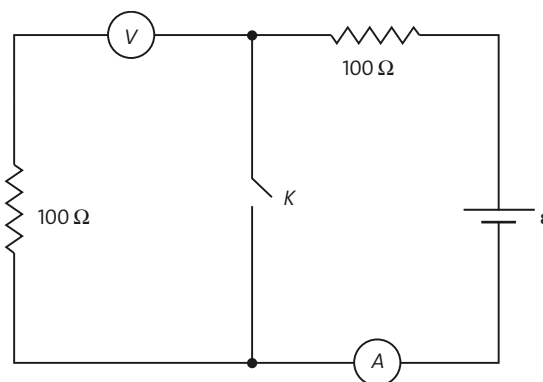
17. (UFF-RJ) No circuito esquematizado na figura, a alimentação é feita por uma pilha de fem igual a $1,5\ \text{V}$ e resistência interna desprezível; os medidores de corrente (amperímetro A) e de tensão (voltímetro V) são ideais.



Nessa situação, as leituras do amperímetro e do voltímetro são, respectivamente:

- ☐ 0,05 A e 0,60 V.
- ☒ 0,10 A e 0,90 V.
- ☐ 0,15 A e 0,90 V.
- ☐ 0,20 A e 0,60 V.
- ☐ 0,30 A e 0,30 V.

18. (Fuvest-SP) No circuito da figura, o amperímetro e o voltímetro são ideais. O voltímetro marca $1,5\ \text{V}$ quando a chave K está aberta. Fechando-se a chave K, o amperímetro marcará:



- ☐ 0 mA.
- ☐ 7,5 mA.
- ☒ 15 mA.
- ☐ 100 mA.
- ☐ 200 mA.

Em construção

Gustav Robert Kirchhoff

[Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.](#)

Gustav Robert Kirchhoff nasceu em Königsberg, Prússia (atual Rússia), em 1824 e faleceu em Berlim, Alemanha, em 1887. Filho de integrantes da comunidade intelectual local, ingressou na Universidade Albertus de Königsberg para estudar Matemática e trabalhou com Carl Friedrich Gauss (1777-1855).

Em 1845, anunciou pela primeira vez as Leis de Kirchhoff, que permitem calcular correntes e as diferenças de potenciais em rede elétrica. Dando continuidade às teorias do físico alemão Georg Simon Ohm (1789-1854), Kirchhoff generalizou as equações que descrevem o fluxo de corrente no caso de condutores elétricos em três dimensões.

Em 1847, o físico formou-se em Königsberg e tornou-se professor (não remunerado) na Universidade de Berlim, na Alemanha. Em 1850, aceitou o cargo de professor de Física na Universidade de Breslávia. No ano seguinte, Robert Wilhelm Eberhard von Bunsen (1811-1899) ingressou na mesma universidade como professor de Química, iniciando uma frutífera amizade com Kirchhoff.

Em 1854, ele foi nomeado professor de Física na Universidade de Heidelberg, onde Bunsen já estava lecionando. Assim, ambos iniciaram a análise espectral. Bunsen analisava as cores obtidas pelo aquecimento de elementos químicos até a incandescência, usando gases coloridos para distinguir entre projeções similares. Kirchhoff participou da pesquisa e sugeriu que a observação das linhas espectrais obtidas pela dispersão da luz por um prisma era um modo mais preciso para testar a cor da luz. Juntos, eles descobriram que cada substância emitia luz com um padrão específico de linhas espectrais. Essa descoberta deu início ao uso dos métodos de espectroscopia em análises químicas.

Em 1860, alguns meses após publicarem os resultados desse estudo, Kirchhoff e Bunsen descobriram ainda um novo metal, que denominaram cézio; e, no ano seguinte, identificaram o rubídio.

Kirchhoff aplicou a análise espectral para estudar a composição do Sol e descobriu sódio no espectro das estrelas. Ele foi o primeiro a explicar as linhas escuras no espectro do Sol, causadas pela absorção de comprimentos de onda particulares quando a luz passa por um gás.

Posteriormente, formulou as Leis de Kirchhoff relativas à emissão e à absorção de radiação por um corpo aquecido. Seu trabalho relativo à radiação dos corpos negros foi fundamental para o desenvolvimento da teoria quântica.

Fontes de dados: Encyclopædia Britannica; MacTutor History of Mathematics Archive. Disponível em: <www.britannica.com/biography/Gustav-Robert-Kirchhoff>; <www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Kirchhoff.html>. Acessos em: 12 jan. 2016.



Retrato de Gustav R. Kirchhoff (1824-1887).

Experimento



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

[Veja comentários e sugestões sobre este experimento e resposta das atividades no Manual do Professor.](#)

Associação de geradores

Esta atividade experimental consiste em observar o brilho de uma lâmpada quando alimentada por diferentes associações de pilhas. Para realizá-la, você vai precisar de 4 pilhas (AA) de 1,5 V cada, uma pequena lâmpada de lanterna com tensão nominal de 3 V e fios de ligação.

Comece montando um circuito com uma única pilha alimentando a lâmpada. Em seguida, observe o brilho da lâmpada ligada a duas pilhas associadas em paralelo. E se a associação das pilhas for em série? O que acontece com o brilho da lâmpada?

- Antes de continuar, responda: qual a ddp máxima que você pode obter com a associação das pilhas sem ultrapassar a ddp nominal da lâmpada?
- Discuta com os colegas da equipe todas as possibilidades de associação utilizando três ou quatro pilhas.
- Faça, em seu caderno, uma tabela comparando o brilho da lâmpada para cada associação efetuada. Apresente os resultados para os demais colegas de classe.

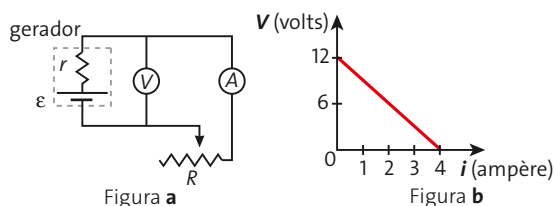
Retomando

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



20. O voltmímetro mede a ddp nos terminais do gerador e o amperímetro mede a corrente no circuito.

19. (UFU-MG) O circuito elétrico (figura a) é utilizado para a determinação da resistência interna r e da força eletromotriz $\mathcal{E}$ do gerador. Um resistor variável R (também conhecido como reostato) pode assumir diferentes valores, fazendo com que a corrente elétrica no circuito também assuma valores diferentes para cada valor escolhido de R . Ao variar os valores de R , foram obtidas leituras no voltmímetro V e no amperímetro A , ambos ideais, resultando no gráfico (figura b).

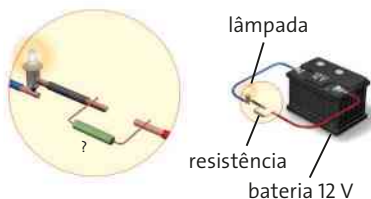


Com base nessas informações, indique a alternativa que corresponde aos valores corretos, respectivamente, da resistência interna e da força eletromotriz do gerador.

- a) $2\ \Omega$ e 7 V .
 b) $1\ \Omega$ e 4 V .
 c) $3\ \Omega$ e 12 V .
 d) $4\ \Omega$ e 8 V .
20. (UFU-MG) Baseando-se no circuito elétrico da figura a do exercício acima, explique a função do amperímetro e do voltmímetro naquele esquema.

21. (Fuvest-SP) Uma estudante quer utilizar uma lâmpada (dessas de lanterna de pilhas) e dispõe de uma bateria de 12 V . A especificação da lâmpada indica que a tensão de operação é $4,5\text{ V}$ e a potência elétrica utilizada durante a operação é de $2,25\text{ W}$. Para que a lâmpada possa ser ligada à bateria de 12 V , será preciso colocar uma resistência elétrica, em série, de aproximadamente:

- a) $0,5\ \Omega$
 b) $4,5\ \Omega$
 c) $9,0\ \Omega$
 d) $12\ \Omega$
 e) $15\ \Omega$

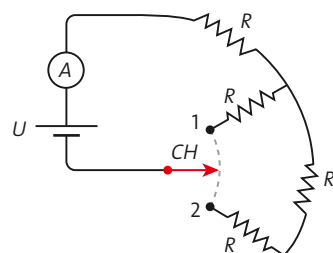


Antonio Robson/Arquivo da editora

22. (Vunesp-SP) A figura mostra o esquema de ligação de um aquecedor elétrico construído com quatro resistores ôhmicos iguais de resistência R . Os fios e a chave CH têm resistências desprezíveis. A chave pode ser ligada no ponto 1 ou no ponto 2 e o aparelho é sempre ligado a uma diferença de potencial constante U . Quando a chave CH é ligada no ponto 1, o amperímetro

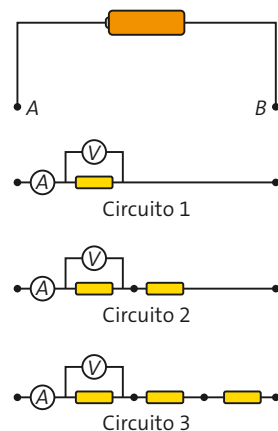
ideal mostrado na figura indica uma corrente de intensidade $2,4\text{ A}$ e os resistores dissipam, no total, 360 W .

Calcule a diferença de potencial U . Calcule a intensidade da corrente elétrica indicada pelo amperímetro quando a chave CH for ligada no ponto 2.



$$U = 150\text{ V}; i = 1,6\text{ A}$$

23. (UFScar-SP) Um professor pede a seus alunos que tabelam as leituras do voltmímetro e do amperímetro associados aos circuitos 1, 2 e 3, quando esses circuitos são conectados, um de cada vez, aos terminais A e B de um gerador ideal. Os resistores utilizados têm igual valor ôhmico. Após a série de leituras, os alunos construíram a seguinte tabela:



Número do circuito	Leitura do voltmímetro	Leitura do amperímetro
1	12	1,2
2	6	0,6
3	4	0,4

A partir da análise da tabela, os alunos puderam concluir acertadamente que, em circuitos série, à medida que se aumenta o número de resistores associados, a resistência equivalente da associação //, a diferença de potencial entre os extremos de um mesmo resistor //, e a intensidade de corrente elétrica no circuito //.

Indique a alternativa que preenche, correta e respectivamente, as lacunas do texto.

- a) diminui – diminui – diminui
 b) diminui – aumenta – aumenta
 c) aumenta – aumenta – aumenta
 d) aumenta – aumenta – diminui
 e) aumenta – diminui – diminui

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

UNIDADE

2

Ações elétricas a distância

Campo elétrico

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

Semisatch/Shutterstock/Glow Images



Uma das mensagens nos manuais de instrução de televisores indica o cuidado necessário ao abrir o aparelho.

Por que o cuidado se o aparelho está desligado?

Por que algumas vezes levamos um pequeno choque ao tocar uma maçaneta metálica em um dia seco?



Eletrostática: alguns eventos históricos

As primeiras observações sobre eletricidade, mais especificamente sobre eletrostática, datam de seis séculos antes de Cristo e, ao longo dos anos, muitos contribuíram para o seu entendimento. Vejamos um pouco dessa história.

[...] O filósofo grego Tales de Mileto fez, provavelmente, a primeira observação sobre um fenômeno elétrico ao atritar um bastão de âmbar (*elektron*, em grego) com um pedaço de lã e notar que ele atraía corpos leves em sua proximidade.

[...] Em 1600, o médico inglês William Gilbert (1544-1603) publicou seu famoso tratado *De magnete*. Nos seis livros que compõem esse tratado, reuniu suas observações experimentais sobre os fenômenos elétricos e magnéticos. Nessas observações, mostrou que esses dois fenômenos eram diferentes, ao examinar o comportamento do âmbar, quando atritado, e do ferro, quando se aproxima de um ímã. Observou, também, que o cristal de rocha e uma grande variedade de pedras preciosas apresentavam o mesmo comportamento do âmbar, isto é, atraíam corpos leves quando atritados. Como em grego *elektron* significa 'âmbar', Gilbert denominou **elétricos** os corpos que se comportam como o âmbar; as substâncias que não conseguia "eletrizar" (como os metais), denominou-as **não elétricas**. Ao estudar a eletrização de corpos por fricção, Gilbert achava que tal eletrização decorria da remoção de um fluido, ou **humor** (substância etérea e imaterial) desses mesmos corpos, deixando um **effluvium elétrico**, ou atmosfera, em seus redores.

Em suas observações sobre fenômenos magnéticos, Gilbert percebeu que os ímãs também apresentavam um **effluvium magnético** em seus redores e, mais ainda, que os raios dessa "virtude" (elétrica ou magnética) partiam do centro dos corpos e em todas as direções, agindo sobre os corpos vizinhos e os atraindo. (Em vista disso, Gilbert é considerado [...] o precursor do conceito de "campo" (elétrico e magnético).) Animado com

essa ideia, chegou a apresentar a tese de que a força de atração entre o Sol e os planetas era de origem magnética.

[...] Entre 1733 e 1734, o físico francês Charles François de Cisternay du Fay (1698-1739) realizou experiências nas quais mostrou a existência de duas espécies de "virtude elétrica" ao observar que um bastão de vidro, quando atritado com um pedaço de seda, repelia uma bolinha de sabugueiro suspensa por um fio isolante de seda, ou atraía essa mesma bolinha caso [...] fosse eletrizada por um bastão de resina friccionada com pele de gato. A esses dois tipos de "virtude elétrica" Du Fay denominou eletricidade vítrea e eletricidade resinosa, respectivamente.

[...] Em 1753, os físicos russos Georg Richmann (1711-1753) e Mikhail Lomonosov (1711-1765) realizaram experimentos com um aparelho que eles chamaram de "máquina-trovão". Com ele os dois cientistas esperavam quantificar a força da eletricidade da nuvem ou, segundo suas palavras, o "grau de força elétrica emitida pela nuvem". Em 26 de junho de 1753, Richmann morreu vítima da descarga elétrica de um relâmpago, quando realizava uma experiência em sua "máquina-trovão".

[...] Em 1785, Charles Augustin Coulomb (1736-1806) publicou um trabalho no qual registrou o resultado de suas experiências sobre as forças elétricas, usando uma balança de torção (construída em 1784). Coulomb demonstrou que "a força de atração ou repulsão entre duas cargas elétricas é diretamente proporcional ao produto de suas quantidades de cargas elétricas, inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa seus centros e se situa na mesma direção da reta que une seus centros". Coulomb observou, ainda, que a carga elétrica se situa na superfície externa de um condutor e que sua distribuição estática depende de sua curvatura; ainda mais, que o ar não era um isolante ideal.

BASSALO, José M. F. *Nascimentos da Física: 3500 a.C.-1900 a.D.* Belém: Edufpa, 1996.



Processos de eletrização

Chamamos de processo de eletrização as maneiras práticas de atribuir aos corpos uma carga elétrica, permitindo que eles fiquem sujeitos às forças de natureza elétrica e, também, atuem sobre outros corpos que podem estar neutros ou eletrizados. Assim, como os portadores elementares de carga elétrica são os elétrons, os processos de eletrização são maneiras práticas de se adicionar ou retirar elétrons dos corpos.

Veja resposta desta seção no Manual do Professor.

Condutores e isolantes

Como vimos no capítulo 1, quando um corpo inicialmente neutro recebe ou cede elétrons fica eletrizado negativa ou positivamente: corpos eletrizados têm número de prótons diferente do número de elétrons.

A experiência revela que a diferença de partículas elementares resultante após determinados corpos receberem ou cederem elétrons é distribuída pela superfície externa desses corpos. Esses corpos são os **condutores** (figura 4.1).

Já em outros corpos essa diferença é retida na região que foi eletrizada; eles são os **isolantes** (figura 4.2).

Esse comportamento diferente se deve ao fato de que os corpos condutores possuem uma grande quantidade de partículas eletrizadas livres, enquanto os elétrons dos isolantes são fortemente ligados aos átomos. Assim, por exemplo, enquanto nos metais há sempre um grande número de elétrons livres, uma borracha tem sua estrutura molecular composta, predominantemente, por ligações covalentes, com elétrons compartilhados por átomos de carbono e hidrogênio.

Eletrizando por atrito

Ao esfregar uma caneta esferográfica no cabelo ou na roupa, ela, que é de material isolante, eletriza-se. Isso significa que os elétrons estão passando de um corpo para o outro. Definindo com mais precisão, os elétrons estão passando da caneta para o cabelo ou para a roupa, fazendo com que a caneta fique eletrizada positivamente e o cabelo ou a roupa, eletrizado negativamente (figura 4.3).

Assim, sempre que há **atrito** entre dois corpos inicialmente neutros, ambos se eletrizam com **cargas de mesmo valor absoluto e sinais opostos**.

A eletrização por atrito é mais eficiente quando os corpos a ser atritados (esfregados) são isolantes, isto é, as cargas geradas, por não terem mobilidade, concentram-se nos corpos separadamente.

Mas, por que os pedaços de papel, que estão neutros, são atraídos pela caneta eletrizada? Para explicar isso, precisamos entender o que é a indução eletrostática.



Figura 4.3 Eletrização por atrito de dois corpos inicialmente neutros.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

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

Para refletir

Se você esfregar uma caneta esferográfica no cabelo ou na roupa, ela passa a atrair pequenos pedaços de papel, que, após aderirem a ela, são repelidos e caem. Como você explica esse fato?



Figura 4.1 Esfera metálica com excesso de cargas elétricas distribuídas pela superfície externa.



Figura 4.2 Esfera com excesso de cargas elétricas concentradas em uma região.



Figura 4.4 Atracção de um corpo neutro por um eletrizado.



Figura 4.5 Eletrização de corpos por contato.



Figura 4.6 Corpos com cargas elétricas de mesmo sinal se repelem.

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

Indução eletrostática

Os pedaços de papel, apesar de estarem neutros pela aproximação da caneta que está carregada positivamente, têm seus elétrons livres deslocados para a região mais próxima da caneta, isto é, os pedaços de papel se comportam como se fossem compostos de duas partes, uma negativa (próxima da caneta) e uma positiva (distante da caneta) (figura 4.4), sendo assim atraídos pela caneta.

A esse fenômeno de separação das cargas elétricas de um corpo neutro pela simples aproximação de um corpo eletrizado se dá o nome de **indução eletrostática**. Deve-se notar que o pedaço de papel como um todo continua neutro, tendo sofrido apenas a separação das cargas.

Eletrização por contato

Quando os pedaços de papel, que estão neutros, entram em contato com a caneta, têm seus elétrons livres transferidos para ela. Assim, os pedaços de papel eletrizam-se positivamente, e parte da carga da caneta é neutralizada pelos elétrons que recebe dos papéis (figura 4.5).

O contato entre um corpo eletrizado e um corpo neutro provoca a distribuição da carga entre os dois corpos. Como esse processo requer movimentação de partículas eletrizadas, é mais eficiente para corpos condutores.

Finalmente, como os pedaços de papel adquirem cargas de mesmo sinal que as da caneta, sofrem repulsão e caem (figura 4.6).

Observações:

- Para que ocorra a eletrização por atrito, os corpos devem ser de materiais diferentes, ou seja, eles não podem ter a mesma tendência de ganhar ou de perder elétrons. É por isso que quando esfregamos as mãos, não eletrizamos nenhuma delas. Em Química essa tendência é traduzida por uma grandeza denominada **eletroafinidade**. Os materiais podem ser classificados de acordo com essa tendência, elaborando-se, assim, as chamadas séries **triboeletricas** (figura 4.7).

Qualquer substância de uma série triboelétrica quando atritada com uma que está à sua esquerda fica eletrizada negativamente. E quando atritada com uma que está à sua direita, fica eletrizada positivamente. Exemplos: seda atritada com vidro: seda negativa, vidro positivo; seda atritada com madeira: seda positiva, madeira negativa.

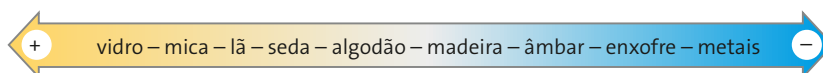


Figura 4.7 Exemplo de uma série triboelétrica.

● Na **eletrização por contato**:

- os corpos ficam eletricamente neutros ou com cargas de mesmo sinal;
- quando o sistema é formado por corpos isolados de influências externas, a quantidade de carga elétrica total final, de acordo com o princípio da conservação de carga, é igual à quantidade de carga elétrica total inicial; para dois corpos, A e B , com cargas elétricas iniciais Q'_A e Q'_B e cargas elétricas finais Q_A e Q_B , temos:

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B$$

Em particular, se os corpos A e B forem iguais, ficarão com quantidades de carga elétrica finais iguais (**figura 4.8**), isto é:

$$Q'_A = Q'_B = \frac{Q_A + Q_B}{2}$$

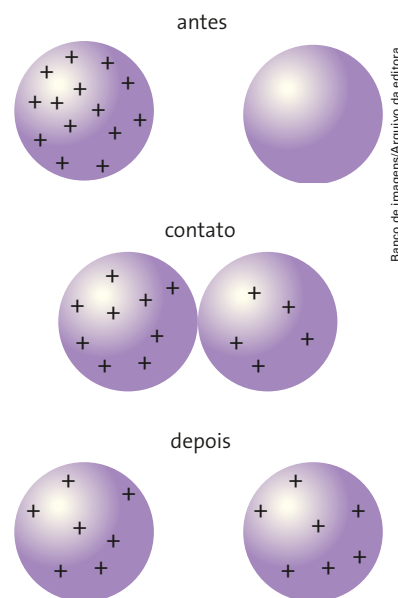


Figura 4.8 Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) da eletrização por contato.

Banco de Imagens/Arquivo da editora

Física explica



Eletroscópio de folhas

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

O eletroscópio de folhas é constituído de duas lâminas metálicas bem leves formando uma dobradiça, conforme figura, ligadas por uma haste condutora a um outro corpo (cabeça), também condutor. É muito utilizado para se verificar se um corpo está ou não eletrizado.

Quanto mais flexível é o material utilizado nas folhas, mais finas e leves elas são, propiciando um aparelho mais sensível. Por essa razão, na construção de eletroscópios mais sofisticados usam-se folhas de ouro. Em razão da sensibilidade das folhas, elas são colocadas no interior de uma garrafa, para que não sofram interferências das correntes de ar.

Vejamos o que acontece quando aproximamos um corpo eletrizado da cabeça do eletroscópio.

Antes da aproximação, devemos encostar a cabeça do eletroscópio em qualquer metal ligado à terra para neutralizá-lo. As folhas ficarão neutras e próximas, como mostra a foto **a**.

Quando aproximamos um corpo eletrizado (positivamente, por exemplo) da cabeça do eletroscópio, mas sem encostar, há indução de cargas negativas na cabeça e, portanto, as folhas localizadas na outra extremidade ficam eletrizadas positivamente. Como resultado, temos a **repulsão** (afastamento) entre as duas folhas (foto **b**). Se o corpo utilizado nesse experimento estiver eletrizado negativamente, as folhas do eletroscópio também se afastarão, pois ambas ficarão eletrizadas com cargas negativas.

- Explique, em seu caderno, o funcionamento do eletroscópio quando o corpo aproximado da cabeça for eletrizado negativamente.



Eletroscópio de folhas (neutro).



Eletroscópio: folhas positivas, cabeça negativa.

Fotos: Clive Streeter/Dorling Kindersley Ltd./Corbis/Latinstock

1. (PUC-SP) A mão da garota da figura toca a esfera eletrizada de uma máquina eletrostática conhecida como gerador de Van de Graaff.



Science Society Picture Library/Getty Images

A respeito do descrito são feitas as seguintes afirmações:

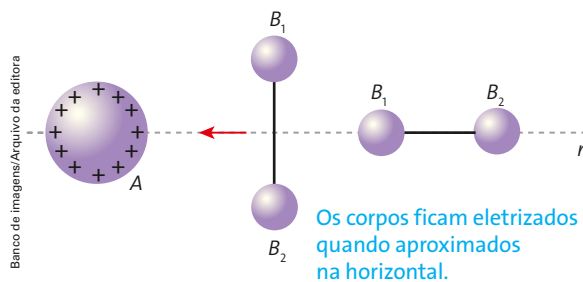
- Os fios de cabelo da garota adquirem cargas elétricas de mesmo sinal e por isso se repelem.
- O clima seco facilita a ocorrência do fenômeno observado no cabelo da garota.
- A garota conseguiria o mesmo efeito em seu cabelo, se na figura sua mão apenas se aproximasse da esfera de metal sem tocá-la.

Está correto o que se lê em:

- I, apenas.
 - ☒ b) I e II, apenas.
 - I e III, apenas.
 - II e III, apenas.
2. São dadas três esferas metálicas, A , B e C , idênticas, e um pano de seda, todos inicialmente neutros. Realiza-se a seguinte sequência de operações.
- Atrita-se o pano de seda com a esfera metálica A .
 - Em seguida, coloca-se a esfera A em contato com a esfera B .
 - Finalmente, coloca-se a esfera A em contato com a esfera C .
- Sabe-se que o pano de seda adquiriu uma quantidade de carga elétrica, em módulo, igual a $8 \mu\text{C}$. Considerando o exemplo de uma série triboelétrica apresentado na figura 4.7 e as propriedades da eletrização por atrito e contato, quais são o sinal e a quantidade de cargas elétricas de cada um dos corpos após a sequência de operações?

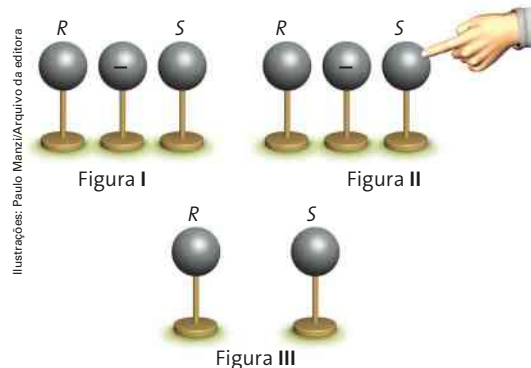
$$Q_A = -2 \mu\text{C}; Q_B = -4 \mu\text{C}; Q_C = -2 \mu\text{C}; Q_{\text{pano}} = +8 \mu\text{C}.$$

3. Os corpos B_1 e B_2 , idênticos, estão ligados por uma barra rígida condutora (veja a figura).



Eles podem ser aproximados do corpo carregado A , pela reta r , que contém o ponto médio da barra, com esta posicionada na vertical ou na horizontal. Aproximam-se, então, de A os dois sistemas formados por B_1 e B_2 ; em seguida, retira-se a barra condutora. Em que caso os corpos B_1 e B_2 ficam eletrizados, após serem afastados de A ? Justifique a resposta.

4. (UFMG) Durante uma aula de Física, o professor Carlos Heitor faz a demonstração de eletrostática que se descreve a seguir. Inicialmente, ele aproxima duas esferas metálicas, R e S , eletricamente neutras, de uma outra esfera isolante, eletricamente carregada com carga negativa, como representado na Figura I. Cada uma dessas esferas está apoiada em um suporte isolante. Em seguida, o professor toca o dedo, rapidamente, na esfera S , como representado na Figura II. Isso feito, ele afasta a esfera isolante das outras duas esferas, como representado na Figura III.



Considerando-se essas informações, é correto afirmar que, na situação representada na Figura III:

- a esfera R fica com carga negativa e a S permanece neutra.
- a esfera R fica com carga positiva e a S permanece neutra.
- a esfera R permanece neutra e a S fica com carga negativa.
- ☒ d) a esfera R permanece neutra e a S fica com carga positiva.



Lei de Coulomb

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

Até aqui, discutimos como corpos eletrizados atraem-se ou repelem-se mutuamente, sem a preocupação de caracterizar quantitativamente as interações de natureza elétrica.

Vamos, então, analisar essas interações em relação às **cargas puntiformes** – corpos eletrizados cuja carga elétrica se concentra em um único ponto e cujas dimensões são pequenas em vista das distâncias que os separam.

A interação entre duas cargas puntiformes deve ser representada pela força de natureza elétrica entre elas. Portanto, é necessário caracterizar essa força no que diz respeito à direção, ao sentido e à intensidade.

Dois corpos puntiformes, eletrizados com cargas Q_1 e Q_2 , separados por uma distância r (figura 4.9), trocam ações elétricas representadas por forças que têm as seguintes características:

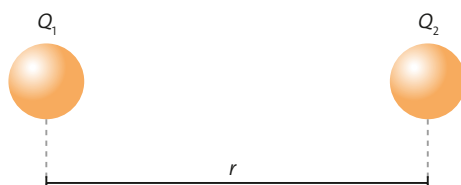


Figura 4.9 Duas cargas elétricas puntiformes separadas pela distância r .

- A direção de $\vec{F}$ é a direção da reta que une os corpos.
- Quanto ao sentido da força elétrica, de acordo com a lei de Du Fay, temos dois casos a considerar:

1ª) se os corpos forem eletrizados com cargas elétricas de mesma natureza (mesmo sinal), a força elétrica será de repulsão (figura 4.10);

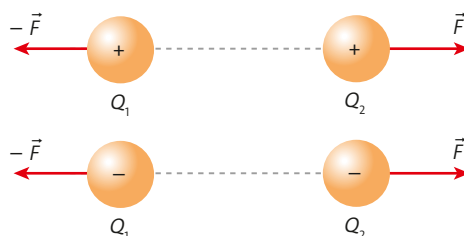


Figura 4.10 Cargas elétricas de mesmo sinal se repelem.

2ª) se forem eletrizados com cargas elétricas de sinais contrários, a força elétrica será de atração (figura 4.11).

Conforme notamos, há uma interação de natureza elétrica entre as cargas puntiformes Q_1 e Q_2 ; portanto, as forças indicadas, em todos os casos, constituem pares ação-reação (figura 4.12), com intensidades iguais entre si.

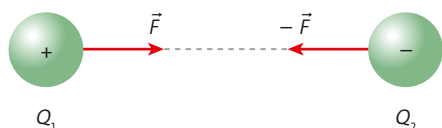


Figura 4.11 Cargas elétricas de sinais contrários se atraem.

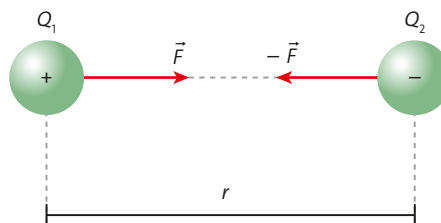


Figura 4.12 As forças $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ possuem a mesma intensidade, a mesma direção, mas sentidos contrários; elas formam um par ação-reação.

Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora



Figura 4.13 Modelo de balança de torção usada por Coulomb.

O físico francês Charles Augustin de Coulomb, com sua célebre balança de torção (na verdade um dinamômetro – **figura 4.13**), estabeleceu a lei matemática que possibilita o cálculo da intensidade da força elétrica entre dois corpos eletrizados.

Coulomb constatou que a intensidade da força elétrica é diretamente proporcional ao produto dos módulos da quantidade de carga elétrica de cada corpo e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa:

$$F = k \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{r^2}$$

Nessa expressão, F representa a intensidade da força elétrica; k é uma constante que depende do meio em que estão imersos os corpos; Q_1 e Q_2 são os módulos das quantidades de carga elétrica dos corpos; r é distância de separação entre os corpos, aqui considerados como cargas puntiformes.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), temos: F em newtons (N); Q_1 e Q_2 em coulombs (C); r em metros (m); e k em $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. Para o vácuo, a constante k vale:

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

Caso as cargas não estejam colocadas no vácuo, o valor de k é sempre menor do que k_0 . Para a água, por exemplo, o valor de k é aproximadamente $\frac{k_0}{80}$. Entretanto, para o ar seco, o valor de k pode ser considerado igual a k_0 .

7.a) Intensidade igual a $3F$.

b) Intensidade igual a $10F$.

c) Intensidade igual a $7F$.



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

Exercícios

5. (UFPR) Considere duas partículas, 1 e 2, imóveis e carregadas eletricamente, que se encontram separadas por uma distância inicial D . Julgue as afirmativas e indique certa ou errada.

I. À distância D , o módulo da força eletrostática entre as partículas é o mesmo, independentemente do sinal das cargas. **Certa.**

II. Se a carga da partícula 1 dobrar e a carga da partícula 2 for reduzida à metade, o módulo da força eletrostática entre elas diminuirá quatro vezes. **Errada.**

III. Quando a distância entre as partículas é reduzida à metade, o módulo da força eletrostática entre elas aumenta quatro vezes. **Certa.**

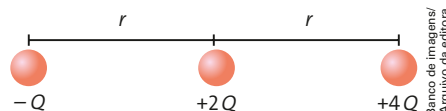
IV. Quando a distância entre as partículas é aumentada três vezes, o módulo da força eletrostática entre elas diminui três vezes. **Errada.**

V. Se as partículas tiverem cargas de sinais opostos, a força eletrostática entre elas será atrativa. **Certa.**

6. Duas esferas metálicas iguais, de raio 2 mm, estão eletrizadas com cargas elétricas iguais e separadas por 60 cm, no vácuo. Nessas condições, se repelem com uma força de intensidade 20 N. Considere: $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. Calcule:

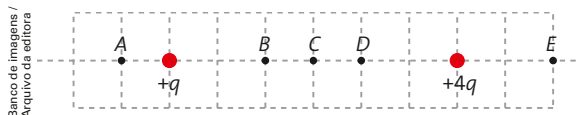
- a) os valores absolutos das cargas; $Q = 2\sqrt{2} \cdot 10^{-5} \text{ C}$
b) a intensidade da força elétrica se as cargas estiverem em um meio cuja constante eletrostática seja $\frac{1}{4}$ do valor anterior. **$F = 5 \text{ N}$**

7. Considere F a intensidade da força elétrica entre duas cargas puntiformes iguais a $Q > 0$, quando separadas por uma distância r , no vácuo. A figura representa três cargas $-Q$, $+2Q$ e $+4Q$, colocadas no vácuo.



- a) Caracterize a força elétrica resultante em $-Q$.
b) Caracterize a força elétrica resultante em $+2Q$.
c) Caracterize a força elétrica resultante em $+4Q$.

8. (UFRGS-RS) A figura a seguir representa duas cargas elétricas puntiformes positivas, $+q$ e $+4q$, mantidas fixas em suas posições.



Para que seja nula a força eletrostática resultante sobre uma terceira carga puntiforme, essa carga deve ser colocada no ponto:

- a) A. d) D.
x b) B. e) E.
c) C.

3 Campo elétrico

Como vimos, corpos eletrizados interagem a distância, isto é, trocam forças de natureza elétrica. Vamos retomar esse assunto, mas com uma abordagem ligeiramente diferente, considerando que um corpo eletrizado gera ao seu redor um **campo elétrico**, uma vez que outro corpo colocado nas suas proximidades fica sujeito à ação de uma força de natureza elétrica.

O conceito de campo foi criado para explicar o fenômeno de ação a distância, e foi proposto pelo físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867).

A cada ponto da região do espaço em volta de um corpo eletrizado, isto é, o campo elétrico gerado por esse corpo, associaremos uma grandeza física, que denominaremos **vetor campo elétrico** ($\vec{E}$) (figura 4.14).

Como consequência, o vetor campo elétrico ($\vec{E}$) dependerá do conjunto de cargas fixas, responsável pela existência do campo, e do ponto considerado.

Vetor campo elétrico

Para a apresentação do conceito de vetor campo elétrico ($\vec{E}$), vamos considerar uma região do espaço na qual há campo elétrico. Se colocarmos em um ponto dessa região um pequeno corpo (que nomeamos de carga de prova), eletrizado com uma carga q , uma força elétrica ($\vec{F}$) atuará sobre ela. Ao substituímos o corpo de prova por outro com carga elétrica $2q$, constataremos que a força elétrica passará a ser ($2\vec{F}$).

Essa proporcionalidade entre força elétrica e carga do corpo de prova é mantida para o ponto considerado, qualquer que seja o valor da carga. Assim, conceituamos o vetor campo elétrico ($\vec{E}$) nesse ponto explorando o fato de que força elétrica e carga de prova mantêm uma relação dada por:

$$\vec{F} = (\vec{E}) \cdot q$$

O vetor ($\vec{E}$), para determinado ponto, independe da carga de prova considerada e da força a que ela fica submetida.

Em relação ao conceito de vetor campo elétrico apresentado, as seguintes observações podem ser feitas:

1º No SI, a unidade para o campo elétrico é **newton por coulomb (N/C)**.

2º Os vetores $\vec{E}$ e $\vec{F}$ têm as seguintes características:

- em módulo, $F = |q| \cdot E$;
- mesma direção;
- se a carga elétrica é positiva ($q > 0$), $\vec{F}$ e $\vec{E}$ têm o mesmo sentido (figura 4.15.a);
- se a carga elétrica é negativa ($q < 0$), $\vec{F}$ e $\vec{E}$ têm sentidos opostos (figura 4.15.b).

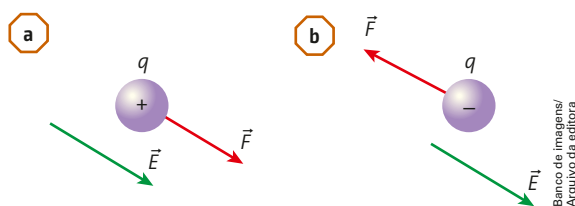


Figura 4.15 Força elétrica sobre as cargas elétricas positiva (a) e negativa (b), imersas em um campo elétrico. Representações esquemáticas.

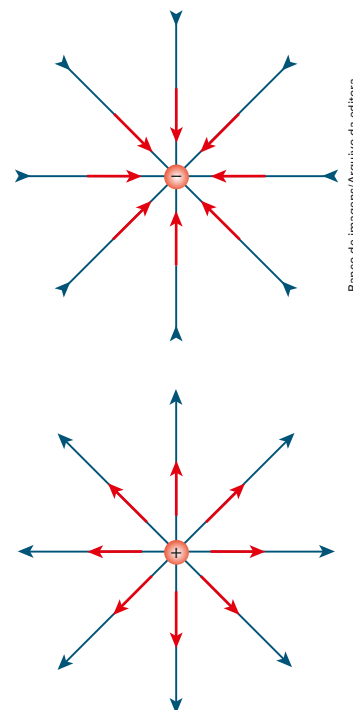


Figura 4.14 Representação esquemática do campo elétrico.

Banco de imagens/Arquivo da editora

Banco de imagens/Arquivo da editora

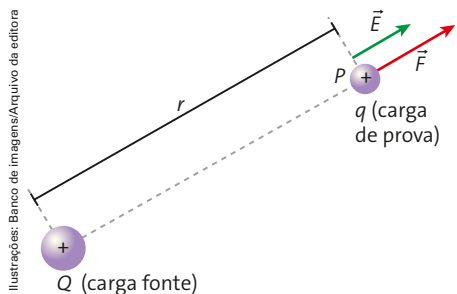


Figura 4.16 Interação entre uma carga fonte e uma carga de prova, ambas positivas. Representação esquemática.

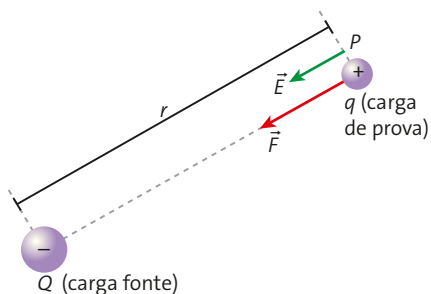


Figura 4.17 Interação entre uma carga fonte negativa e uma carga de prova positiva. Representação esquemática.

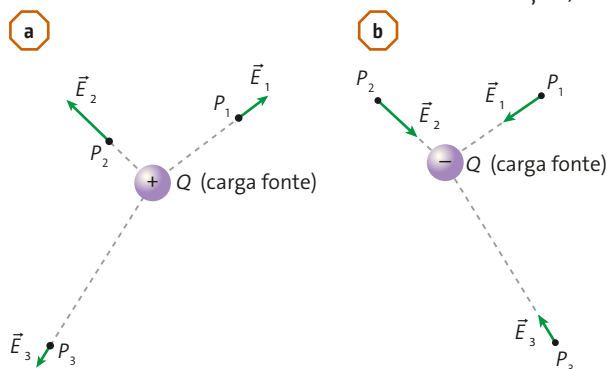


Figura 4.18 Campo elétrico gerado por uma fonte positiva (a) e outra negativa (b). Representações esquemáticas.

Campo elétrico gerado por uma carga puntiforme

Uma carga elétrica puntiforme (Q) gera no espaço ao seu redor um campo elétrico. Esse campo, em um ponto P qualquer, depende da intensidade da carga geradora (Q), da distância do ponto P em relação à carga (r) e do meio que envolve a carga fonte.

A **figura 4.16** ilustra uma carga fonte positiva ($Q > 0$) e um ponto P do espaço no qual foi colocada uma carga de prova, também positiva ($q > 0$). A **figura 4.17** obedece às mesmas condições da situação esquematizada na **figura 4.16**, com mudanças apenas na carga fonte, agora negativa ($Q < 0$).

Sabemos que a relação entre a intensidade da força elétrica e a do vetor campo elétrico é:

$$F = |q| \cdot E \quad \text{I}$$

De acordo com a lei de Coulomb, vista no tópico 2, temos:

$$F = \frac{k \cdot |Q| \cdot |q|}{r^2} \quad \text{II}$$

Igualando as expressões I e II anteriores, obtemos a intensidade do vetor campo elétrico, dada por:

$$E = \frac{k \cdot |Q|}{r^2}$$

em que k é a constante eletrostática do meio que envolve a carga fonte.

Para determinar a direção e o sentido do vetor campo elétrico, devemos observar que:

- a direção do campo, no ponto P , é a mesma da força elétrica sobre a carga de prova;
- o sentido do vetor campo elétrico é o mesmo da força elétrica que age sobre a carga de prova quando esta é positiva.

A interação da carga de prova ($q > 0$) com a carga fonte (Q) é de:

- repulsão, se a carga fonte é positiva, $Q > 0$;
- atração, se a carga fonte é negativa, $Q < 0$.

Em relação ao vetor campo elétrico ($\vec{E}$) gerado pela carga fonte, vemos que seu sentido é de afastamento dessa carga quando ela é positiva e de aproximação quando é negativa.

Resumindo, temos:

$$\vec{E} \rightarrow \begin{cases} \text{Direção: radial} \\ \text{Sentido} \begin{cases} Q > 0: \text{divergente (figura 4.18.a)} \\ Q < 0: \text{convergente (figura 4.18.b)} \end{cases} \\ \text{Intensidade: } E = \frac{k \cdot |Q|}{r^2} \end{cases}$$

Como o campo é uma característica de um ponto do espaço, produzido pela carga fonte, o resultado obtido, tanto para a carga de prova positiva quanto para a carga de prova negativa, é o mesmo. O vetor campo elétrico independe do sinal da carga de prova.

Campo elétrico gerado por várias cargas puntiformes

Um ponto qualquer do espaço pode estar sob a influência não somente de uma, mas de várias cargas puntiformes. Quando colocamos uma carga de prova q nesse ponto, temos a superposição de várias forças, causando uma força resultante, ela pode ser entendida como consequência do campo elétrico total (resultante) devido às várias fontes. Vetorialmente escrevemos:

$$\vec{F}_R = q\vec{E}_R = q\vec{E}_1 + q\vec{E}_2 + \dots + q\vec{E}_n \Rightarrow \vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

Portanto, o campo elétrico resultante da ação de várias cargas é a soma vetorial dos campos que cada uma produziria isoladamente.

Linhas de campo

Para efeito de estudo, a existência de um campo elétrico em uma dada região do espaço admite duas formas de representação. A primeira é usar o vetor campo elétrico ($\vec{E}$), que pode ser determinado para os diversos pontos da região, uma vez conhecida a distribuição de cargas elétricas fixas.

Embora essa representação seja útil, pois permite caracterizar um campo elétrico de maneira precisa e quantitativa, é apenas local, porque a cada ponto está associado um vetor campo elétrico, que precisa ser determinado sempre que necessitarmos examinar um ponto diferente.

Há, também, uma maneira global de visualizar o campo elétrico de uma região: pelas chamadas linhas de campo que podem ser traçadas experimentalmente, como mostra a [figura 4.19](#).

De maneira geral, as linhas de campo são tangentes ao vetor campo elétrico ($\vec{E}$) e orientadas no sentido desse vetor ($\vec{E}$).

Na [figura 4.20](#), estão representadas as linhas de um campo elétrico gerado por certa distribuição de cargas. Os vetores $\vec{E}_A$ e $\vec{E}_B$ representam os campos nos respectivos pontos A e B. Em torno do ponto A, as linhas de campo estão mais concentradas do que em torno do ponto B; portanto, a intensidade do campo em A é maior do que em B.

De acordo com as propriedades das linhas de campo, destacadas a seguir, podemos construir essas linhas para a carga puntiforme positiva e também para a negativa, considerando que elas estão isoladas de qualquer influência externa.

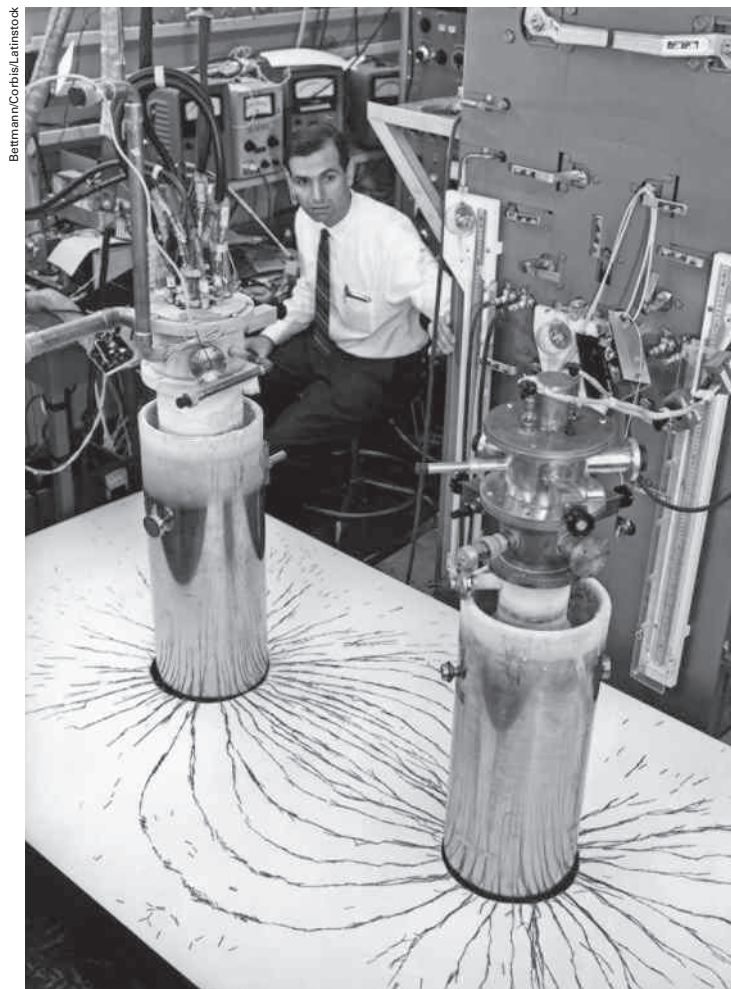


Figura 4.19 Linhas de campo elétrico gerado por condutores cilíndricos.

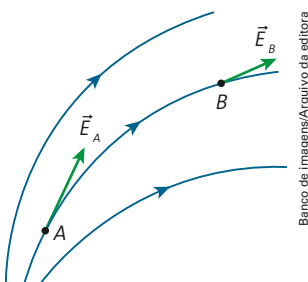


Figura 4.20 Representação esquemática das linhas de campo elétrico gerado por distribuição de cargas.

Banco de Imagens/Arquivo da editora

Propriedades das linhas de campo:

- são sempre linhas abertas que se originam no infinito ou nas cargas positivas e findam no infinito ou nas cargas negativas (**figura 4.21**). Assim sendo, não podem começar e terminar no mesmo ponto;
- elas nunca se cruzam: se houvesse cruzamento teríamos, num mesmo ponto, dois vetores campo elétrico (**figura 4.22**).

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

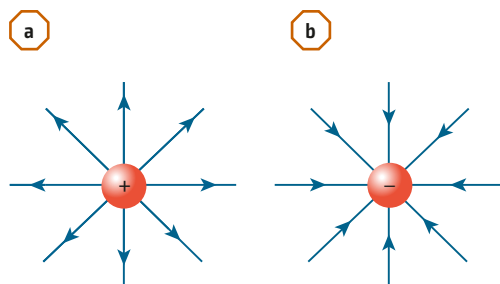


Figura 4.21 Representação esquemática das linhas de campo para a carga positiva (a) e para a negativa (b).

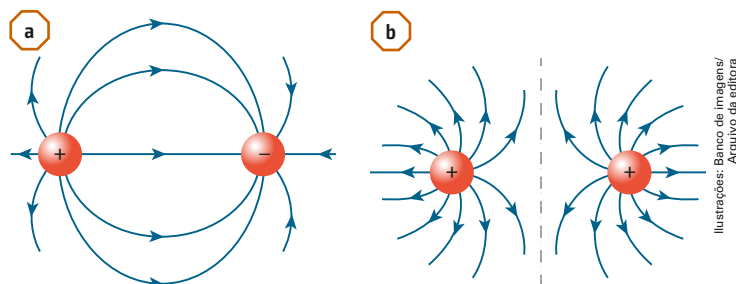


Figura 4.22 Representação esquemática das linhas de campo geradas por um par de cargas puntiformes: de sinais contrários (a); de mesmo sinal e mesmo módulo (b).

Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

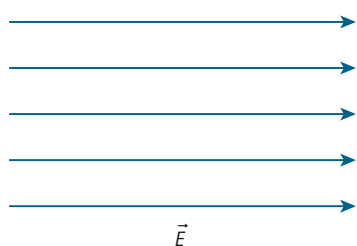


Figura 4.23 Representação esquemática das linhas de campo.

Campo elétrico uniforme

Para algumas distribuições de cargas fixas e para um conjunto de pontos em algumas regiões, o vetor campo elétrico varia pouco de ponto para ponto. Nessas condições, dizemos que o campo elétrico é uniforme e que o vetor campo elétrico ($\vec{E}$) que o representa tem, em todos os pontos, mesma intensidade, mesma direção e mesmo sentido.

Nesse caso, as linhas de campo são representadas por retas paralelas, com mesma orientação, conforme mostra a **figura 4.23**.

Um campo elétrico uniforme é obtido quando se carregam duas placas condutoras com cargas iguais em módulo, mas de sinais opostos, como representado na **figura 4.24**.

Na **figura 4.25**, vemos um feixe de elétrons sendo desviado por um campo elétrico uniforme gerado por duas placas paralelas carregadas com cargas opostas.

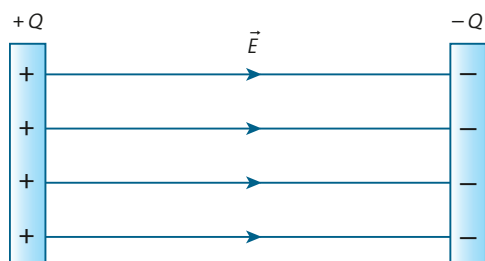


Figura 4.24 Representação esquemática de um campo elétrico uniforme.

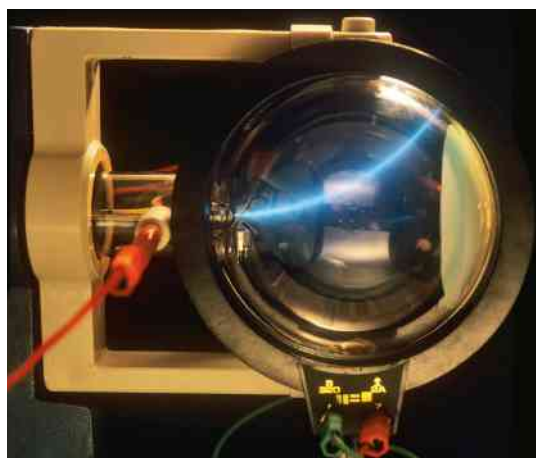


Figura 4.25 O feixe de elétrons é desviado de sua trajetória, pois sofre força elétrica sendo atraído pela placa de carga positiva.

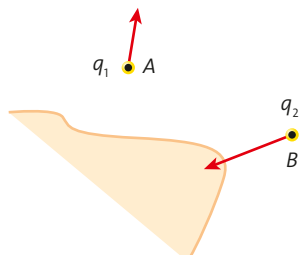
Andrew Lambert Photography/SPL/latinstock

Exercícios

11. a) Intensidade: $E = 7,7 \cdot 10^4 \text{ N/C}$; direção: horizontal; sentido: para a direita.

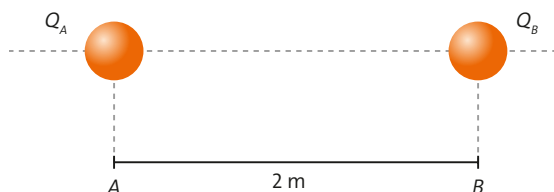


9. Com a intenção de sondar a região do espaço ao redor de um condutor eletrizado, duas pequenas cargas de prova foram colocadas conforme a figura, sendo $q_1 > 0$, $q_2 < 0$ e $|q_1| = |q_2|$, obtendo-se as forças elétricas também representadas na figura.



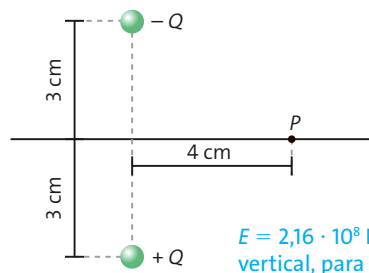
Esboce, em seu caderno, o vetor campo elétrico nos pontos A e B em que foram colocadas as cargas de prova. **Ver resposta no Manual do Professor.**

10. Uma carga elétrica $q = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ é colocada em um ponto P do espaço e fica sujeita a uma força elétrica $F = 10 \text{ N}$ orientada para o norte. Caracterize o vetor campo elétrico no ponto P. **Intensidade: $E = 5 \cdot 10^6 \text{ N/C}$; direção e sentido: os mesmos da força.**
11. Duas cargas elétricas, A e B, estão no vácuo, separadas pela distância de 2 m, conforme mostra o esquema.



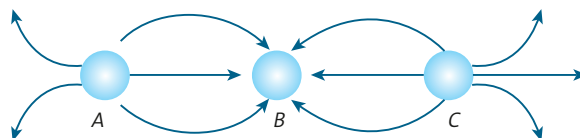
Sendo $Q_A = -4 \mu\text{C}$ e $Q_B = 9 \mu\text{C}$, determine:

- a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico, em um ponto P, situado sobre a reta que une as cargas e 1 m à direita da carga Q_B ;
 - o vetor campo elétrico no ponto M, situado 4 m à esquerda da carga Q_A e sobre a reta que une as duas cargas. **O campo elétrico resultante é nulo.**
12. Duas cargas puntiformes de mesmo valor absoluto $Q = 50 \mu\text{C}$, mas de sinais opostos, geram campos elétricos no ponto P, no vácuo, conforme indicado na figura. Caracterize o campo elétrico resultante, em P.



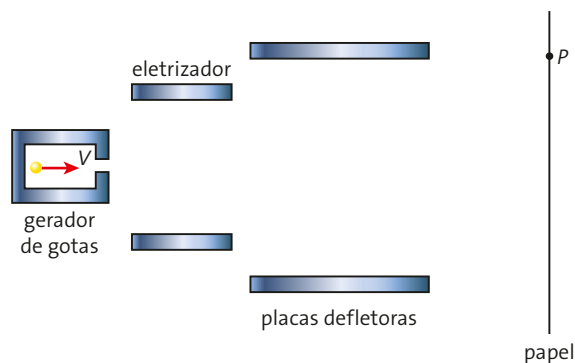
$E = 2,16 \cdot 10^8 \text{ N/C}$, vertical, para cima.

13. (UFV-MG) A figura a seguir representa a configuração de linhas de campo elétrico produzida por três cargas pontuais, todas com o mesmo módulo Q.



Os sinais das cargas A, B e C são, respectivamente:

- negativo, positivo e negativo.
 - positivo, negativo e positivo.**
 - positivo, positivo e positivo.
 - negativo, negativo e negativo.
 - negativo, negativo e positivo.
14. (UFMG) A figura mostra, esquematicamente, as partes principais de uma impressora jato de tinta:



Durante o processo de impressão, um campo elétrico é aplicado nas placas defletoras de modo que desvie as gotas eletrizadas. Dessa maneira, as gotas incidem exatamente no lugar programado da folha de papel onde se formará, por exemplo, parte de uma letra. Considere que as gotas são eletrizadas negativamente. Para que elas atinjam o ponto P da figura, o vetor campo elétrico entre as placas defletoras é melhor representado por:

- ↓**
 - ↑
 - ↗
 - ↖
 - ←
15. Em uma região em que existe um campo elétrico uniforme, um corpúsculo de massa m e carga elétrica $+Q$ é abandonado em repouso.
- Explique se o corpúsculo permanecerá em repouso ou entrará em movimento. **Entrará em movimento.**
 - Se não permanecer em repouso, explique o tipo de movimento que ele descreverá. **Movimento retilíneo uniformemente acelerado.**



Potencial elétrico e energia potencial elétrica

Quando estudamos os bipolos elétricos (geradores, receptores e resistores), percebemos a importância da energia elétrica e desenvolvemos equações que a relacionam com medidas macroscópicas da diferença de potencial, corrente elétrica e potência em circuitos elétricos.

A lei de Coulomb e o conceito de campo elétrico nos permitem apurar essas ideias, estabelecendo como o conceito de diferença de potencial se relaciona com as ações microscópicas sobre os portadores de carga, em movimento nos circuitos elétricos. Isso é possível considerando que a força de campo de natureza elétrica é conservativa e, portanto, a sua ação está associada à existência de uma energia potencial elétrica.

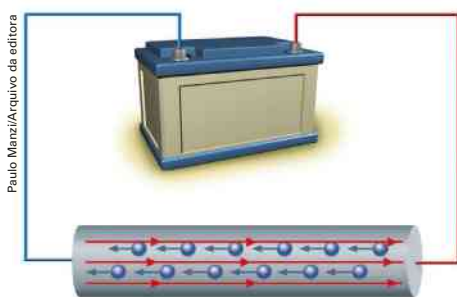


Figura 4.26 Representação esquemática (sem escalas e em cores fantasia) do interior de um condutor atravessado por uma corrente elétrica, quando submetido a uma ddp.

Vamos pensar no interior de um condutor metálico atravessado por uma corrente elétrica (i), quando submetido a uma ddp (U) (figura 4.26).

Podemos considerar que o movimento dos elétrons se deve à ação de uma força elétrica ($\vec{F}$), causada pelo campo elétrico que representa a estrutura das cargas fixas e a posição dos pontos considerados. Essa estrutura de cargas fixas pode ser representada pelos polos da bateria, usada como gerador no circuito.

Assim, retomando a relação entre as variações da energia potencial elétrica (ΔE) das partículas eletrizadas com carga elétrica (Δq) como a definição de diferença de potencial (ddp ou voltagem), podemos identificar a variação da energia como o trabalho da força elétrica correspondente. Escrevemos desta forma:

$$U = \frac{\Delta E}{\Delta q} = \frac{\tau_{AB}}{\Delta q}$$

Supondo que o campo elétrico no interior seja uniforme e expressando o trabalho da força elétrica, temos:

$$\tau_{AB} = F \cdot d = \Delta q \cdot E \cdot d \Rightarrow U = \frac{\Delta q \cdot E \cdot d}{\Delta q}$$

$$U = E \cdot d$$

Na expressão estão relacionadas duas grandezas representativas de um campo elétrico, uma vetorial ($\vec{E}$), relacionada às forças de natureza elétrica, e outra escalar (U), relacionada às variações de energia potencial elétrica.

É comum expressar a diferença de potencial (U) como $U = V_A - V_B$, chamando V_A e V_B de potenciais elétricos dos pontos A e B , respectivamente.

Conforme já visto, a unidade de diferença de potencial no SI é o volt (V) e, consequentemente, a do potencial elétrico também. Além disso, ao examinarmos a relação entre campo elétrico e diferença de potencial, concluímos que a unidade de intensidade de campo elétrico (N/C) também pode ser expressa por volt/metro (V/m).

De maneira alternativa, poderíamos definir o potencial elétrico de um ponto com base na energia potencial elétrica (E_p) de uma carga (q) colocada nesse ponto, como:

$$V = \frac{E_p}{q}$$

Assim, usando o teorema da energia potencial estudado em Mecânica, podemos expressar o trabalho da força elétrica da seguinte maneira:

$$\tau_{AB} = E_{p(A)} - E_{p(B)} = qV_A - qV_B$$

$$\tau_{AB} = q(V_A - V_B)$$

Comentários:

Ao estudarmos o campo elétrico, em razão da excessiva quantidade de detalhes, podemos perder a visão do todo. Para resgatar essa visão, acrescentamos alguns comentários informais:

- A Eletricidade é uma aplicação particular da Mecânica, relacionada com a força de ação a distância, de natureza elétrica.
- Então, do ponto de vista do mundo físico, é importante caracterizar as duas grandezas já habituais da Mecânica:
 - Vetorial – *Força elétrica*.
 - Escalar – *Energia potencial elétrica*.
- O vetor campo elétrico ($\vec{E}$) e o potencial elétrico (V) são grandezas auxiliares, uma vetorial e outra escalar, definidas de maneira que permita o cálculo da força elétrica e da energia potencial elétrica, respectivamente.

16. a) $V_{(+)} = +12 \text{ V}$
b) $V_{(-)} = -12 \text{ V}$

17. a) $E = 5 \cdot 10^3 \text{ N/C}$
b) $F = 5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$
c) $\tau = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

Exercícios

16. Uma bateria possui uma *ddp* entre seus polos de 12 V.

- Considerando seu polo negativo como referência ($V = 0$), qual o potencial elétrico do polo positivo?
- Considerando seu polo positivo como referência ($V = 0$), qual o potencial elétrico do polo negativo?
- Considerando que o potencial elétrico do polo negativo é, por convenção, igual a 3 V, qual o potencial elétrico do polo positivo? $V_{(+)} = +15 \text{ V}$

17. Na foto ao lado temos um dispositivo que cria entre suas placas uma *ddp* de 250 V, quando elas estão separadas por 5 cm. Calcule em seu caderno:

- a intensidade do campo elétrico entre as placas;
- a intensidade da força elétrica atuante sobre uma carga de $1 \mu\text{C}$ colocada entre as placas;
- o trabalho da força elétrica quando a carga de $1 \mu\text{C}$ se desloca da placa positiva para a negativa.



Dispositivo experimental que gera campo elétrico entre duas placas paralelas.





5 Relação entre as representações do campo elétrico

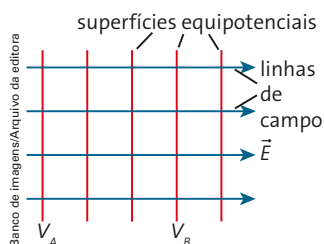


Figura 4.27 Representação esquemática de um campo elétrico uniforme.

As representações vetorial e escalar dos campos elétricos têm estreita relação entre si, originária da relação entre o trabalho das forças conservativas e a energia potencial. Veremos essas relações, partindo do conceito de superfície equipotencial: superfície sobre a qual todos os pontos têm o mesmo potencial elétrico.

Ao considerarmos um campo elétrico uniforme podemos traçar suas linhas de campo como retas paralelas, na mesma direção e no mesmo sentido do vetor campo elétrico.

Caso dois pontos desse campo tenham o mesmo potencial elétrico, o trabalho para deslocar uma carga elétrica entre eles será nulo – o trabalho é diretamente proporcional à ddp –, o que implica o vetor força e o vetor deslocamento da carga serem perpendiculares. Assim, as superfícies equipotenciais devem formar ângulos de 90° com as linhas de campo. Se esse campo elétrico for uniforme, formam planos paralelos entre si e perpendiculares às linhas (**figura 4.27**).

Além disso, quando uma carga é abandonada em um campo elétrico, entra em movimento sob a ação exclusiva da força elétrica, ocorre um movimento espontâneo. Nesse tipo de movimento, o trabalho da força elétrica é sempre positivo (trabalho motor). Vamos agora analisar duas situações.

1ª) Na situação em que a carga elétrica é positiva, temos: $q > 0$ e $\tau > 0$.

Como $\tau = q(V_{\text{inicial}} - V_{\text{final}})$, então: $V_{\text{inicial}} > V_{\text{final}}$

2ª) Quando a carga de prova é negativa, temos: $q < 0$ e $\tau > 0$.

Como $\tau = q(V_{\text{inicial}} - V_{\text{final}})$, então: $V_{\text{inicial}} < V_{\text{final}}$

Em relação ao movimento espontâneo de cargas elétricas em um campo elétrico, concluímos que: cargas elétricas positivas movimentam-se dos pontos de maior para os de menor potencial elétrico e que cargas elétricas negativas movimentam-se dos pontos de menor para os de maior potencial elétrico.

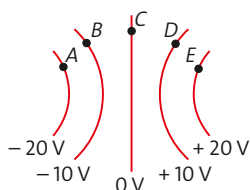
Essas conclusões nos permitem afirmar que o sentido do campo elétrico é sempre do maior para o menor potencial.



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

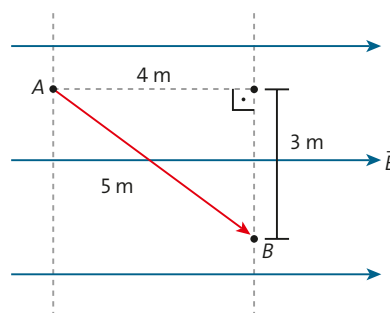
Exercícios

18. A figura ilustra as superfícies equipotenciais de um dado campo elétrico.



- Qual é o trabalho da força elétrica para deslocar uma carga de prova de $2,0 \mu\text{C}$ do ponto A até o ponto B? $\tau = -2 \cdot 10^{-5} \text{ J}$
- Sabendo que os pontos A, B, C, D e E contêm uma linha de campo, faça o esquema dessa linha, indicando seu sentido.

19. A figura representa uma carga de prova deslocando-se entre dois pontos de um campo elétrico uniforme. A intensidade do campo elétrico é de 120 V/m . Qual é a ddp entre os pontos A e B? $U = 480 \text{ V}$



Ver resposta no Manual do Professor.



Eletricidade estática e manuseio de equipamentos

Não podemos ver a eletricidade estática, mas ela está presente no nosso dia a dia e danifica componentes eletrônicos. Para evitar esse tipo de problema, os fabricantes fixam etiquetas que advertem sobre os cuidados a serem tomados.

As embalagens utilizadas no armazenamento de memórias de computador trazem as inscrições das figuras ao lado.

Nosso corpo acumula eletricidade estática à medida que andamos, sentamos em uma cadeira, retiramos um casaco, abrimos uma porta ou mesmo quando tocamos em outro material já carregado com eletricidade estática. Ao manusear um componente eletrônico, as cargas estáticas são transferidas rapidamente para esse componente, uma espécie de “choque” de baixíssima corrente, mas o suficiente para danificar parcial ou totalmente os circuitos internos dos *chips*. Esses *chips* podem danificar-se imediatamente, ou ficar parcialmente danificados, passando a exibir erros intermitentes, ficando sensíveis à temperatura e chegando até mesmo a queimar sozinhos depois de algum tempo.



Embalagem de HD.



Embalagem de memória RAM.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.

Após a leitura do texto, faça o que se pede a seguir:

1. Ao tocarmos um circuito eletrônico podemos danificá-lo porque:

- a) a umidade das nossas mãos aumenta o número de elétrons no circuito.
- b) nossas mãos podem estar magnetizadas.
- c) nossas mãos estão contaminadas com vírus.
- d) a eletricidade estática acumulada em nossas mãos danifica o circuito.
- e) os circuitos eletrônicos sofrem quebras mecânicas sob o contato com nossas mãos.

2. Indique a afirmativa correta.

- a) Ao tocarmos um circuito eletrônico produzimos uma alta corrente.
- b) Ao tocarmos um circuito eletrônico produzimos uma baixa corrente.
- c) O atrito de nossas mãos com os circuitos eletrônicos torna visível a eletricidade estática.
- d) *Chips* são muito resistentes a altas temperaturas.
- e) Sujeira e impurezas de nossas mãos produzem correntes elétricas nos *chips*.



Robert Andrews Millikan

Robert Andrews Millikan nasceu em 22 de março de 1868 na cidade de Morrison, Illinois, Estados Unidos, e faleceu em San Marino, Califórnia, em dezembro de 1953. Segundo filho do reverendo Silas Franklin Millikan e de Mary Jane Andrews, descendia de uma família que chegou aos Estados Unidos em 1750 e estava entre os pioneiros do Meio-Oeste.

Millikan frequentou o Colégio Maquoketa, em Iowa, e, depois de trabalhar como repórter por um curto período, ingressou em 1886 na Faculdade Oberlin, em Ohio. Durante sua graduação suas disciplinas prediletas eram Grego e Matemática. No entanto, depois de formar-se em 1891, lecionou Física por dois anos.

Foi nesse período que desenvolveu seu interesse por essa área de estudo e, em 1893, depois de concluir seu mestrado em Física, foi indicado para a Universidade de Columbia, em Nova York. Em 1895, recebeu seu título de Ph.D. por sua pesquisa sobre a polarização da luz emitida por superfícies incandescentes. Instigado por seus professores, ele viveu um ano na Alemanha (entre 1895 e 1896), na Universidade de Berlim e na Universidade de Göttingen.

A convite de Albert Abraham Michelson (1852-1931), retornou aos Estados Unidos em 1896 para ser assistente do recém-criado Laboratório de Física Ryerson, da Universidade de Chicago. Millikan era um eminente professor e conquistou a cátedra em 1910, posição que conservou até 1921, quando deixou a Universidade de Chicago para assumir o Laboratório de Física Norman Bridge, do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), em Pasadena. Ainda durante sua atuação em Chicago, escreveu livros-texto para o ensino de Física.

Como cientista, Millikan foi responsável por grandes descobertas nos ramos da Eletricidade, da Óptica e da Física Molecular. Seu primeiro grande sucesso foi a determinação precisa da carga elementar usando o método da gota de óleo. Em 1910, ele provou ainda que essa quantidade era a mesma para todos os elétrons, demonstrando, assim, a estrutura atômica da Eletricidade.

Posteriormente, entre 1912 e 1915, verificou experimentalmente a equação de Albert Einstein (1879-1955) para o efeito fotoelétrico, determinando a constante de Max Planck (1858-1947). Além disso, seus estudos sobre movimentos aleatórios em gases colocaram em oposição as teorias atômica e cinética da matéria.

Entre 1920 e 1923, Millikan dedicou-se à espectroscopia dos elementos, estendendo os limites do espectro ultravioleta para além dos então conhecidos. A descoberta da lei de movimento de uma partícula caindo sobre a Terra após entrar na atmosfera, em conjunto com suas investigações de fenômenos elétricos, levou-o ao estudo das radiações cósmicas. Durante toda a vida, Millikan foi um profícuo autor de trabalhos científicos para um grande número de periódicos. Além de grande cientista, ele tinha muito interesse por questões religiosas e filosóficas. Em 1923, seu trabalho foi reconhecido com o Prêmio Nobel de Física.



Retrato de Robert Andrews Millikan (1868-1953).

Album / akg-images/Latinstock

Fontes de dados: Encyclopædia Britannica; Nobel Prize. Disponíveis em: <www.britannica.com/biography/Robert-Millikan>; <www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1923/millikan-bio.html>. Acesso em: 14 jan. 2016.

Experimento



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

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



Atração e repulsão elétrica

Nesta atividade prática, você poderá constatar a atração e a repulsão elétricas entre corpos atritados.

Para isso, atrite vigorosamente um canudo de plástico (A) em um pedaço de papel e faça a montagem conforme mostra a figura a. Você vai observar que o papel atritado atrai a parte atritada do canudo. Como você explica esse fato?

Em seguida, atrite um segundo canudo de plástico (B) com outro pedaço de papel e aproxime, sem contato, do primeiro canudo (A). Você vai observar uma repulsão entre eles, conforme mostra a figura b. Como você explica esse fato?

Figura a:

Força elétrica entre um canudo (A) e um pedaço de papel.

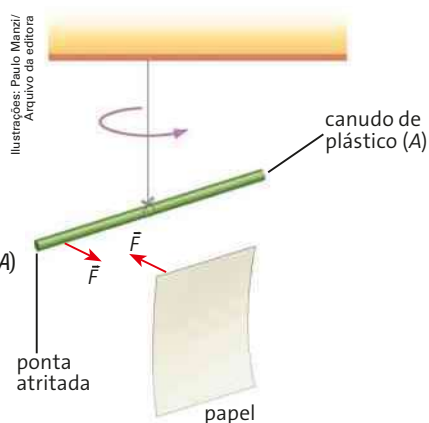
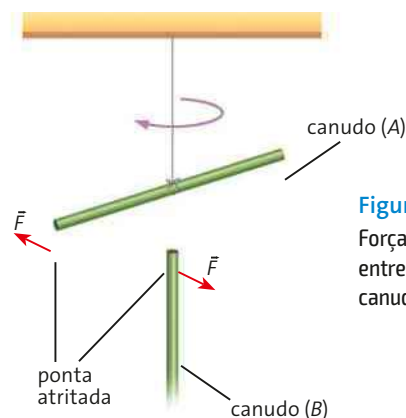


Figura b:

Força elétrica entre dois canudos (A e B).



Refaça esses experimentos com outros materiais e verifique se é possível colocá-los em uma série triboelétrica.

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

Retomando

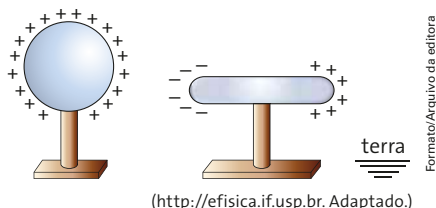
20. (Unesp-SP) Um dispositivo simples capaz de detectar se um corpo está ou não eletrizado é o pêndulo eletrostático, que pode ser feito com uma pequena esfera condutora suspensa por um fio fino e isolante. Um aluno, ao aproximar um bastão eletrizado do pêndulo, observou que ele foi repelido (etapa I). O aluno segurou a esfera do pêndulo com suas mãos, descarregando-a e, então, ao aproximar novamente o bastão, eletrizado com a mesma carga inicial, percebeu que o pêndulo foi atraído (etapa II). Após tocar o bastão, o pêndulo voltou a sofrer repulsão (etapa III). A partir dessas informações, considere as seguintes possibilidades para a carga elétrica presente na esfera do pêndulo:

Possibilidade	Etapa I	Etapa II	Etapa III
1	Neutra	Negativa	Neutra
2	Positiva	Neutra	Positiva
3	Negativa	Positiva	Negativa
4	Positiva	Negativa	Negativa
5	Negativa	Neutra	Negativa

Somente pode ser considerado verdadeiro o descrito nas possibilidades:

- a) 1 e 3. c) 2 e 4. x e) 2 e 5.
b) 1 e 2. d) 4 e 5.

- 21.** (Vunesp-SP) Indução eletrostática é o fenômeno no qual se pode provocar a separação de cargas em um corpo neutro pela aproximação de um outro já eletrizado. O condutor que está eletrizado é chamado indutor e o condutor no qual a separação de cargas ocorreu é chamado induzido. A figura mostra uma esfera condutora indutora positivamente eletrizada induzindo a separação de cargas em um condutor inicialmente neutro.



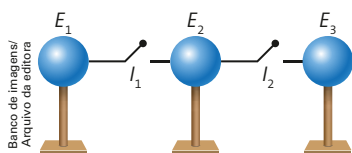
(<http://efisica.if.usp.br>. Adaptado.)

Analizando a figura e sobre o processo de eletrização por indução, são feitas as seguintes afirmações:

- I. Para eletrizar o corpo neutro por indução, deve-se aproximar o indutor, conectar o induzido à terra, cortar o fio terra e, finalmente, afastar o indutor.
- II. Para eletrizar o corpo neutro por indução, deve-se aproximar o indutor, conectar o induzido à terra, afastar o indutor e, finalmente, cortar o fio terra.
- III. Na situação da figura, a conexão do induzido à terra, com o indutor nas suas proximidades, faz com que prótons do induzido escoem para a terra, por repulsão.
- IV. No final do processo de eletrização por indução, o corpo inicialmente neutro e que sofreu indução adquire carga de sinal negativo.

Está correto, apenas, o contido em:

- a) II. x c) I e IV. e) II, III e IV.
b) I e III. d) II e IV.
- 22.** (UFSJ-MG) Suponha que três esferas metálicas de mesmo diâmetro, E_1 , E_2 e E_3 , estejam montadas em suportes isolantes em um ambiente que contém vácuo. As esferas estão ligadas entre si por fios de resistência desprezível, contendo interruptores I_1 e I_2 que conectam E_1 a E_2 e E_2 a E_3 , respectivamente, conforme a figura abaixo. Os interruptores I_1 e I_2 estão inicialmente desligados.



Antes de se realizar a experiência descrita a seguir, E_1 e E_3 têm cargas iguais, de valor Q , e E_2 está descarregada. São realizados dois processos, na sequência abaixo:

- I. I_1 é ligado até que E_1 e E_2 fiquem em equilíbrio eletrostático. A seguir, I_1 é desligado.
- II. I_2 é ligado até que E_2 e E_3 fiquem em equilíbrio eletrostático. A seguir, I_2 é desligado.

Após essas duas operações, as cargas em E_1 , E_2 e E_3 serão de:

- a) $\frac{Q}{2}$, $\frac{Q}{4}$ e $\frac{Q}{4}$.
x b) $\frac{Q}{2}$, $\frac{3Q}{4}$ e $\frac{3Q}{4}$.
c) Q , 0 e Q .
d) $\frac{2Q}{3}$, $\frac{2Q}{3}$ e $\frac{2Q}{3}$.

- 23.** (UFU-MG) Uma pessoa, durante o processo de inflar um balão de festa, produz atrito entre o balão e o tecido de lã de sua roupa. Depois do balão cheio, a pessoa observa que ele é atraído por sua mão, mas repellido por um segundo balão inflado de modo similar.

Quais são, respectivamente, as cargas do primeiro balão, da mão da pessoa e do segundo balão?

- a) Positivo, positivo, positivo.
x b) Negativo, neutro, negativo.
c) Negativo, positivo, positivo.
d) Positivo, neutro, negativo.
- 24.** (UCS-RS) Um dos sistemas de proteção residencial mais usados hoje são as cercas de alta tensão. O modelo urbano comum é constituído basicamente de fios condutores paralelos e sem contato condutor entre si, dispostos ao longo da parte superior de um muro. Suponha, por simplicidade, um sistema com 3 fios equipotenciais. O fio inferior representa uma linha equipotencial de 0 V , o fio do meio uma linha equipotencial de 110 V , e o fio de cima uma linha equipotencial de 2000 V . Nessas condições, uma pessoa que, graças à sua vestimenta e procedimentos, está em isolamento perfeito com a terra, ao tentar atravessar o muro, tomará choque quando encostar:
- a) somente uma das mãos no fio de 0 V .
b) somente uma das mãos no fio de 2000 V .
c) as duas mãos no fio de 110 V .
d) as duas mãos no fio de 2000 V .
x e) simultaneamente em quaisquer dois fios.

Cargas elétricas em condutores

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

Edilson Dantas/Folhapress

Tempestade em
São Paulo (SP), 2015.

Relâmpagos podem ser definidos como correntes elétricas?
Que tipos de partículas eletrizadas livres existem na atmosfera terrestre?



Propriedades gerais dos condutores em equilíbrio eletrostático

No capítulo 4, discutimos problemas relativos aos campos elétricos criados por cargas puntiformes, isto é, corpos eletrizados que possuem dimensões geométricas pequenas em relação às distâncias envolvidas. Entretanto, na prática nos deparamos com corpos eletrizados extensos, como nuvens, para-raios e os mais diversos tipos de objeto.

Entender como esses objetos criam campos elétricos e como esses campos atuam sobre outros corpos permite a prevenção de uma grande variedade de possíveis acidentes, principalmente em tempestades acompanhadas de descargas elétricas entre as nuvens e o solo (**figura 5.1**).

Figura 5.1 Formação de uma descarga elétrica atmosférica.



Tempo = 0

A ponta de um líder escalonado de um raio aparece no canto superior esquerdo da imagem de vídeo.



Tempo = 1 ms

Podemos perceber no lado direito da imagem outra ponta deste líder.



Tempo = 3 ms

As duas pontas têm uma mesma origem na nuvem de tempestade, que não aparece na imagem.



Tempo = 4 ms

Elas buscam no seu movimento descendente um ponto de contato com o solo.



Tempo = 5 ms

A ramificação esquerda leva a dianteira e está prestes a completar o caminho da descarga.



Tempo = 6 ms

A ramificação esquerda completa o caminho entre a nuvem e o solo. Toda a corrente elétrica é transmitida por ela e muita luz é produzida neste momento.



Tempo = 7 ms

A corrente elétrica diminui e o canal do raio vai aos poucos perdendo a sua luminosidade.

Fotos: Reprodução/Marcelo Saba/INPE

Os corpos constituídos de material condutor metálico, em estado neutro e não ligados a uma diferença de potencial, possuem, em sua estrutura, um grande número de elétrons, que são chamados de elétrons livres e se encontram em movimento macroscopicamente desordenado ao longo de todo o corpo (figura 5.2).

Quando eletrizamos um condutor metálico, por exemplo, com uma carga positiva, atritando uma região determinada com outro corpo, provocamos uma situação de desequilíbrio eletrostático no condutor, pois os elétrons livres tenderão, instantaneamente, a movimentar-se no sentido das cargas positivas (figura 5.3).

O intervalo de tempo que esse movimento ocorre é muito curto e o novo equilíbrio eletrostático é rapidamente estabelecido, com as cargas positivas geradas pelo atrito espalhadas pela superfície externa. Nessas condições, os elétrons livres do corpo voltam a movimentar-se desordenadamente (figura 5.4).

Dizemos, então, que um corpo condutor eletrizado está em equilíbrio eletrostático quando o movimento de seus elétrons livres é desordenado; nessas condições, toda carga elétrica provida distribui-se por sua superfície externa.

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

Figura 5.2 Movimento dos elétrons livres de um corpo sem que ele esteja submetido a uma ddp .



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 5.3
Movimento dos elétrons livres de um corpo eletrizado.

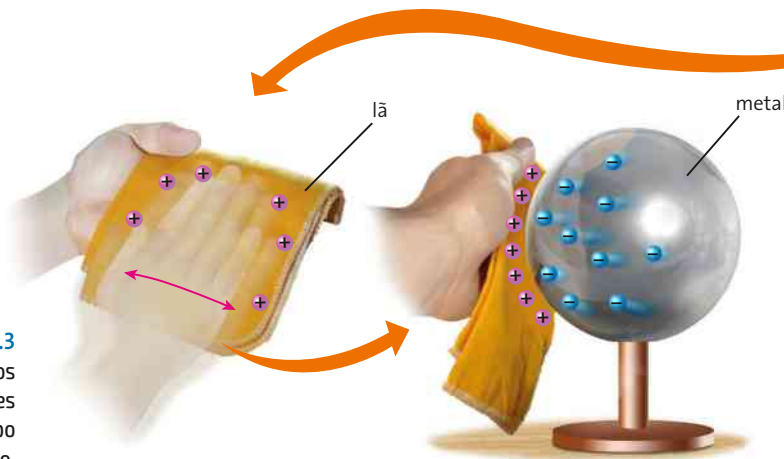
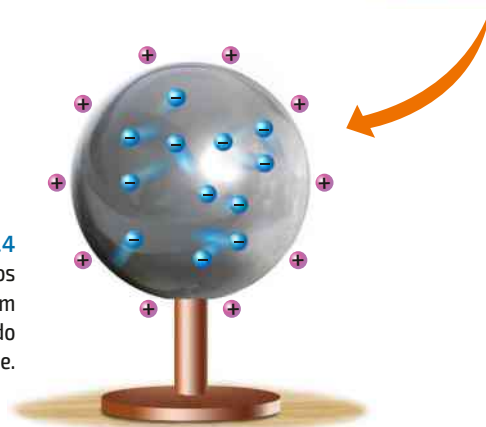


Figura 5.4
Movimento dos elétrons livres de um corpo eletrizado positivamente.



Peter Menzel/SP/Latinstock



Figura 5.5 Pessoa no interior de uma gaiola de Faraday, que é submetida a descargas elétricas provocadas por geradores eletrostáticos. Repare que a pessoa não é atingida por nenhuma descarga elétrica.

O fato de não ocorrer movimento ordenado dos elétrons livres em um condutor eletrizado em equilíbrio eletrostático implica que o campo elétrico em seu interior é nulo. Se assim não fosse, o campo elétrico produziria forças de natureza elétrica que ordenariam o movimento dos elétrons.

Essa propriedade explica a blindagem eletrostática – popularmente conhecida como efeito gaiola de Faraday (figura 5.5) –, isto é, o fato de corpos no interior de condutores não sofrerem ações elétricas.



Antonio Robison/Arquivo da editora

Figura 5.6 O carro funciona como uma gaiola de Faraday em uma tempestade.

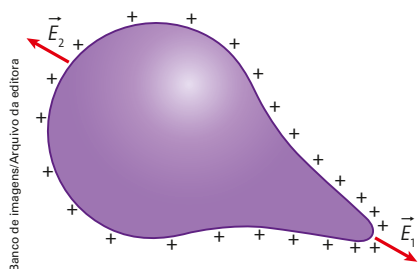


Figura 5.7 Campo elétrico em um condutor eletrizado.

Uma consequência intrigante da blindagem eletrostática é que passageiros no interior de um carro, em uma tempestade, não são atingidos por raios (**figura 5.6**).

Como o movimento dos elétrons livres é desordenado, não há corrente elétrica e, portanto, não há diferença de potencial entre os pontos do condutor eletrizado em equilíbrio eletrostático. Isto é, todos os seus pontos têm o mesmo potencial elétrico.

Usando uma linguagem um pouco mais formal: como todos os pontos da superfície de um condutor eletrizado em equilíbrio eletrostático têm o mesmo potencial elétrico, ela é uma superfície equipotencial. Portanto, em seus pontos, o vetor campo elétrico é perpendicular à superfície (**figura 5.7**).

Resumindo, em um condutor eletrizado em equilíbrio eletrostático, seja maciço ou oco:

- o campo elétrico no interior é nulo;
- o potencial elétrico de todos os pontos, interior e superfície, é o mesmo;
- o campo elétrico na superfície é perpendicular à superfície.

Física explica



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

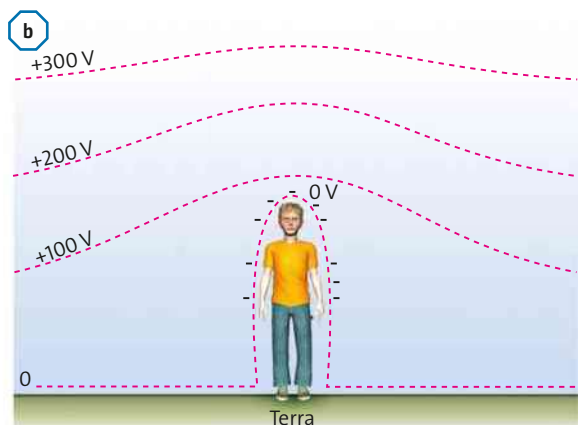


Num dia comum no deserto plano do interior, ou sobre o mar, conforme se sobe a partir da superfície da Terra, o potencial elétrico aumenta aproximadamente 100 volts por metro. Portanto, existe um campo elétrico vertical $\vec{E}$ de 100 V/m no ar. Isso significa que ao ar livre o potencial à altura do seu nariz é 200 volts acima do potencial à altura dos seus pés! Você pode perguntar: "Por que simplesmente não fixamos no ar um par de eletrodos, separados por uma distância de um metro, e usamos esses 100 V para alimentar nossas lâmpadas elétricas?"

Resposta: Seu corpo é um condutor relativamente bom. Se você estiver em contato com a Terra, você e a Terra tenderão a formar superfícies equipotenciais. Normalmente, as equipotenciais são paralelas à superfície, como mostrado na **figura a**, mas quando você está presente, as equipotenciais são distorcidas, e o campo aparece como algo mostrado na **figura b**.



Distribuição de potencial sobre a Terra.



Distribuição de potencial próximo a um homem num lugar plano e aberto.

Ilustrações: Paulo Manz/Arquivo da editora

Então, você continuará tendo uma diferença de potencial praticamente nula entre a cabeça e os pés.

FEYNMAN, Richard; LEIGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew. *Lições de Física*. Porto Alegre: Bookman, 2008. v. II, p. 9-11.

Uma consequência importante dessas propriedades é que a carga elétrica, ao distribuir-se pela superfície de um condutor, fica mais concentrada nas regiões pontiagudas, criando nelas campos elétricos mais intensos (**figura 5.8**). Esse fenômeno é conhecido como **poder das pontas** e pode ser comprovado experimentalmente pela experiência do sopro elétrico (**figura 5.9**). O conhecimento desse fenômeno é fundamental para a construção dos para-raios (**figura 5.10**).

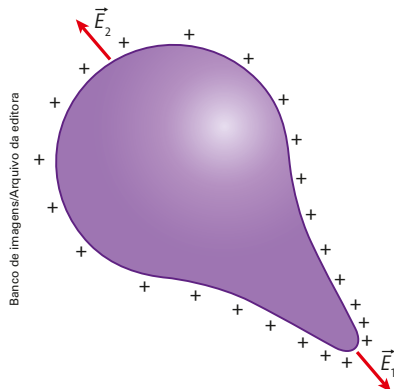


Figura 5.8
Distribuição de carga elétrica na superfície de um condutor.

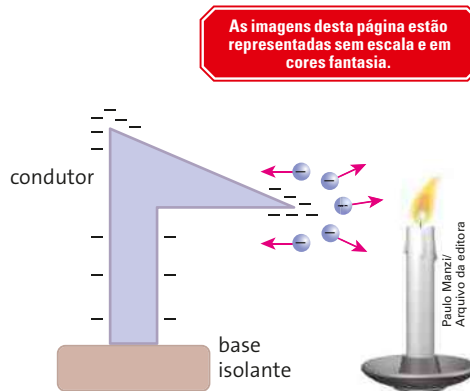


Figura 5.9 No sopro elétrico vemos o balanço da chama de uma vela, provocado pela aproximação de um corpo pontiagudo eletrizado.



Figura 5.10 O funcionamento de um para-raios, assim como a atração que objetos altos oferecem a raios, são explicados pelo poder das pontas em condutores.

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

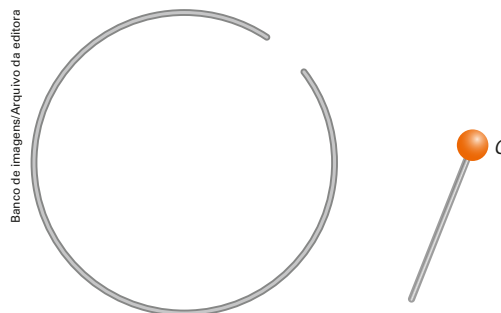
Florida Images/Alamy/Other Images

Exercícios

ATENÇÃO!
Não escreva no seu livro!

- Classifique em **verdadeira** ou **falsa** cada uma das sentenças seguintes relativas à superfície de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático.
 - A direção do vetor campo elétrico é normal à superfície em cada ponto. **Verdadeira.**
 - O trabalho para mover uma carga elétrica ao longo da superfície é independente da intensidade do campo, supondo-se que se mantenha o equilíbrio eletrostático. **Verdadeira.**
 - Ela não é equipotencial. **Falsa.**
 - Existem linhas de campo ligando dois pontos dessa superfície. **Falsa.**
- Uma pessoa no interior de um carro não é atingida por raios em uma tempestade porque:
 - está neutra.
 - não possui elétrons livres.
 - o volante do carro é isolante.
 - ☒ o campo elétrico no interior do carro é nulo.
 - a corrente elétrica não é capaz de percorrer o corpo humano.
- Em uma tempestade, devemos evitar ficar embaixo de árvores em razão do fenômeno físico:
 - gaiola de Faraday.
 - ☒ poder das pontas.
 - refração atmosférica.
 - efeito alavanca.
 - anomalia da água.

- Na figura temos uma esfera oca de alumínio e um bastão com uma pequena esfera na ponta, também de alumínio. A esfera oca está neutra e a do bastão está eletrizada com carga Q positiva.



Você pretende eletrizar a esfera oca usando a carga Q do bastão. Haverá diferença entre fazer o contato da esferinha externa ou internamente com a esfera oca? **Não.**

- Uma peça metálica maciça é eletrizada com uma carga elétrica de $-10 \mu\text{C}$. Considerando-se que A e B são dois pontos do interior da peça, sabe-se que, na situação de equilíbrio, o potencial elétrico do ponto A é -30 V . Nessas condições, determine:
 - a intensidade do vetor campo elétrico no ponto A ;
 - o potencial elétrico no ponto B . **$V = -30 \text{ V}$**

5. a) O vetor campo elétrico é nulo.



Sciencephotos/Alamy/Other Images

Veja orientações e sugestões de encaminhamento deste tópico no Manual do Professor.

2 Condutor esférico eletrizado

Ao considerarmos os corpos condutores em equilíbrio eletrostático como objeto de nosso estudo, percebemos que eles podem ter as mais diversas formas e os campos elétricos criados por eles dependem disso. Uma forma geométrica importante, dada sua simetria, é a esférica, que aparece, por exemplo, nos geradores eletrostáticos de Van de Graaff (**figura 5.11**).

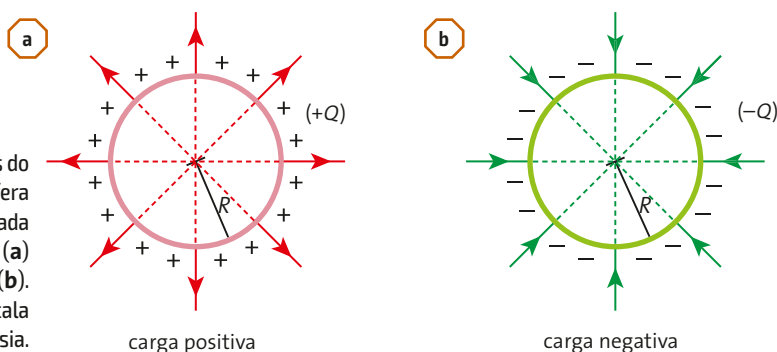
Ao examinarmos o campo elétrico criado por uma esfera condutora eletrizada, maciça ou oca, em equilíbrio eletrostático, constatamos as duas propriedades gerais já discutidas para o campo elétrico: campo nulo no interior da esfera e campo perpendicular à sua superfície (**figura 5.12**).

A observação das linhas de campo, a partir de pontos do exterior da esfera, indica seu cruzamento no centro, como se lá houvesse uma carga puntiforme. Assim, para pontos situados a distâncias do centro da esfera maiores do que o raio desta ($r > R$), isto é, situados no seu exterior, tudo se passa como se a carga dela fosse puntiforme e situada no seu centro (**figura 5.12**).

Assim, a intensidade do vetor campo elétrico (E), devido a uma esfera carregada para pontos do seu exterior, é dada por:

$$E = \frac{k \cdot |Q|}{r^2}$$

Figura 5.12 Propriedades do campo elétrico em uma esfera condutora carregada positivamente (a) e negativamente (b). Representação sem escala e em cores fantasia.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Exercícios



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

6. Uma esfera de cobre isolada possui raio de 30 cm. Ela está imersa no vácuo, em equilíbrio eletrostático, eletrizada com carga de $-2,0 \mu\text{C}$.
 - a) Qual é a intensidade do campo elétrico no interior da esfera? $E = 0$
 - b) Qual é a quantidade de carga no interior da esfera? $Q = 0$
7. Em relação à questão anterior, responda.
 - a) Haverá alguma diferença nas respostas anteriores caso a esfera seja oca ou maciça? Não.
 - b) Qual é a intensidade do vetor campo elétrico em um ponto a 50 cm do centro da esfera?
8. Uma esfera condutora isolada e imersa no vácuo está eletrizada com uma carga de $-3 \mu\text{C}$. No seu caderno, esboce as linhas de força do campo elétrico criado por ela. [Ver resposta no Manual do Professor.](#)
9. Dois pontos A e B situam-se sobre a superfície de uma esfera metálica oca de 3 cm de raio, eletrizada com $-2 \mu\text{C}$ e situada no vácuo. Um pequeno corpúsculo de $-0,5 \mu\text{C}$ é deslocado entre A e B. Determine o trabalho das forças elétricas nesse trajeto. $\tau = 0$
10. Em relação ao problema anterior, determine a intensidade do vetor campo elétrico a 5 cm do centro da esfera.

$$E = 7,2 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

$$E = 7,2 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

3 Indução eletrostática e condensação de cargas

Todos nós já passamos pela desagradável experiência de tomar pequenos choques elétricos ao tocarmos maçanetas de portas ou outros objetos metálicos em dias secos. A explicação para esse fenômeno reside no fato de que, nos dias secos, o ar está mais isolante e, portanto, as cargas estáticas geradas acumulam-se nos diversos objetos.

Quando tocamos esses objetos eletrizados, nosso corpo proporciona um meio condutor, por onde essa carga se movimenta. A energia potencial elétrica armazenada no corpo eletrizado é transferida ao nosso corpo.

Essa energia, se convenientemente armazenada, pode ser útil em diversas situações. Se for manipulada adequadamente, pode ser compartilhada entre as diversas partes de um circuito elétrico.

Para melhor entendermos os dispositivos capazes de armazenar energia potencial eletrostática, vamos retomar a descrição do fenômeno da indução eletrostática, seguindo uma linha de raciocínio que utiliza o conceito de potencial elétrico.

Para tanto, vamos considerar um condutor B , que chamaremos de indutor, eletrizado positivamente. A carga elétrica $+Q$ do condutor B , distribuída por sua superfície externa, cria um campo elétrico que é nulo no seu interior e se direciona para fora dele, nos pontos do seu exterior (figura 5.13).

Podemos interpretar essa situação dizendo que o potencial elétrico para todos os pontos de B é o mesmo. Ao se dirigir para o exterior de B , esse potencial diminui no sentido do campo, conforme mostra o gráfico 1 da figura 5.14.

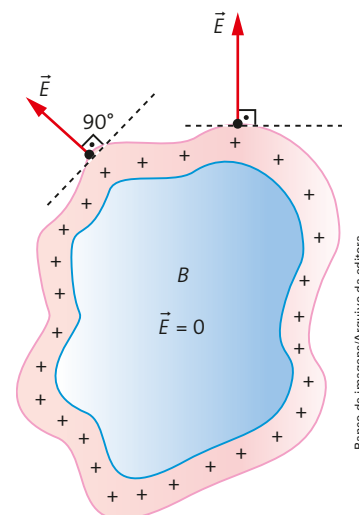
Ao aproximarmos de B um condutor A inicialmente neutro, que chamaremos de induzido, a região de A próxima de B terá potencial elétrico V_1 , maior do que V_2 , da região mais distante. É essa diferença de potencial que movimenta os elétrons livres de A para a região próxima de B , deixando uma carga positiva na região distante.

O equilíbrio eletrostático se restabelece quando o potencial elétrico de A fica constante e igual a V_3 , valor intermediário entre V_1 e V_2 , em todos os seus pontos (gráfico 2 da figura 5.14). Nessas condições, na região de A próxima de B estabelece-se uma carga negativa Q_p e, na região distante, uma positiva Q_d , ambas de mesmo módulo, pois A estava inicialmente neutro.

Essa nova distribuição de cargas em A produz a diminuição do potencial elétrico de B para V_5 (gráfico 2 da figura 5.14) e a mudança na distribuição de cargas de B . Embora B continue com a mesma carga $+Q$, sua região mais próxima de A terá maior concentração.

A mudança de concentração de cargas em B recebe o nome de condensação de cargas e será tão mais acentuada quanto maiores forem os módulos de Q_p e Q_d .

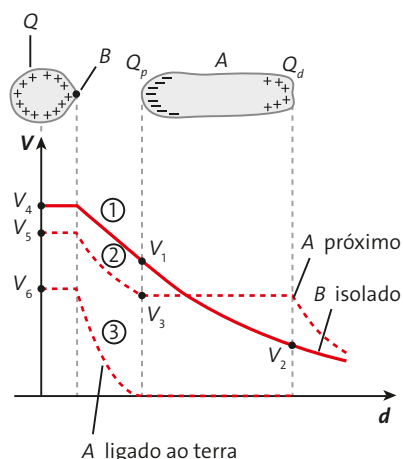
Como os módulos máximos de Q_p e Q_d são iguais a Q , a máxima condensação ocorrerá quando a indução for total, isto é, quando todas as linhas de campo do indutor passarem pelo induzido.



Banco de Imagens/Arquivo da editora

Figura 5.13 Representação (sem escala e em cores fantasia) de um campo elétrico em um indutor eletrizado positivamente.

Potencial elétrico



Banco de Imagens/Arquivo da editora

Figura 5.14 Potencial elétrico para o ponto do indutor B .

Com a finalidade de tornar a condensação de cargas ainda mais acentuada, vamos ligar o induzido à Terra, isto é, reduzir seu potencial elétrico a zero. Essa redução, V_3 , faz com que os elétrons vão da Terra para o corpo A, equilibrando a carga Q_d .

Na nova situação de equilíbrio eletrostático, A terá potencial elétrico nulo e B terá seu potencial elétrico ainda mais reduzido, V_6 , e as cargas em B estarão ainda mais condensadas.

Chega-se, então, à ideia de condensador ideal (capacitor): dois condutores, separados por um isolante, com possibilidade de indução total e com o induzido ligado à Terra. A **figura 5.15** exemplifica os dois casos mais comuns de capacitores: o plano e o esférico.

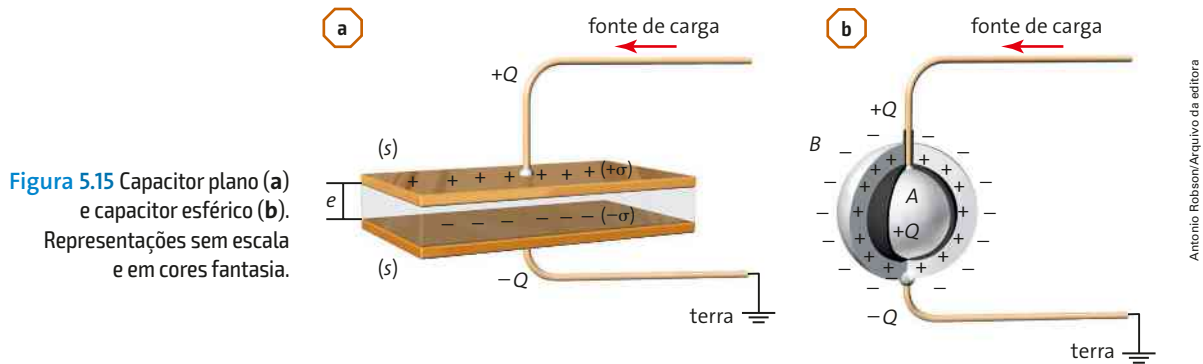


Figura 5.15 Capacitor plano (a) e capacitor esférico (b). Representações sem escala e em cores fantasia.

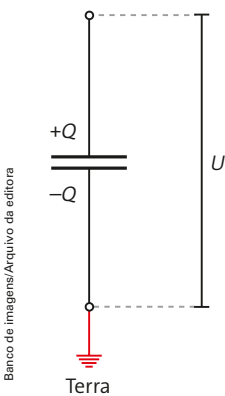


Figura 5.16 Representação esquemática de um capacitor eletrostático.

Vamos estabelecer a seguinte notação: como a carga da parte indutora de um capacitor é $+Q$ e a da parte induzida é $-Q$, chamamos de Q a carga do capacitor. Além disso, a diferença de potencial entre os corpos condutores é $U = V_a - V_b$.

Quanto maior a ddp U de um capacitor, maior sua carga Q . Define-se capacidade eletrostática, ou capacitância, de um capacitor como:

$$C = \frac{Q}{U}$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a capacidade eletrostática é medida em coulomb (C)/volt (V). Em uma das várias homenagens prestadas a Michael Faraday (1791-1867) ao longo da história da Eletricidade, essa unidade recebeu o nome de farad (F).

Embora seja a unidade oficial de capacidade eletrostática, o farad (F) é muito grande e seus submúltiplos mais utilizados são:

- milifarad (mF) = 10^{-3} F;
- microfarad (μ F) = 10^{-6} F;
- nanofarad (nF) = 10^{-9} F;
- picofarad (pF) = 10^{-12} F.

Qualquer que seja o tipo de capacitor, seu símbolo é representado como mostra a **figura 5.16**. Os capacitores são componentes bastante úteis, na prática, e aparecem sob os mais diversos tipos de encapsulamentos (**figura 5.17**).

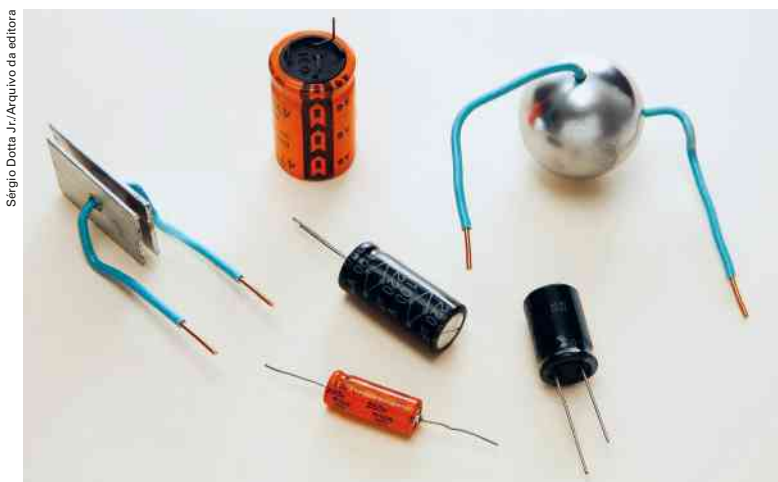


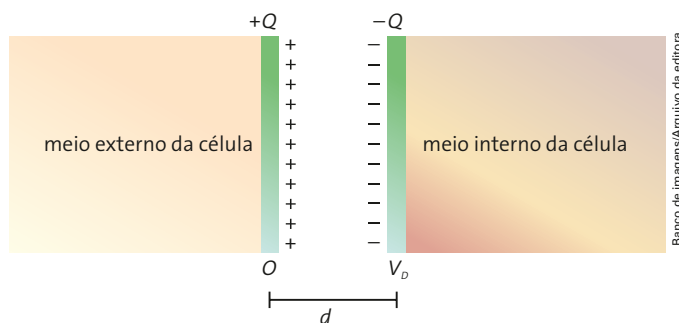
Figura 5.17 Formatos mais comuns de capacitores.

11. O capacitor da foto tem uma indicação de capacitância de $1\,000\,\mu\text{F}$.



Andrew Lambert Photography/SPLatinstock

- a) Converta a capacitância dele para farad (F). $C = 1,0 \cdot 10^{-3}\,\text{F}$
 b) Supondo que esse capacitor esteja ligado a uma bateria de 12 V, calcule a carga armazenada. $Q = 1,2 \cdot 10^{-2}\,\text{C}$
12. Quando um capacitor de $10\,\mu\text{F}$ é conectado a uma fonte de 100 V, qual é a carga adquirida por ele? $Q = 1,0 \cdot 10^{-3}\,\text{C}$
13. De maneira simplificada, considere que a descarga elétrica entre duas nuvens, separadas por 150 m, forma as placas de um capacitor plano de capacitância $1,0 \cdot 10^{-8}\,\text{F}$. Sabendo que o campo elétrico entre as nuvens atinge a intensidade de $3 \cdot 10^6\,\text{V/m}$ provocando a descarga elétrica, responda.
 a) Qual é a ddp entre as nuvens no instante da descarga? $U = 4,5 \cdot 10^8\,\text{V}$
 b) Qual é a carga das nuvens no instante da descarga? $Q = 4,5\,\text{C}$
14. Considere um capacitor que, submetido a uma ddp de 100 V, armazenou uma carga de $10\,\mu\text{C}$.
 a) Calcule sua capacitância. $C = 1,0 \cdot 10^{-7}\,\text{F}$
 b) Trace o gráfico da carga armazenada em função da ddp. [Ver resposta no Manual do Professor.](#)
15. Para um capacitor de $1\,\mu\text{F}$ com terminais submetidos a uma ddp de 8 V:
 a) calcule a carga armazenada; $Q = 8\,\mu\text{C}$
 b) no seu caderno, faça um esboço do capacitor, indicando a carga de cada placa. [Ver resposta no Manual do Professor.](#)
16. Em nossas células, as membranas que separam o meio intracelular e o extracelular podem ser entendidas como capacitores planos. Internamente ocorrem grandes concentrações iônicas de potássio ($-Q$) e, externamente, grandes concentrações iônicas de sódio ($+Q$), gerando uma diferença de potencial que varia entre $-40\,\text{mV}$ e $-80\,\text{mV}$. A espessura média d na membrana é, aproximadamente, $70\,\text{\AA}$ ($10^{-10}\,\text{m}$). Classifique as informações a seguir em **certo** e **errado**.



- I. Em uma diferença de potencial de $-70\,\text{mV}$, a intensidade do campo elétrico na membrana é de aproximadamente $10^7\,\text{V/m}$. **Certo.**
 II. Sendo a capacitância da membrana de $1,26 \cdot 10^{-3}\,\text{F}$ e a diferença de potencial de $-70\,\text{mV}$, a carga armazenada nela é de $8,82\,\mu\text{C}$. **Errado.**



Sob orientação do professor, discuta com os colegas de equipe algumas hipóteses que expliquem a origem dos raios.

Anotem no caderno as hipóteses levantadas durante a discussão. Depois, leiam o texto a seguir.



Fabian Ribeiro/Agência Freelancer/Folhapress

Tempestade em Santana do Livramento (RS), em 2015.

Origem das correntes atmosféricas

Devemos em seguida falar sobre a fonte da grande corrente negativa que deve fluir do “topo” para a superfície da Terra para mantê-la carregada negativamente. Onde estão as baterias que fazem isso? Elas são os temporais e seus relâmpagos. Verifica-se que os raios dos relâmpagos não “descarregam” o potencial de que estávamos falando (como você pode supor à primeira vista). A tempestade de relâmpagos carrega cargas negativas para a Terra. Quando um relâmpago cai, nove em dez vezes ele traz carga negativa para a Terra em grandes quantidades. São os temporais ao redor do mundo que estão carregando a Terra com uma média de 1800 ampères, que é então descarregada nas regiões de melhor tempo. Existem aproximadamente trezentos temporais por dia ao redor da Terra, e podemos pensar neles como baterias bombeando a eletricidade para as camadas superiores e mantendo a diferença de voltagem.

FEYNMAN, Richard; LEIGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew. *Lições de Física*. Porto Alegre: Bookman, 2009. v. II.

Comparem as hipóteses formuladas por vocês com os dados apresentados no texto lido. Depois, façam as atividades a seguir para sintetizar as ideias sobre correntes atmosféricas.

1. A Terra mantém sua carga negativa, pois:
 - a) em regiões de clima seco não há corrente elétrica.
 - b) as tempestades com relâmpagos trazem cargas negativas para nosso planeta.
 - c) o Sol impede que nosso planeta envie elétrons para a atmosfera.
 - d) o campo elétrico criado por nosso planeta é nulo.
 - e) o potencial elétrico da superfície de nosso planeta é igual ao da superfície dos outros planetas do Sistema Solar.
2. Considere um temporal de 15 minutos, com uma corrente de 1 800 A, transportando elétrons para a Terra. Sendo a carga elementar $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, determine:
 - a) a carga elétrica transportada para a Terra;
 - b) o número de elétrons correspondente.



Energia de um capacitor

Em nossos estudos de Eletrodinâmica, estamos considerando a situação de regime estacionário de corrente contínua, isto é, a situação em que a intensidade de corrente elétrica permanece constante ao longo do tempo. Nessas condições, o capacitor está contido em uma parte do circuito considerado como aberto. Para analisar o processo de carga de um capacitor quando ligado a uma bateria, considere a **figura 5.18**.

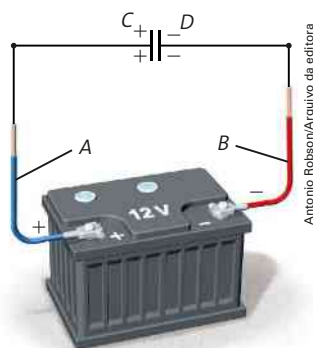


Figura 5.18 Esquema de um capacitor, inicialmente descarregado, ligado a uma bateria.

A imagem desta página está representada sem escala e em cores fantasia.

Inicialmente, a tensão nos polos da bateria é, por exemplo, 12 V, e entre as armaduras (placas) do capacitor, é nula. À medida que as armaduras são carregadas, o potencial do ponto C vai aumentando e o do ponto D, diminuindo. Estabelece-se, portanto, a diferença de potencial entre as armaduras do capacitor. Esse processo continua até que a tensão entre os terminais do capacitor seja igual à força eletromotriz da bateria.

O potencial V_A deveria ser igual ao V_C , assim como o V_B deveria ser igual ao V_D , pois esses pontos estão ligados por fios ideais. No entanto, a igualdade só existirá após um breve intervalo de tempo, chamado de transiente ou transitório, que é o tempo de carga do capacitor. Durante esse intervalo, há um deslocamento de cargas, sob uma diferença de potencial cada vez maior, até que a tensão no capacitor se iguale à *fem* da bateria, atingindo o chamado regime estacionário.

Os primeiros portadores de carga são transferidos de uma armadura a outra praticamente sem diferença de potencial, ao passo que os últimos sofrem o transporte sob tensão praticamente igual à força eletromotriz.

O trabalho da força elétrica para que se processe o deslocamento dos portadores de carga vai corresponder à energia potencial elétrica (E_p) armazenada no capacitor. Para uma certa quantidade de carga ΔQ , deslocada sob uma tensão U , o trabalho da força elétrica é:

$$\tau = \Delta Q \cdot U$$

Como a tensão U varia durante o processo de carga, pode-se calcular o trabalho usando como recurso a propriedade da área sob o gráfico (**figura 5.19**) de $U \times Q$:

$$\begin{cases} E_p = \tau \\ \tau = \text{Área} \end{cases} \Rightarrow E_p = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{Q^2}{2 \cdot C}$$

Observação:

Terminado o processo para carregar o capacitor, não há mais movimento ordenado de portadores de carga. O circuito entra em regime estacionário, e a intensidade da corrente elétrica torna-se nula.

Variação da tensão durante o processo de carga

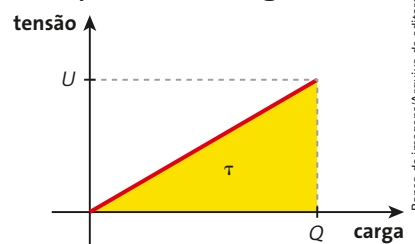
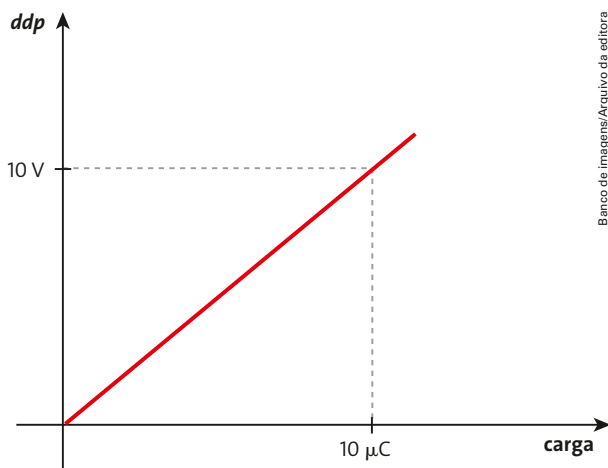


Figura 5.19 A área amarela no gráfico representa, numericamente, o trabalho da força elétrica no deslocamento dos portadores de carga.

Exercícios

17. Considerando o gráfico a seguir, determine o trabalho necessário para carregar um capacitor, inicialmente descarregado, até uma carga $q = 10 \mu\text{C}$. $W = 5 \cdot 10^{-5} \text{ J}$



18. Um capacitor de $10 \mu\text{F}$ foi conectado por um tempo muito longo a uma fonte de $12,0 \text{ V}$.
- Qual foi a energia potencial elétrica acumulada no capacitor? $W = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ J}$
 - Considerando que o capacitor carregado foi ligado a uma lâmpada de pequena resistência e que ficou praticamente descarregado após um intervalo de tempo Δt , qual foi o valor desse intervalo se a potência média enquanto a lâmpada se acendeu foi 72 W ? $\Delta t = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}$
 - Faça uma estimativa da resistência da lâmpada. $R = 0,5 \Omega$
19. Um capacitor de *flash* de uma máquina fotográfica tem capacidade 100 mF e é carregado completamente por uma pilha de $1,5 \text{ V}$. Calcule:
- a carga elétrica armazenada; $Q = 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ C}$
 - a energia potencial elétrica armazenada; $W = 1,125 \cdot 10^{-1} \text{ J}$
 - a potência fornecida pelo capacitor à lâmpada do *flash*, considerando-se que o capacitor descarrega em $0,5 \text{ s}$ quando é acionado. $P = 0,25 \text{ W}$
20. A capacitância entre duas nuvens, separadas por uma distância de 150 m e prontas para uma descarga elétrica, é de $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ F}$ e a quantidade de carga entre elas é de $4,5 \text{ C}$.
- Qual é a energia potencial elétrica acumulada? $E_p = 1,0 \cdot 10^9 \text{ J}$
 - Se toda essa energia for transformada em trabalho e não ocorrendo nenhum tipo de perda, qual é a força resultante nos portadores de carga? $F = 6,7 \cdot 10^6 \text{ N}$
 - Se a capacitância entre as nuvens é reduzida à metade e mantendo o valor de carga entre elas, o que ocorre com a energia potencial acumulada? Dobrará de valor.
 - Se o valor da carga é dobrado e a capacitância mantida constante, o que ocorre com o valor da energia potencial acumulada? Quadruplicará de valor.
21. (ITA-SP) O catálogo de uma fábrica de capacitores descreve um capacitor de 25 V de tensão de trabalho e capacitância de $22\,000 \mu\text{F}$. Se a energia armazenada nesse capacitor se descarrega em um motor, sem atrito, arranjado para levantar um tijolo de $0,5 \text{ kg}$ de massa, a altura alcançada pelo tijolo é:
- 1 km
 - 10 cm
 - $1,4 \text{ m}$
 - 20 m
 - 2 mm



Associações e circuitos com capacitores

Quando ligados aos circuitos elétricos, os capacitores funcionam como bipolos que armazenam energia elétrica em certos intervalos de tempo, disponibilizando-a para os outros bipolos em outros instantes.

É o caso do *flash* das lâmpadas fotográficas tradicionais: a pilha carrega o capacitor que, por sua vez, descarrega a energia adquirida na lâmpada.

Em projetos de engenharia, por exemplo, a quantidade de energia a ser utilizada e os valores de capacitância precisam ser calculados com precisão. Para esses cálculos, em muitos casos, são usadas associações de capacitores.

Associação de capacitores em série

Os três capacitores da [figura 5.20](#) estão associados em série.

A carga Q será deslocada da armadura esquerda de C_1 para a armadura direita de C_2 . As outras armaduras, seguindo o processo de indução total, também ficarão com carga de mesmo módulo. Tudo se passa como se houvesse um único capacitor com carga Q .

Observações:

- A tensão total é a soma das tensões parciais:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

- O capacitor equivalente é dado por:

$$U = \frac{Q}{C} \Rightarrow \frac{Q}{C_{eq.}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \Rightarrow \frac{1}{C_{eq.}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

- Para dois capacitores em série: $C_{eq.} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$
- Para n capacitores **iguais** associados em série: $C_{eq.} = \frac{C}{n}$

Associação de capacitores em paralelo

A [figura 5.21](#) ilustra três capacitores associados em paralelo.

Observações:

- A quantidade de carga total é igual à soma das quantidades parciais de carga:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

- O capacitor equivalente é dado por:

$$Q = C \cdot U$$

$$C_{eq.} \cdot U = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U + C_3 \cdot U$$

$$C_{eq.} = C_1 + C_2 + C_3$$

- Para n capacitores **iguais** associados em paralelo: $C_{eq.} = n \cdot C$

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

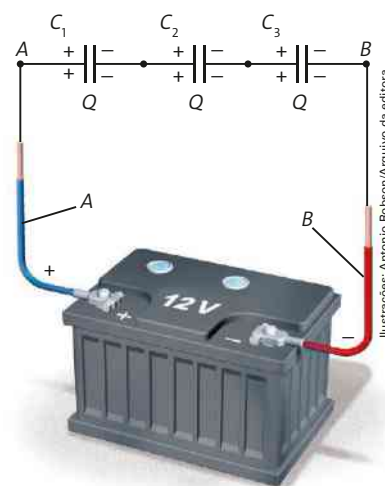


Figura 5.20 Associação de capacitores em série: a quantidade de carga é a mesma em todos eles.

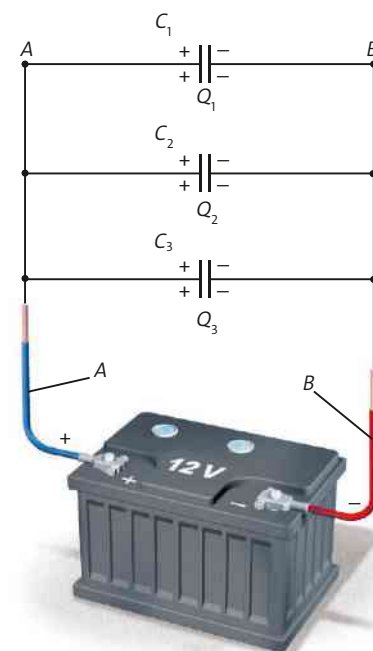


Figura 5.21 Associação de capacitores em paralelo: a tensão é a mesma em todos eles.

Circuitos com capacitores

Para armazenar energia elétrica, os capacitores devem ser ligados a circuitos elétricos com pelo menos um bipolo gerador.

Consideremos, por exemplo, um circuito formado por uma bateria de *fem* ε , um resistor de resistência elétrica R e um capacitor de capacitância C , ligados em série por uma chave *ch* (figura 5.22).

Vamos considerar que, no início, a chave esteja aberta e o capacitor descarregado. Ao ligarmos a chave (figura 5.23), a *ddp* U_C do capacitor é nula. Como a associação é em série, a *ddp* U_R no resistor é igual à *fem* ε .

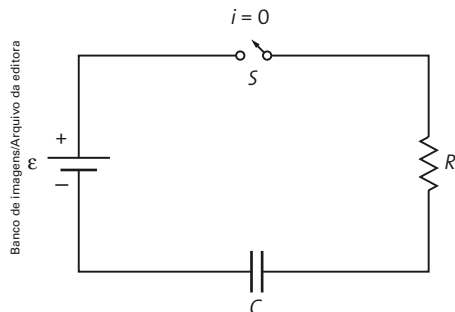


Figura 5.22 Representação do circuito de um capacitor com a chave aberta.

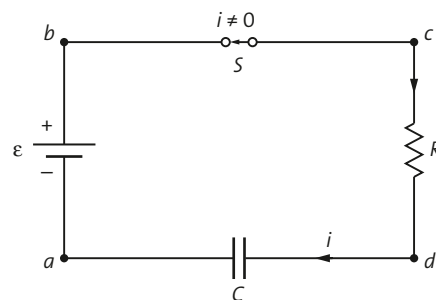


Figura 5.23 Representação do circuito de um capacitor com a chave fechada.

Da primeira lei de Ohm, concluímos que a corrente no circuito, imediatamente após fechar a chave, é dada por:

$$i = \frac{\varepsilon}{R}$$

Nesse momento, podemos pensar que algo está estranho: como o capacitor e o resistor estão em série, são atravessados pela mesma corrente. Como isso é possível se o capacitor tem um isolante entre os dois condutores que o compõem?

Veja uma explicação simples: uma das placas do capacitor está ligada ao polo positivo do gerador e os elétrons livres saem dela em busca do potencial maior, o que faz com que ela, gradativamente, adquira carga positiva (figura 5.24). Essa carga positiva provoca indução eletrostática na outra placa, que está ligada ao polo negativo (Terra) do gerador e dele recebe elétrons, ficando negativa (figura 5.25).

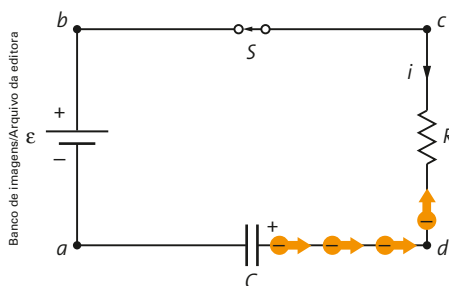


Figura 5.24 Representação simplificada da ligação da placa positiva de um capacitor.

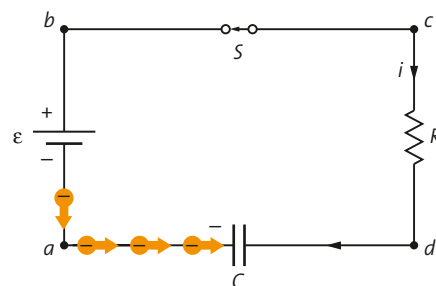


Figura 5.25 Representação simplificada da ligação da placa negativa de um capacitor.

Assim, macroscopicamente, há uma corrente elétrica no sentido habitual e uma variação no campo elétrico no interior do capacitor. Esse processo ocorre até o instante em que a ddp U_c no capacitor se iguala à fem ε , impondo uma corrente final nula (figura 5.26).

Em resumo, o funcionamento do circuito tem três fases descritas no quadro a seguir.

Regime	Instante	ddp no capacitor (U_c)	ddp no resistor (U_R)	Corrente no circuito
Início	$t = 0$	nula (curto-circuito)	ε	$\frac{\varepsilon}{R}$
Transitório	t é crescente	crescente	decrecente	decrecente
Estacionário	$t = \infty$	ε	nula	nula (circuito aberto)

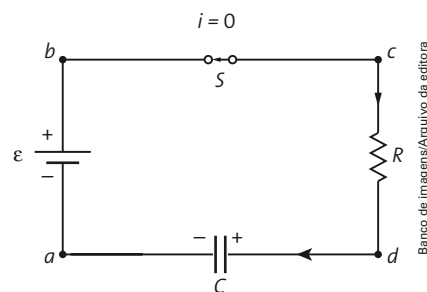


Figura 5.26 Representação do circuito em regime estacionário.

Exercícios



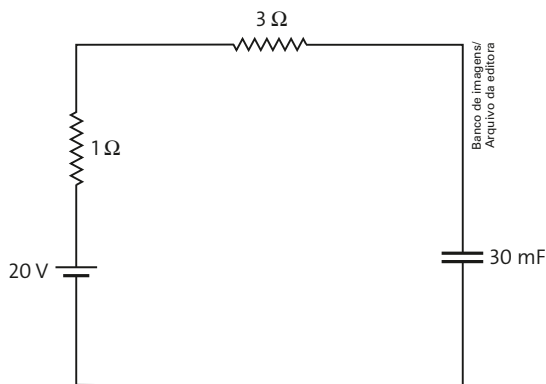
22. Associam-se em série dois capacitores, $C_1 = 3 \mu F$ e $C_2 = 2 \mu F$, e o conjunto é ligado a uma fonte de ddp $U = 18 V$. Determine:

- a capacitância equivalente; $C_{eq} = 1,2 \mu F$
- a carga de cada capacitor; $Q = 21,6 \mu C$
- a ddp de cada capacitor; $U_1 = 7,2 V$; $U_2 = 10,8 V$.
- a energia potencial elétrica de cada capacitor. $W_1 = 77,76 \mu J$; $W_2 = 116,64 \mu J$.

23. Associam-se em paralelo dois capacitores, $C_1 = 3 \mu F$ e $C_2 = 2 \mu F$, e o conjunto, ligado a uma fonte, adquire uma carga total de $30 \mu C$. Determine:

- a capacitância equivalente; $C_{eq} = 5 \mu F$
- a ddp de cada capacitor; $U = 6 V$
- a carga de cada capacitor; $Q_1 = 18 \mu C$; $Q_2 = 12 \mu C$.
- a energia potencial elétrica de cada capacitor. $W_1 = 54 \mu J$; $W_2 = 36 \mu J$.

24. No circuito esquematizado, o capacitor está com plena carga.



- Qual a ddp no capacitor? $U = E = 20 V$
- Determine a energia potencial elétrica nele armazenada. $W = 6 J$



André-Marie Ampère

André-Marie Ampère (nascido em 22 de janeiro de 1775, em Lyon; morreu em 10 de junho de 1836, em Marselha) foi um físico francês que fundou e nomeou a ciência da eletrodinâmica, agora conhecida como eletromagnetismo. Seu nome perdura na vida cotidiana no ampère, a unidade de medida de corrente elétrica.

Ampère, que nasceu em uma família burguesa próspera durante o auge do Iluminismo francês, personificou a cultura científica de sua época. O pai de Ampère, Jean-Jacques, seguindo o que recomendava Rousseau em relação à educação formal dos rapazes, permitiu que seu filho educasse a si mesmo dentro das paredes de sua biblioteca bem abastecida.

Além disso, por ter acesso aos mais recentes livros de Matemática, começou a estudar Matemática avançada aos 12 anos. A Revolução Francesa (1787-1799), que eclodiu durante a sua juventude, também fez parte de sua formação. O pai de Ampère foi chamado ao serviço público pelo novo governo revolucionário, tornando-se um juiz de paz em uma pequena cidade perto de Lyon. No entanto, quando a facção jacobina tomou o controle do governo revolucionário em 1792, Jean-Jacques resistiu às novas marés políticas e foi guilhotinado em 24 de novembro de 1793, como parte dos expurgos jacobinos do período.

Apesar de a Revolução Francesa ter causado esses traumas pessoais, também criou novas instituições de ciência que, em última análise, tornaram-se fundamentais para o sucesso profissional de André-Marie Ampère. Seu primeiro trabalho, modestamente remunerado, ocorreu em 1799, como professor de Matemática, o que lhe permitiu se casar e ter um filho.

Em 1802, Ampère foi nomeado professor de Física e Química na École Centrale em Bourg-en-Bresse. Ele dedicou seu tempo em Bourg a pesquisar Matemática e publicar considerações sobre a teoria da Matemática dos jogos (*The Mathematical Theory of Games*), submetido à Academia de Ciências de Paris em 1803.

Depois da morte de sua esposa, em julho de 1803, Ampère mudou-se para Paris, onde assumiu, em 1804, o cargo de tutor na disciplina Análise, na nova École Polytechnique. Apesar da falta de qualificações formais, Ampère foi nomeado professor de Matemática na instituição em 1809, cargo em que permaneceu até 1828. Além da École Polytechnique, Ampère oferecia cursos em Filosofia e Astronomia na Universidade de Paris. Em 1824, ele foi eleito para a cadeira de Física Experimental no Collège de France. Em 1814, Ampère foi eleito membro do Institut National des Sciences.

Em 1820, Ampère tentou combinar eletricidade e Magnetismo, depois de conhecer os resultados experimentais do físico dinamarquês Hans Christian Oersted. O matemático formulou uma lei para o circuito elétrico e magnético. Também em 1820, apresentou seu trabalho sobre os efeitos eletromagnéticos. Entre esses efeitos estão as forças eletrodinâmicas. O trabalho foi publicado nos *Annales de Chimie et de Physique* (Anais de Química e de Física).

O trabalho de Ampère foi de fundamental importância para o desenvolvimento da Eletricidade e do Magnetismo. Sua teoria mais importante foi publicada em 1826: *Memoir on the Mathematical Theory of Electrodynamical Phenomena, Uniquely Deduced from Experience* (Memória sobre a teoria matemática dos fenômenos eletrodinâmicos, unicamente deduzida da experiência). Foi com base nela que Faraday, Maxwell e Thomson desenvolveram outras teorias.

Fonte de dados: Encyclopædia Britannica; CDCC-USP. Disponível em: <www.britannica.com/biography/Andre-Marie-Ampere>; <www.cdcc.usp.br/fisica/Cientistas/AndreAmpere.html>. Acessos em: 14 jan. 2016. Adaptado.

DeAgostini/Getty Images/Museu da Eletricidade, Polymieux, França.



Experimento



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

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



Blindagem eletrostática (gaiola de Faraday)

Material necessário:

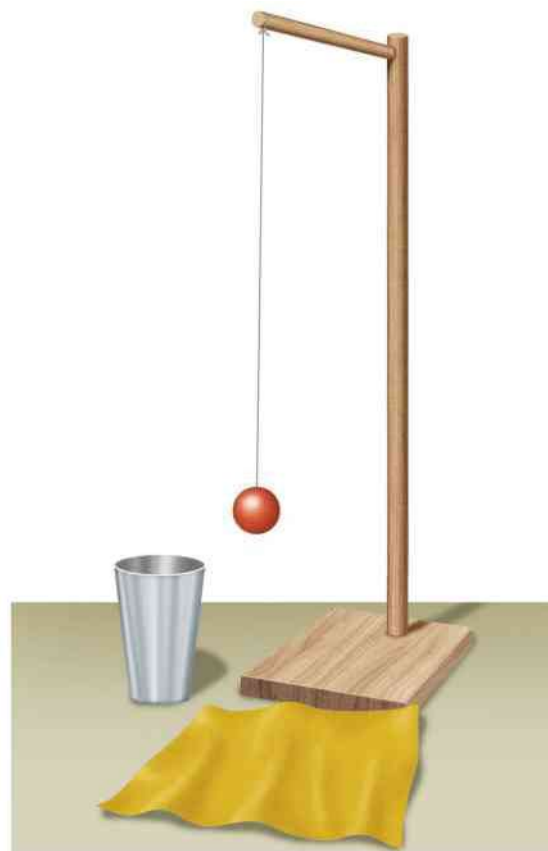
- Quatro pêndulos eletrostáticos
- Uma caneca de alumínio
- Uma flanela

Primeiro experimento

- Eletrize a caneca por atrito com a flanela.
- Aproxime um dos pêndulos da caneca, sem tocá-la.
- Descreva o que acontece.

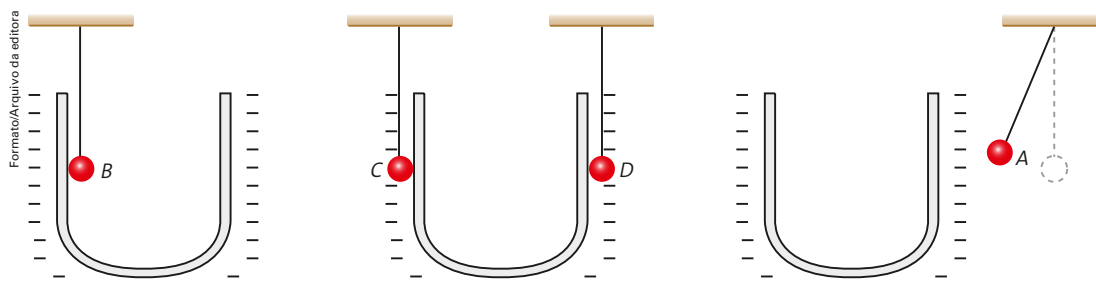
Segundo experimento

- Eletrize a caneca por atrito com a flanela.
- Coloque o pêndulo *B* em contato com a parte interna da caneca.
- Coloque os pêndulos *C* e *D* em contato com a parte externa da caneca.
- Aproxime o pêndulo *A* da caneca, sem tocá-la.



Paulo Manz/Arquivo da editora

Material necessário para os experimentos.



Representação dos procedimentos do segundo experimento.

Agora, aproxime:

- *A* e *B* e descreva o que acontece;
- *C* e *D* e descreva o que acontece;
- *A* e *C* e descreva o que acontece;
- *B* e *C* e descreva o que acontece.

Feitas essas observações, formule hipóteses para explicar os resultados dos dois experimentos.

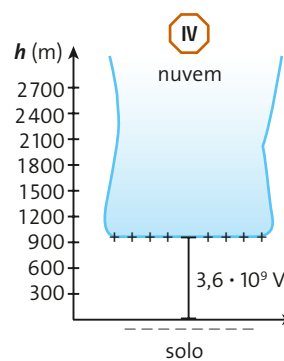
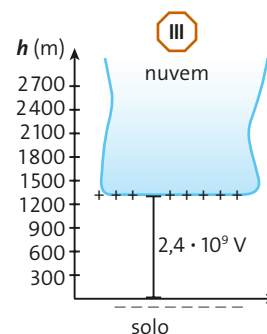
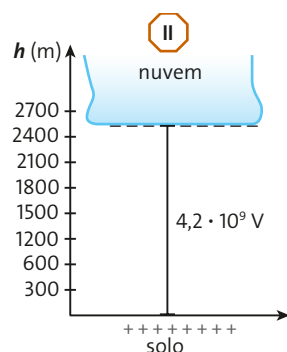
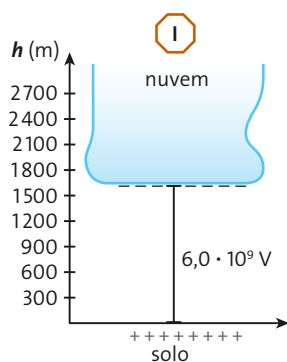
Retomando

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

25. (Uema) O uso do para-raios faz com que o percurso da descarga elétrica, entre a terra e as nuvens, seja mais seguro. O objetivo desse aparelho é proteger certa região, edifícios, residências ou assemelhados da ação devastadora de um raio. O para-raios é um dispositivo composto por uma haste metálica com pontas nas extremidades, que deve ser colocado na parte mais elevada do local a ser protegido. A parte inferior da haste é ligada à Terra por meio de um cabo metálico conectado a uma haste de ferro galvanizado e introduzido profundamente no solo. Isso leva a concluir que o funcionamento de um para-raios é baseado:

- a) no efeito joule e na indução eletrostática.
- b) na blindagem eletrostática e no poder de pontas.
- c) na indução eletrostática e na blindagem eletrostática.
- d) no efeito joule e no poder de pontas.
- ☒ e) na indução eletrostática e no poder de pontas.

26. (UFRN) Na formação de uma tempestade, ocorre uma separação de cargas elétricas no interior das nuvens, que induzem, na superfície da Terra, cargas de sinal oposto ao das acumuladas nas partes mais baixas das nuvens. Isso cria uma diferença de potencial elétrico entre essas partes das nuvens e o solo. Nas figuras a seguir, estão esquematizadas diferentes situações do tipo descrito acima.



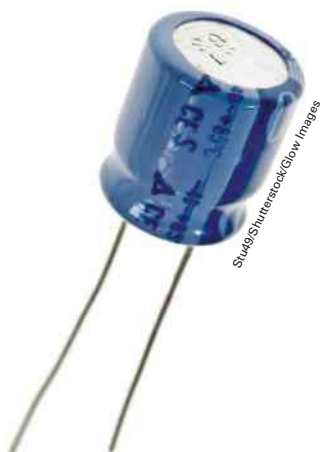
Em primeira aproximação, as quatro situações podem ser interpretadas como capacitores de placas planas e paralelas. Estão indicados, nas figuras, um eixo vertical com medidas de alturas em relação ao solo e a diferença de potencial entre as partes mais baixas da nuvem e o solo em cada caso.

O campo máximo que um capacitor cujo meio isolante seja o ar pode suportar, sem ocorrer uma descarga elétrica entre suas placas, é aproximadamente $3 \cdot 10^6$ V/m. Qualquer campo maior que esse produz uma faísca (raio) entre as placas.

Com base nesses dados, é possível afirmar que as situações em que mais provavelmente ocorrerão descargas elétricas são:

- ☒ a) I e IV.
- b) I e III.
- c) II e III.
- d) II e IV.

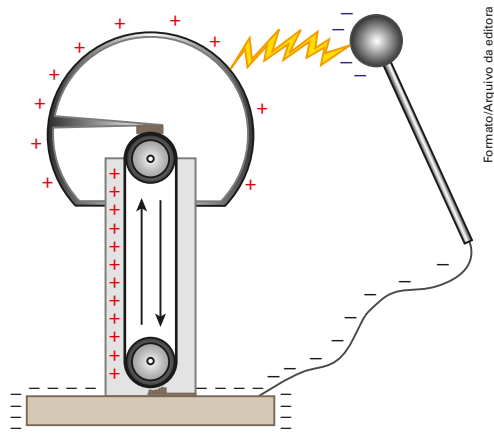
27. (Uespi) A próxima figura ilustra um capacitor eletrolítico do tipo bastante utilizado em dispositivos elétricos em geral, tais como placas-mães (segunda figura) e placas de vídeo de computadores. A sua função é essencialmente armazenar pequenas quantidades de energia, de modo a absorver variações na corrente elétrica, protegendo os demais componentes eletrônicos do circuito ligados a ele. Qual a quantidade de energia elétrica armazenada por um capacitor eletrolítico de capacitância $100 \mu\text{F} = 10^{-4}$ F, submetido a uma tensão de 60 V entre os seus terminais?



- a) 0,09 J c) 0,27 J e) 0,42 J
 x b) 0,18 J d) 0,36 J

28. (PUC-PR) Nas Feiras de Profissões promovidas pela PUC-PR, frequentemente os visitantes do estande do curso de Física têm a oportunidade de brincar com um gerador eletrostático, do tipo mostrado na figura a seguir. Nesse gerador, uma correia isolante (normalmente feita de borracha) remove, por atrito, cargas de uma base metálica e as transporta até o interior de uma esfera oca (também metálica). Então, as cargas migram da correia para a superfície interna da esfera através de uma escova condutora, sob a qual a correia desliza. Girando a correia continuamente,

um fluxo de cargas é mantido da base para a esfera do gerador. Quando a esfera atinge um potencial suficientemente elevado (positivo, digamos), cargas começam a escapar da superfície externa da esfera e a retornar, pelo ar, para a base do gerador. Dependendo dos materiais utilizados, a esfera pode ficar negativa e a base positiva ou vice-versa. Se o ar estiver seco, pode-se obter um potencial próximo de 200 mil volts sobre uma esfera com raio de 20 centímetros.



Dado esse contexto, avalie as assertivas abaixo e marque a alternativa correta.

(Considere a capacitância da esfera dada por: $C = \frac{R}{k}$, onde R é o raio da esfera e $k = 9 \cdot 10^9$ m/F.)

- I. Uma pessoa pode tocar a esfera do gerador com segurança, pois apesar de o potencial ser elevado, a energia e a carga armazenadas na esfera são pequenas (menores que 10 joules e 1 coulomb, respectivamente).
 - II. Durante o funcionamento do gerador, há um campo elétrico ao longo da haste metálica que liga a escova (dentro da esfera) à superfície interna da esfera.
 - III. Durante o funcionamento do gerador, todo e qualquer excesso de carga migrará para a superfície externa da esfera. Nenhum excesso de carga ficará acumulado na superfície interna.
 - IV. O gerador funcionaria igualmente com uma esfera de vidro.
- a) Apenas as assertivas I e III são verdadeiras.
 x b) Apenas as assertivas I, II e III são verdadeiras.
 c) Apenas a assertiva I é verdadeira.
 d) Todas as assertivas são verdadeiras.
 e) Apenas a assertiva II é verdadeira.



Campos magnéticos criados por ímãs

Quem não fica fascinado quando observa pela primeira vez os “poderes” de um ímã? Mas como será que as propriedades magnéticas foram conhecidas e explicadas ao longo da história da humanidade?

O fenômeno magnético é conhecido, pelo menos, desde o século VI a.C., na Grécia, na China e no Egito. Inicialmente o magnetismo foi considerado apenas mais uma das forças da natureza, que se manifestava somente no ferro e em outras substâncias mais raras, que genericamente foram chamadas de **ferromagnéticas**.

Os experimentos realizados por Hans Christian Oersted (veja a seção **Física tem História** na página 120) contribuíram para o entendimento mais profundo da natureza do magnetismo. Ele provou a relação entre magnetismo e eletricidade por meio da observação de um campo magnético gerado por uma corrente elétrica aplicada em um condutor.

Os geradores de eletricidade e os motores elétricos, entre outros dispositivos, abriram caminho para o desenvolvimento do Eletromagnetismo, que proporcionou a criação de diversas tecnologias.

O magnetismo natural

O nome “magnetismo” vem de Magnésia, pequena região da Ásia Menor onde foi encontrado, em abundância, um mineral naturalmente magnético chamado magnetita (figura 6.1). A pedra desse mineral é um ímã natural.

Na figura 6.2 podemos observar que, ao pendurarmos um ímã natural de formato alongado, ele ficará sempre alinhado na direção geográfica norte-sul. A extremidade que aponta para o norte geográfico é chamada de **polo norte do ímã**. A outra, apontada para o sul geográfico, é denominada **polo sul do ímã**.

Os polos são as partes dos ímãs em que os efeitos magnéticos se apresentam mais intensos.

Quando dois ímãs são colocados próximos, o polo norte de um repele o polo norte do outro. Já o polo norte de um atrai o polo sul do outro (figura 6.3). Assim podemos, concluir que: polos iguais se repelem, e polos diferentes se atraem.

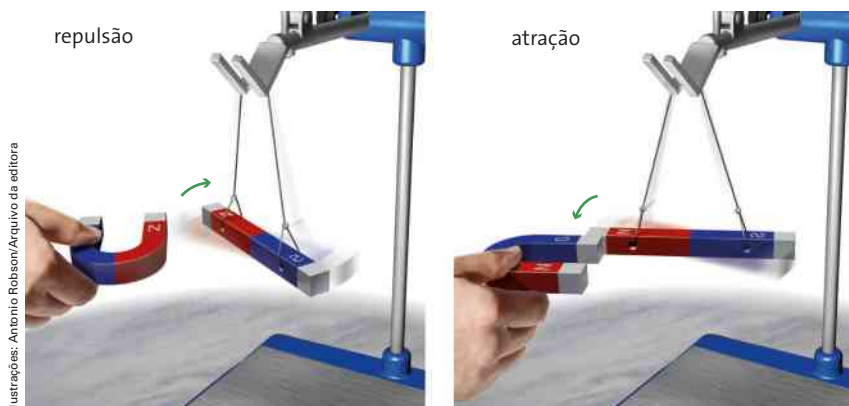


Fabio Colombini/Arquivo do fotógrafo

Figura 6.1 A magnetita é um mineral magnético formado por óxidos de ferro. No Brasil, é o principal minério de ferro.



Figura 6.2 Representação esquemática do alinhamento natural de agulhas magnéticas segundo a direção geográfica norte-sul. Esse é o princípio básico do funcionamento de uma bússola.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

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

Figura 6.3 Representação da repulsão e da atração magnética.

É importante observar que cada pedaço de um ímã partido forma um novo ímã, cada um deles com um polo norte e um polo sul. Esse fenômeno é conhecido como **inseparabilidade dos polos** (figura 6.4).

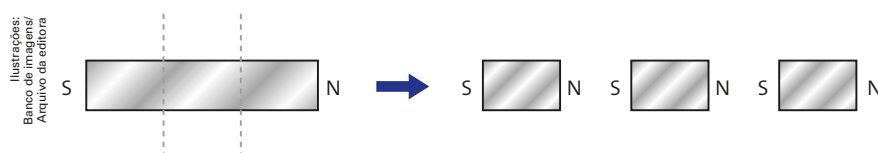


Figura 6.4 Representação do fenômeno da inseparabilidade dos polos.

Uma explicação para esse fenômeno foi proposta por André-Marie Ampère (1775-1836). Ele supôs que cada ímã era constituído de pequenos ímãs elementares; a soma dos efeitos de todos esses ímãs elementares resultaria no ímã completo. Hoje, no entanto, sabemos que cada um dos ímãs elementares corresponde a uma pequena porção de matéria, chamada de **domínio magnético**, na qual os átomos têm a mesma orientação magnética (figura 6.5).

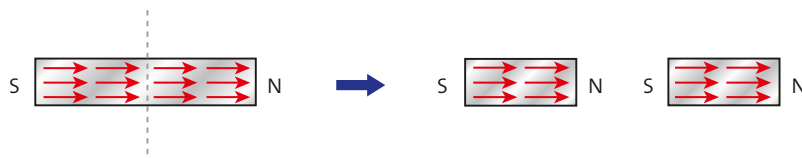


Figura 6.5 As setas vermelhas indicam a orientação da maioria dos domínios magnéticos da barra imantada. Representação esquemática.

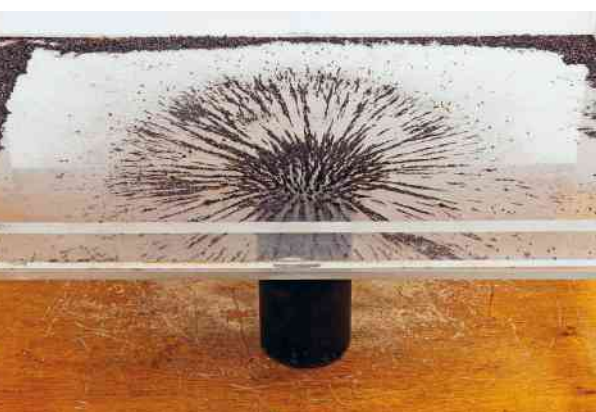


Figura 6.6 Quando se submetem pequenos ímãs à ação de outros ímãs fica fácil visualizar um campo magnético.

Campo magnético

Um corpo de prova (deve ser um pequeno objeto feito de material que apresente propriedades magnéticas) colocado em um ponto de uma região onde existe um campo magnético fica sujeito a uma força de origem magnética. Um exemplo de visualização do campo magnético é mostrado na figura 6.6.

Representemos o campo magnético em cada ponto de uma região do espaço pelo vetor campo magnético ($\vec{B}$). Para determinar a direção e o sentido do vetor $\vec{B}$ usamos uma agulha magnética (o polo norte da agulha nos indica o sentido de $\vec{B}$). Veja a figura 6.7.

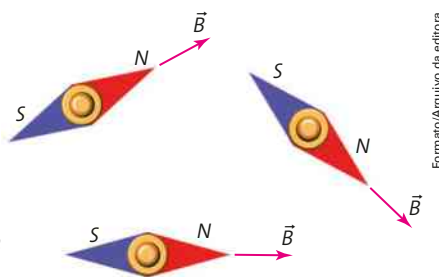


Figura 6.7 Determinação da direção e do sentido de um campo magnético.

Em um campo magnético, as linhas são compostas de maneira que o vetor campo magnético apresenta as seguintes características:

- sua direção é sempre tangente a cada linha de campo em qualquer ponto do campo magnético;
- seu sentido é o mesmo da respectiva linha de campo;
- sua intensidade é proporcional à densidade das linhas de campo.

Para construir linhas de campo, podemos usar o conceito de domínio magnético. Cada domínio magnético é um pequeno ímã, que podemos considerar um pequeno corpo de prova. Observe, na **figura 6.8.a**, que, internamente ao ímã, as linhas de campo começam no polo sul e vão até o polo norte. Externamente ao ímã (**figura 6.8.b**), ocorre o contrário. Desse modo, as linhas de campo magnético são fechadas.

Campo magnético uniforme

O campo magnético é uniforme em determinada região quando, em todos os pontos dessa região, o vetor campo magnético tem a mesma intensidade, a mesma direção e o mesmo sentido. Na **figura 6.9.a** temos a representação de um campo magnético uniforme. Na **figura 6.9.b** temos exemplos de ímãs em que há campo magnético praticamente uniforme.

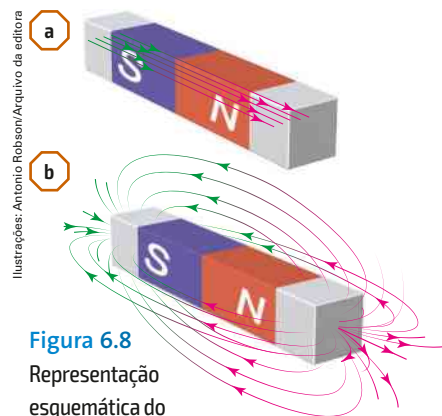
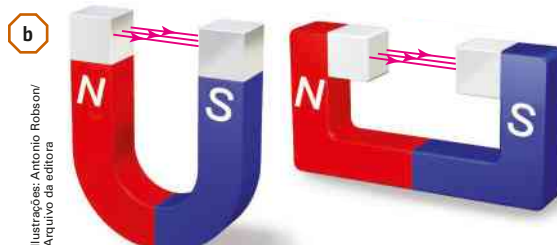
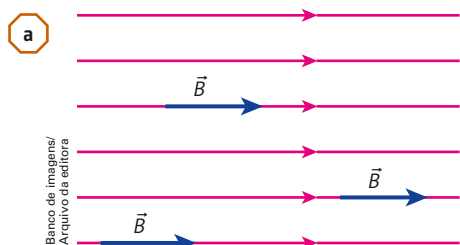


Figura 6.8
Representação esquemática do domínio magnético interno (a) e do externo (b) de um ímã.

Figura 6.9
Representação esquemática do campo magnético uniforme (a) e de ímãs que apresentam essa propriedade (b).

Campo magnético terrestre

A Terra, por ter grande quantidade de minério de ferro e por executar um movimento de rotação em torno de seu eixo, produz um campo magnético de intensidade considerável.

Sob a ação desse campo magnético, os ímãs alinham-se sempre, aproximadamente, na direção norte-sul, com o polo norte do ímã apontando para o norte geográfico, como indicado na **figura 6.10**. É essa propriedade que permite a construção de bússolas.

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

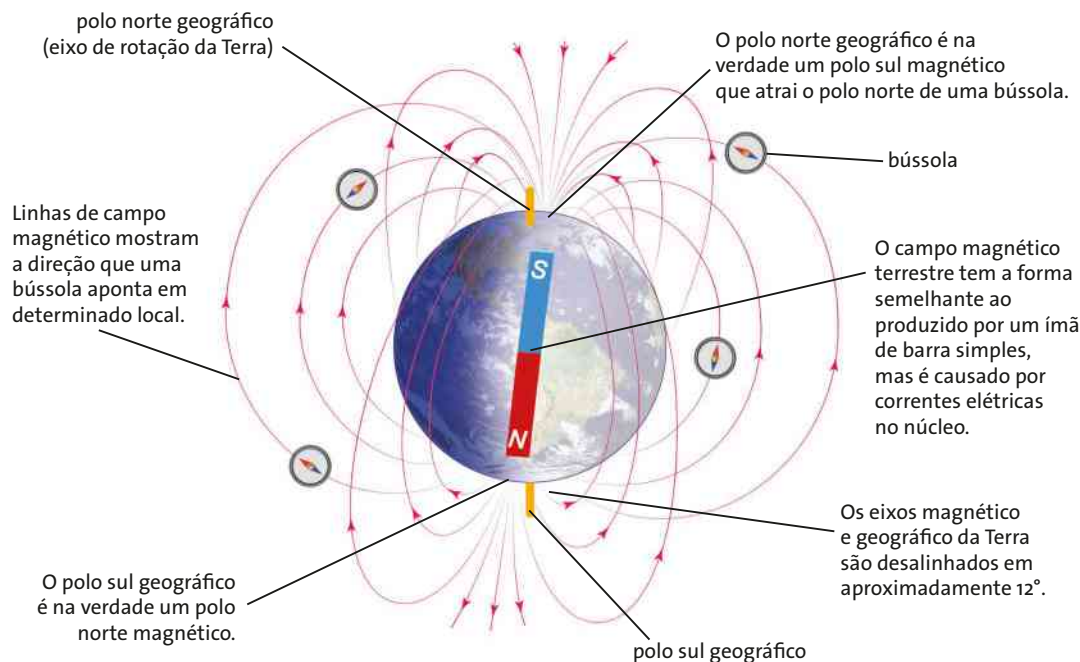


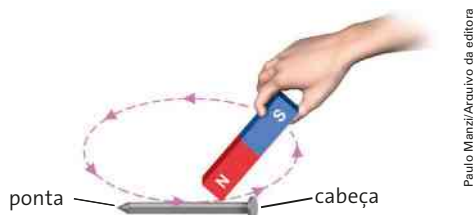
Figura 6.10 Representação do campo magnético terrestre.

1. a) Pedro poderia pendurar o prego com um fio muito fino (por exemplo, linha de costura) e verificaria que sua ponta (polo norte do prego) apontaria para o norte geográfico da Terra que corresponde ao sul magnético da Terra.



Exercícios

1. Em um prego de aço, Pedro esfrega continuamente um ímã permanente, sempre no mesmo sentido, conforme indica a figura (sem escala e em cores fantasia). Após esse processo, o estudante verifica que o prego fica imantado, atraindo outros pregos.



Paulo Manz/Arquivo da editora

- a) O polo norte do prego é a sua ponta. Como Pedro pode verificar isso?
- b) Distraidamente, Pedro coloca o prego imantado ao lado de outro prego idêntico, mas não imantado. Para verificar qual dos dois é o prego imantado, usando apenas esses dois objetos, ele os posiciona conforme indica a figura.

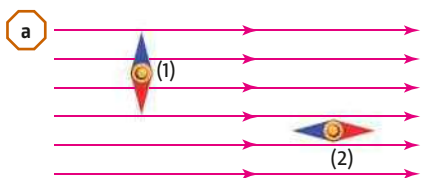


Paulo Manz/Arquivo da editora

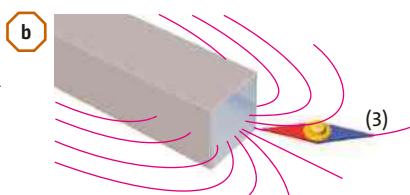
O prego A; prego B ou nenhum dos pregos estaria imantado.

Se a ponta do prego A atrair a região central do prego B, qual deles será o imantado? Qual seria a conclusão se essa atração não ocorresse?

2. Nas figuras a e b, podemos visualizar as linhas de campo de dois campos magnéticos em regiões distintas. O primeiro (a) é uniforme e o segundo (b) está próximo a uma das extremidades de um ímã em forma de barra. No campo uniforme foram colocadas duas bússolas cujas posições iniciais estão também representadas na figura a. No campo não uniforme, a bússola já aparece em sua orientação final.



Disposição inicial de duas bússolas em um campo uniforme.



Orientação de uma bússola em um campo não uniforme.

Antônio Robson/Arquivo da editora

- a) Qual é o polo correspondente à extremidade apresentada na figura b, considerando que o lado norte da bússola é o vermelho? **Polo sul.**
- b) Esquematize as forças que agem em cada um dos polos das três bússolas distribuídas nesses campos magnéticos. **Ver resposta no Manual do Professor.**
- c) Em quais bússolas a soma vetorial das forças que agem é nula? **Nas bússolas 1 e 2.**

3. A figura a seguir mostra um ímã atraindo limalha de ferro. Pode-se afirmar que:



Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

- a) o polo mostrado é o norte.
 - b) o polo mostrado é o sul.
 - c) o campo magnético é mais intenso na região central do ímã.
 - ☒ d) o campo magnético é mais intenso na extremidade do ímã.
 - e) a limalha de ferro só é atraída pelo ímã por ser muito leve.
4. Caso a Terra fosse representada por um grande ímã, de acordo com o campo magnético por ela criado:
 - a) ao norte geográfico estaria associado o polo norte do ímã.
 - ☒ b) ao norte geográfico estaria associado o polo sul do ímã.
 - c) ao sul geográfico estaria associado o polo sul do ímã.
 - d) ao leste geográfico estaria associado o polo sul do ímã.
 - e) ao oeste geográfico estaria associado o polo sul do ímã.
 5. Um ímã em forma de barra é cortado transversalmente. Descreva, em seu caderno, como ficam as duas metades da barra, do ponto de vista magnético, depois do corte. **As partes serão novos ímãs.**



Sob orientação do professor, reúna-se com dois ou três colegas. Leiam o texto a seguir.

Em uma aula de História no Ensino Fundamental, um aluno perguntou: como os navegadores das caravelas, aqueles que supostamente descobriram o Brasil, achavam o caminho de volta?

A professora, pacientemente, tentou explicar para os garotos e garotas de 10 anos de idade o que era uma bússola. Eles não entenderam muito bem, embora ela tivesse mostrado uma bússola de bolso, com a extremidade colorida sempre voltada para o norte.

Como aquilo funcionava? Como construir uma? Aquilo ficou na cabeça da garotada por semanas.

Um dia, a professora veio com uma ordem: tragam, amanhã, um pequeno suporte de madeira, uma rolha, um prego, uma ampola de remédio vazia, um pedaço de massinha e uma agulha de costura.

No dia seguinte havia pregos, tábuas e agulhas dos mais diversos tipos e tamanhos. Na base da tábua prenderam o prego; no prego, a rolha foi encaixada. Na ponta do prego prenderam a ampola, com a massinha prendendo a agulha no seu topo (**figura a**). Antes disso, esfregaram a agulha no ímã que a professora levou.



Figura a

Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

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

Resultado: cerca de vinte pequenas bússolas, todas apontando na mesma direção. Isso é Física, disse a professora. Sem ela, é impossível navegar.

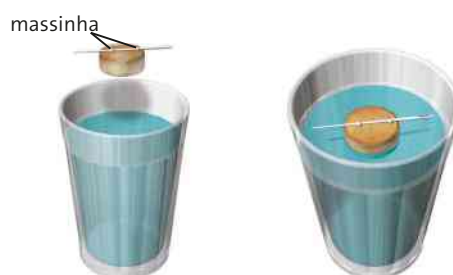
1. Construam uma bússola caseira como a que a professora fez no texto.
2. Comparem o comportamento da bússola caseira com o de uma bússola comercial e formulem hipóteses sobre suas semelhanças e diferenças.
3. Também é possível construir uma bússola caseira com os seguintes materiais: ímã, agulha, um pedaço de cortiça (rolha), um recipiente (copo) e água. Veja a **figura b**. Como representado na **figura c**, passem a ponta da agulha mais de vinte vezes sobre o ímã e numa única direção, prendam-na na rolha e coloquem com cuidado sobre a água no recipiente. Assim temos uma bússola.



Figura b



Figura c



Respondam: quais são as semelhanças e diferenças entre as duas formas de se montar uma bússola? Destaque quais são os materiais presentes nas duas montagens e suas funções.

4. O que faz a agulha apontar sempre para o mesmo lugar?

2 Campos magnéticos criados por correntes elétricas

Física tem História



Veja orientações e sugestões de encaminhamento deste tópico no Manual do Professor.



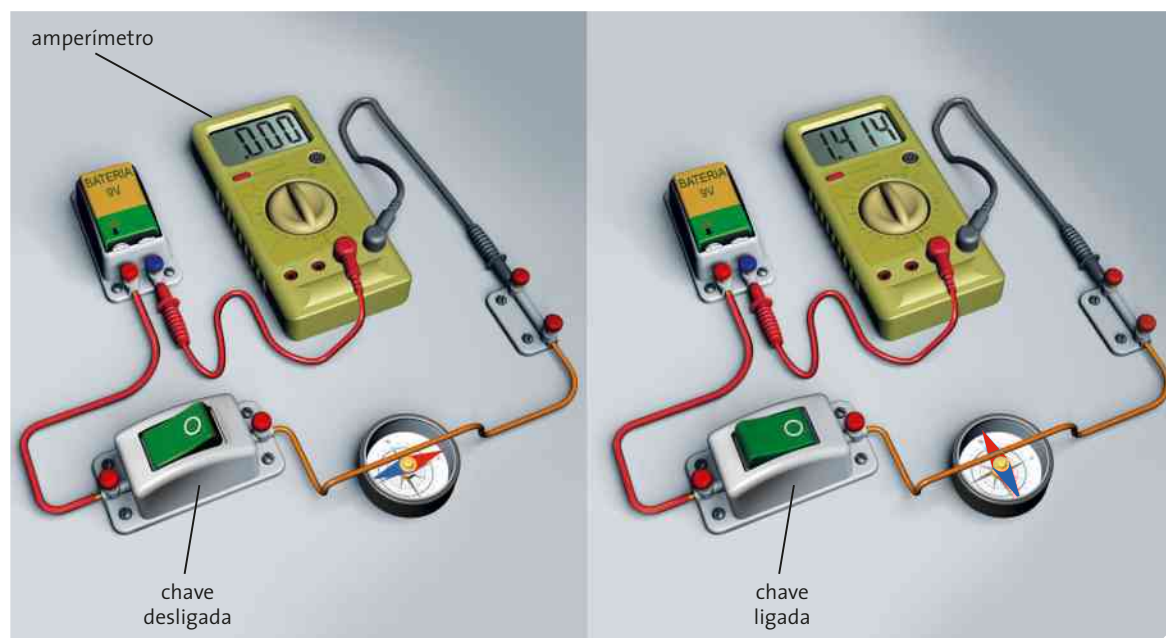
A experiência de Oersted

Até o começo do século XIX, não se associava a eletricidade ao magnetismo, isto é, os fenômenos de atração e repulsão entre ímãs pareciam não ter relação com as correntes elétricas circulando nos condutores.

Um professor da Universidade de Copenhague (Dinamarca), Hans Christian Oersted, realizou em 1820 o seguinte experimento:

- aproximou uma pequena bússola de um fio reto que não era percorrido por corrente elétrica. Observou que a bússola se orientava na direção norte-sul;
- em seguida, fez passar corrente pelo fio reto e observou que a bússola assumiu uma direção ortogonal ao fio.

Com base nessa experiência, Oersted concluiu que correntes elétricas produzem campos magnéticos.



Fotos: Antonio Robson/Arquivo da editora

Representação (sem escala e em cores fantasia) com instrumentos modernos, da experiência de Oersted.

1. É possível formular hipóteses a respeito da direção do campo magnético criado por uma corrente elétrica com base na experiência de Oersted?
2. Os campos magnéticos criados por correntes elétricas dependem do formato do condutor que serve de suporte a essas correntes?

Considerando as respostas das questões da seção **Física tem História**, analisaremos três casos de importância prática: o fio reto, a espira circular e o solenoide.

Fio reto e longo

Espalhando limalha de ferro nas imediações de um fio reto e longo, é possível ter uma ideia de como são as linhas do campo magnético criado por um fio desse tipo, atravessado por uma corrente elétrica. Essas linhas são circunferências situadas em planos perpendiculares ao fio, e com centro nele (figura 6.11).

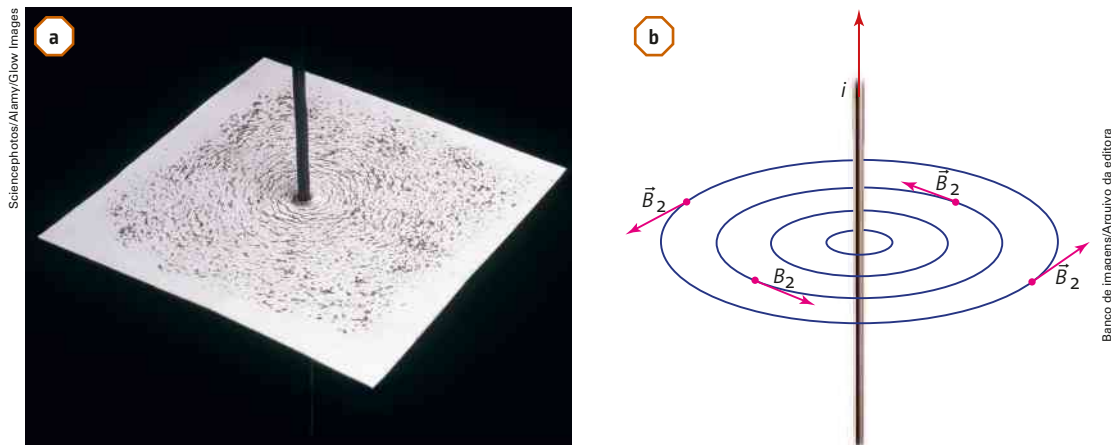


Figura 6.11 Em a, a limalha de ferro indica o campo magnético gerado por um condutor reto e longo percorrido por corrente elétrica (i). Em b, representação (sem escala e em cores fantasia) do campo magnético gerado no plano da folha de papel.

Para caracterizar esse campo magnético, tomemos um ponto P nele situado. A direção do campo magnético é sempre perpendicular ao plano determinado por P e pela reta que corresponde ao fio (figura 6.12).

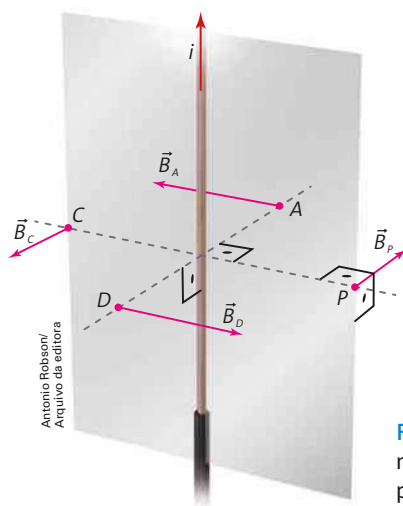


Figura 6.12 Caracterização de um campo magnético gerado por um fio reto e longo percorrido por corrente.

Para representar o sentido do campo em uma folha de papel, vamos adotar como referência um observador que olhe de frente para a folha; o vetor campo magnético pode estar orientado no sentido de sair do plano da folha (figura 6.13.a) ou de entrar nele (figura 6.13.b).



Figura 6.13 Representação dos sentidos do campo magnético em um fio reto e longo.

Um modo prático de relacionar o sentido da corrente elétrica com o do vetor campo magnético gerado por ela é conhecido como **regra da mão direita**.

Com a mão aberta, aponta-se o polegar no sentido da corrente elétrica no fio e os demais dedos no sentido do condutor para o ponto P . O sentido do vetor $\vec{B}$ no ponto P é obtido curvando-se os dedos ou dando um tapinha (figura 6.14).

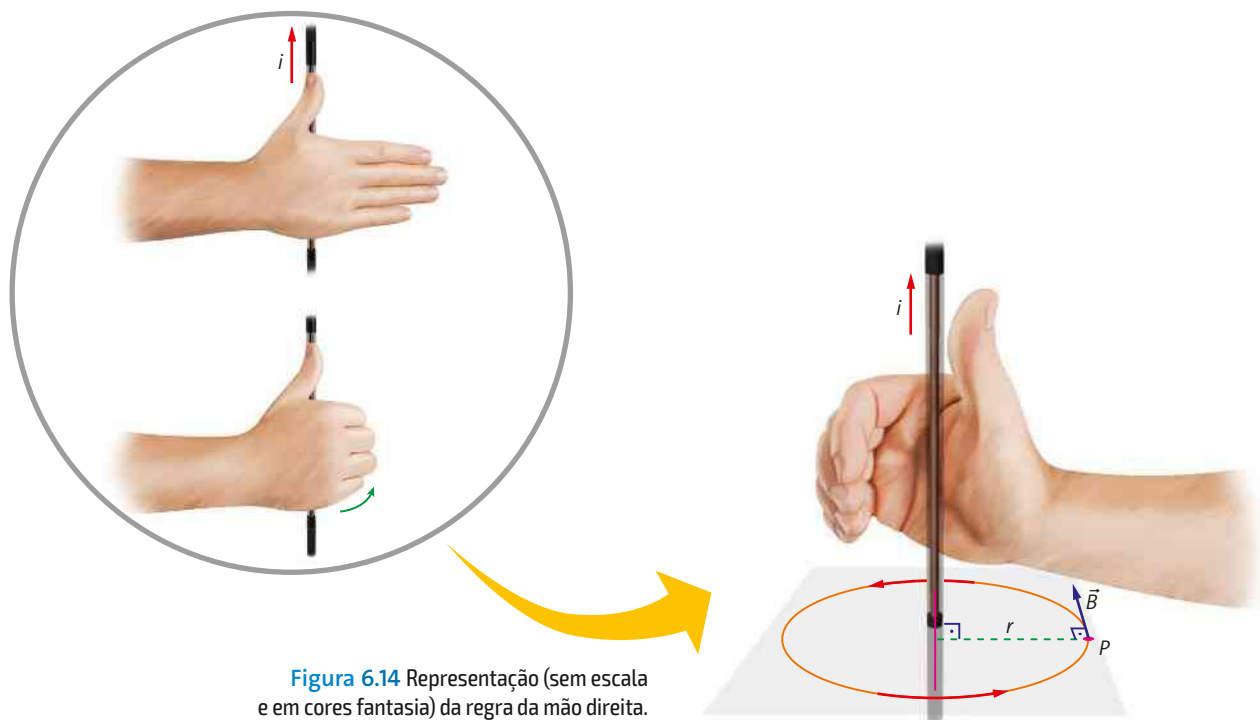


Figura 6.14 Representação (sem escala e em cores fantasia) da regra da mão direita.

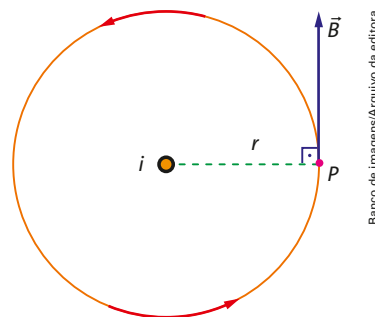
Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Verificamos experimentalmente que a intensidade (B) do campo magnético criado por um fio reto e longo é proporcional à intensidade de corrente (i) que o atravessa e é inversamente proporcional à distância (r) do ponto até o fio (figura 6.15):

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi \cdot r}$$

Nessa expressão, a constante μ é a permeabilidade magnética do meio em que está o fio. Para o vácuo, essa constante vale:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$



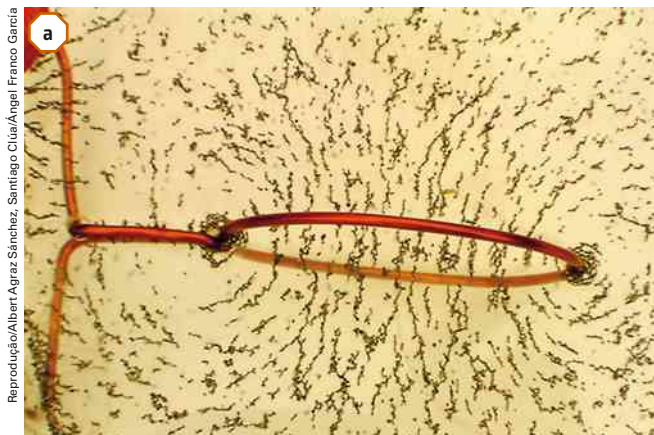
Banco de Imagens/Arquivo da editora

Figura 6.15 A corrente elétrica i que passa pelo fio (saindo do plano do papel) gera um campo magnético de intensidade B , inversamente proporcional à distância r .

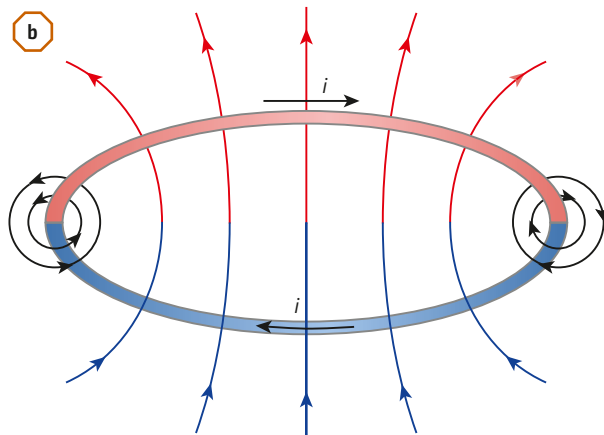
A unidade de medida para o campo magnético no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o tesla (T) em homenagem a Nikola Tesla (1856-1943).

Espira circular

Espalhando limalha de ferro nas imediações de uma espira circular, atravessada por corrente elétrica, temos uma ideia de como são as linhas do campo magnético criado por ela (figura 6.16).



Reprodução/Albert Agreaz Sánchez, Santiago Clúa/Ángel Franco García



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

Figura 6.16 Em a, a limalha de ferro indica o campo magnético gerado por uma espira circular percorrida por corrente (i). Em b, representação (sem escala e em cores fantasia) do campo magnético ($\vec{B}$).

É possível observar que, no centro da espira circular, atravessada por uma corrente elétrica, o campo magnético criado por ela é perpendicular ao plano que a contém. Podemos representar a espira circular e seu campo, como mostra a figura 6.17.

A intensidade do campo magnético no centro da espira é:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2 \cdot R}$$

Nessa expressão, R é o raio da circunferência determinada pela espira.

Para determinar a direção e o sentido de $\vec{B}$ no centro da espira, utilizamos a regra da mão direita, imaginando cada pequeno trecho da circunferência como um pedaço de fio retilíneo e longo.

Na figura 6.18, o observador 1 “vê” linhas de campo saindo da espira: portanto, essa face corresponde ao polo norte de um ímã. O observador 2, por sua vez, “vê” linhas de campo entrando na espira, o que determina o polo sul.

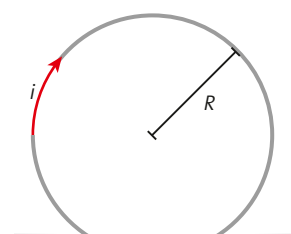
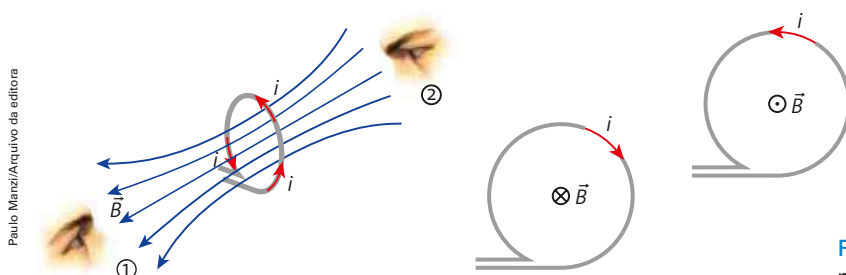


Figura 6.17 Representação do campo em uma espira circular.



Paulo Manz/Arquivo da editora

Figura 6.18 Visualizações do campo magnético de uma espira.

Se enrolarmos várias vezes um fio em torno da mesma circunferência, estaremos fazendo uma superposição de várias espiras; desse modo a intensidade do campo magnético aumentará proporcionalmente ao número de voltas.

Se o número de voltas for n , a intensidade do campo será:

$$B = n \cdot \frac{\mu \cdot i}{2 \cdot R}$$

Solenoide

Um solenoide é constituído por um fio metálico enrolado no formato de uma hélice cilíndrica. Ao ser atravessado por uma corrente elétrica, cria um campo magnético cujas linhas são mostradas na [figura 6.19](#).

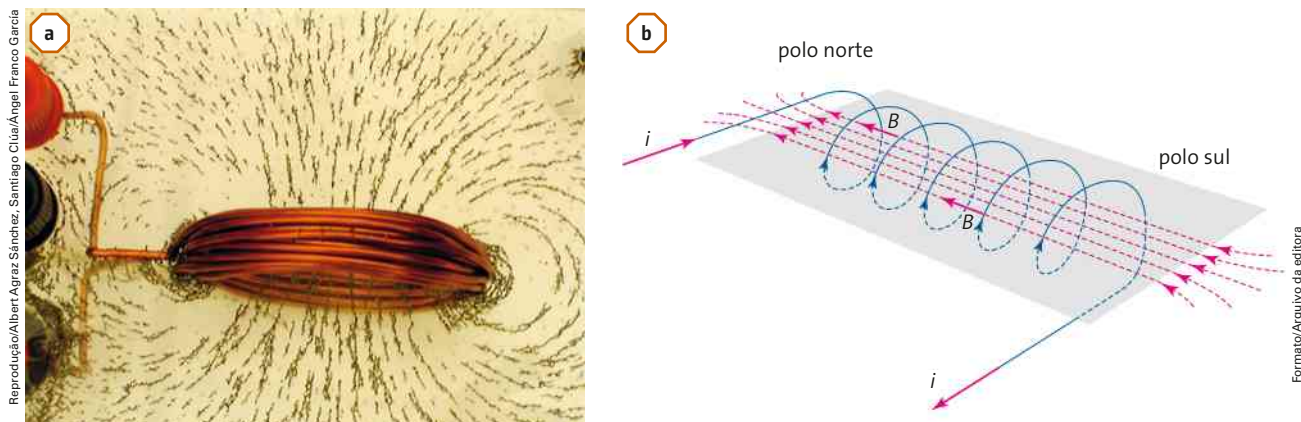


Figura 6.19 Em a, a limalha de ferro indica o campo magnético gerado por um solenoide percorrido por corrente elétrica (i). Em b, representação (sem escala e em cores fantasia) do campo magnético (B).

Vamos considerar a situação em que o comprimento (L) predomina em relação ao diâmetro (d) do cilindro. Nesse caso, o campo magnético no interior do solenoide é praticamente uniforme; há apenas uma distorção nas extremidades.

Na região externa ao cilindro, o campo magnético é praticamente nulo. Na interna, a intensidade do campo magnético é:

$$B = \frac{n}{L} \cdot \mu i$$

Nessa expressão, n é o número de voltas e L é o comprimento do cilindro. É comum conhecermos de antemão o quociente $\frac{n}{L}$, que é a quantidade de voltas por unidade de comprimento.

Na [figura 6.20.a](#), temos um arranjo experimental para a medição do valor do campo magnético (em um ponto no interior do solenoide) em função da corrente elétrica que passa por ele. Se colocarmos um núcleo de ferro no interior do solenoide, a intensidade do campo magnético aumentará consideravelmente. Esse processo é usado na construção de eletroímãs, como mostra a [figura 6.20.b](#).

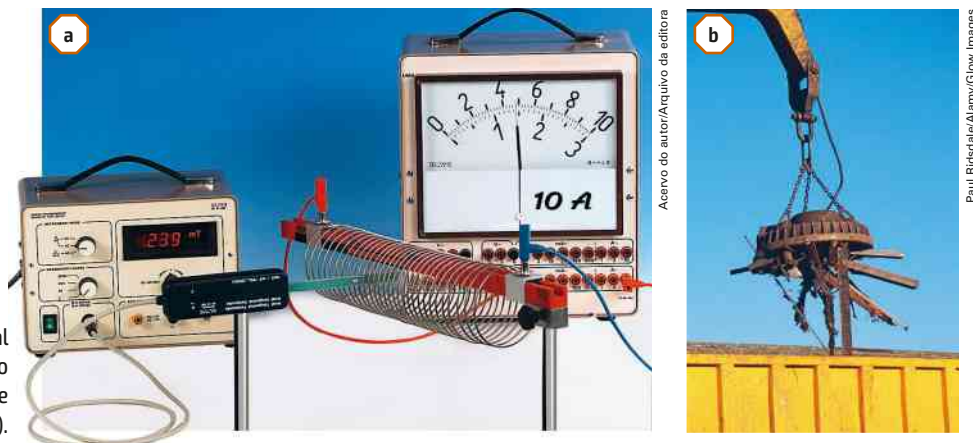


Figura 6.20 Arranjo experimental para a medição do campo magnético em função da corrente elétrica (a). Eletroímã (b).



O magnetismo das moscas

O estudo do comportamento de organismos frente a campos magnéticos tem sido feito intensamente desde meados do século passado. Assim, verificou-se, por exemplo, que os pombos-correios podem se orientar pelo campo da Terra e que as trutas têm partículas de mineral magnético na região próxima ao bulbo olfativo. Entretanto, a descoberta das bactérias magnéticas, em 1975, foi o único caso em que um receptor de campo magnético (ou magnetorreceptor) foi identificado, e seu efeito na orientação dos microrganismos comprovado inequivocamente.

Bactérias magnéticas vivem em ambientes aquáticos e seu movimento sofre efeito direto de um campo magnético. No interior delas, existe uma cadeia linear de cristais nanométricos de magnetita, responsáveis pela sua orientação, agindo como se fossem a agulha de uma bússola. Mesmo quando a bactéria está morta, é possível orientá-la com um ímã, embora ela não possa mais nadar.

Agora, um estudo feito com moscas-das-frutas coloca mais uma peça importante nesse cenário complexo: uma proteína sensível a certas frequências de luz tem papel chave na sensibilidade desse inseto ao campo magnético.



Studio touch/Shutterstock/Glow Images

FARINA, Marcos. *Ciência Hoje*. v. 42, n. 252, set. 2008.

Mosca-das-frutas (*Drosophila melanogaster*).

1. Indique a afirmativa correta:

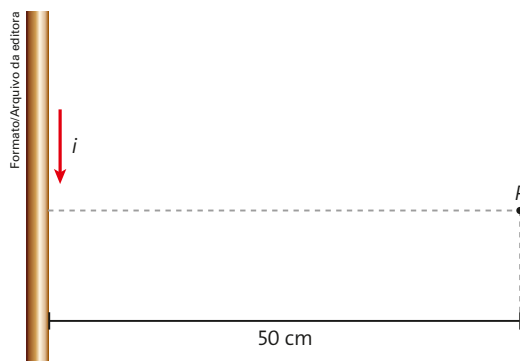
- a) Pombos e trutas não são sensíveis ao campo magnético da Terra.
- b) Pombos-correios possuem pequenos ímãs nos pés.
- c) Bactérias magnéticas vivem em ambientes aquáticos e perdem a magnetização quando morrem.
- d) No interior das bactérias magnéticas há pequenos cristais de magnetita que funcionam como bússola.
- e) A luz não muda as propriedades magnéticas das moscas-das-frutas.

2. O texto dá a entender que:

- a) os efeitos do campo magnético da Terra nos pombos-correios é assunto totalmente dominado pelos cientistas.
- b) o único caso de magnetorreceptor, por enquanto, foi identificado em algumas bactérias.
- c) o estudo dos efeitos dos campos magnéticos em moscas mostrou que elas não dependem da luz.
- d) bactérias magnéticas ingeridas pelas moscas são responsáveis pela sua orientação espacial.
- e) campos magnéticos modificam o sentido do olfato nas trutas.

Exercícios

6. Um fio retilíneo e longo é percorrido por uma corrente elétrica com intensidade de 4 A, conforme mostra a figura ao lado (sem escala e em cores fantasia). Determine o vetor campo magnético em um ponto P situado a 50 cm do fio. Considere que o meio em que se encontra o fio é o vácuo. **Intensidade: $B = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ T}$; direção: perpendicular ao plano do papel; sentido: saindo do plano do papel.**



7. Em torno de um cilindro de 10 cm de comprimento foi enrolado uniformemente um fio, com revestimento isolante, perfazendo 2000 voltas completas ao longo dele (solenóide). Foi estabelecida no fio uma corrente elétrica com intensidade de 10 A. **a) O campo na parte externa de um solenoide é nulo.**
- Qual é a intensidade do campo magnético em um ponto externo ao cilindro, situado longe das bordas?
 - Qual será a intensidade do vetor campo magnético no interior do solenoide se nele houver apenas ar? ($\mu_{\text{ar}} = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$) **$B_{\text{ext.}} = 8\pi \cdot 10^{-2} \text{ T}$**
 - Qual será a intensidade do vetor campo magnético se inserirmos, no interior do cilindro, um núcleo cuja permeabilidade magnética seja 100 vezes a do vácuo? **$B_{\text{int.}} = 8\pi \text{ T}$**
8. Uma espira circular tem raio 2 cm e é atravessada por uma corrente de 0,5 A, no sentido horário. Sendo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, caracterize o campo magnético no centro da espira. **Ver resposta no Manual do Professor.**
9. Dois fios paralelos e longos, separados por 2 m, são atravessados por correntes de 2 A, no mesmo sentido. Determine a intensidade do campo magnético nos pontos equidistantes dos fios. **Nulo.**
10. Um fio é enrolado em um carretel de raio 5 cm. O número total de espiras é 1000 e o fio é percorrido por uma corrente de 10 A. Sendo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, determine a intensidade do campo magnético no centro do carretel, nos seguintes casos:
- o comprimento do carretel é 10 cm; **$B = 4\pi \cdot 10^{-2} \text{ T}$**
 - o comprimento do carretel é 1 m. **$B = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ T}$**
11. (PUC-SP) Na experiência de Oersted, o fio de um circuito passa sobre uma agulha de uma bússola. Com a chave C aberta, a agulha alinha-se como mostra a figura 1. Fechando-se a chave C , a agulha da bússola assume nova posição (figura 2).

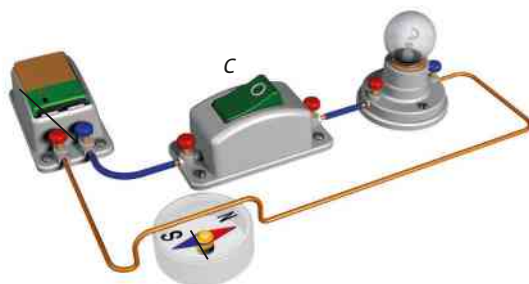


figura 1

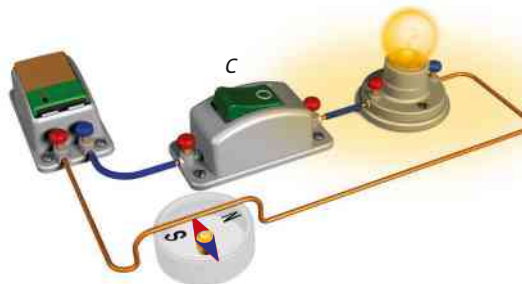


figura 2

Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

A partir desse experimento, Oersted concluiu que a corrente elétrica estabelecida no circuito:

- gerou um campo elétrico numa direção perpendicular à da corrente.
- X** gerou um campo magnético numa direção perpendicular à da corrente.
- gerou um campo elétrico numa direção paralela à da corrente.
- gerou um campo magnético numa direção paralela à da corrente.
- não interfere na nova posição assumida pela agulha da bússola, que foi causada pela energia térmica produzida pela lâmpada.



3 Força magnética sobre cargas elétricas

As manifestações magnéticas se revelam por meio de forças. Este tópico trata da quantificação das forças magnéticas que atuam sobre as cargas elétricas em movimento.

A denominação força magnética é muitas vezes substituída por força de Lorentz, em homenagem ao físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), um dos ganhadores do Prêmio Nobel de Física de 1902 e um dos precursores da teoria da relatividade.

Vamos analisar o efeito de um campo magnético sobre uma carga elétrica móvel. Para isso, consideremos uma carga elétrica q deslocando-se com velocidade $\vec{v}$ em relação às linhas de um campo magnético uniforme $\vec{B}$ (figura 6.21).

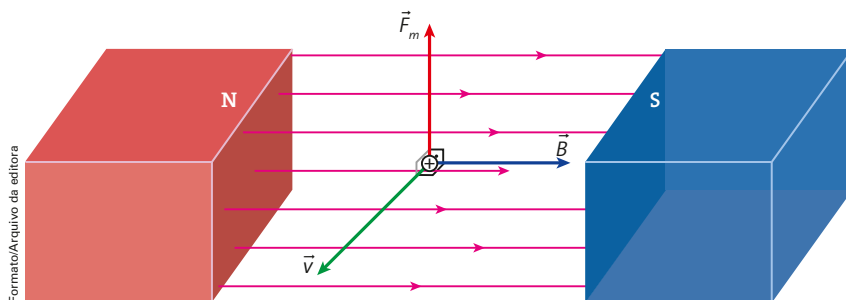


Figura 6.21 Representação da força magnética ($\vec{F}_m$) que age em uma carga q em movimento com velocidade ($\vec{v}$) em um campo magnético ($\vec{B}$).

A força magnética $\vec{F}_m$ que age sobre a carga móvel (q) apresenta as seguintes características:

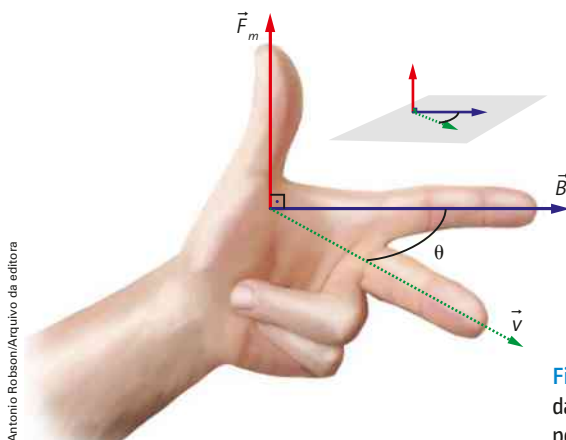
- é sempre perpendicular ao vetor velocidade ($\vec{v}$);
- é sempre perpendicular ao vetor campo magnético ($\vec{B}$).

Assim, a força magnética é perpendicular ao plano determinado pelos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$. Conhecendo as direções e os sentidos dos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$, podemos determinar a direção e o sentido do vetor força magnética $\vec{F}_m$ pela chamada regra da mão esquerda. A figura 6.22 ilustra a aplicação dessa regra para uma carga elétrica positiva. Caso a carga seja negativa, devemos inverter o sentido do vetor que representa a força magnética.

A intensidade da força magnética é dada por:

$$F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$$

Nessa expressão, θ é o ângulo entre os vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$.

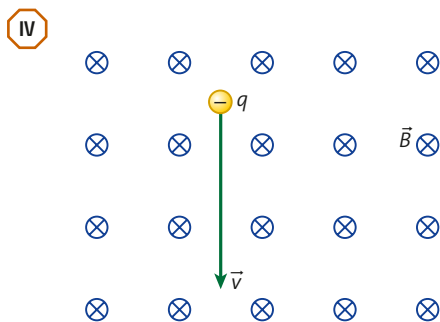
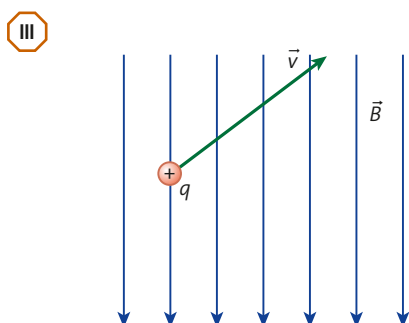
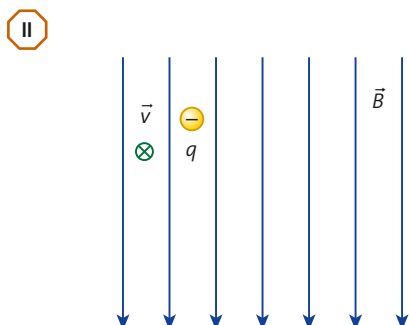
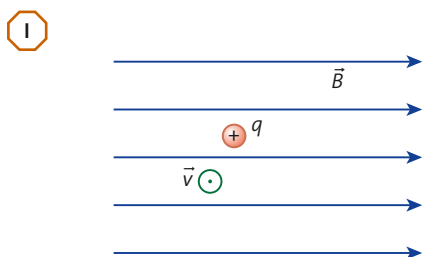


As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Figura 6.22 Representação esquemática da regra da mão esquerda para uma carga positiva.

Exercícios

12. As figuras a seguir representam quatro situações em que uma carga elétrica é lançada para dentro de um campo magnético uniforme. Em I, a velocidade ($\vec{v}$) é perpendicular ao plano do papel e orientada para fora. Em II, a velocidade ($\vec{v}$) é perpendicular ao plano do papel e orientada para dentro.



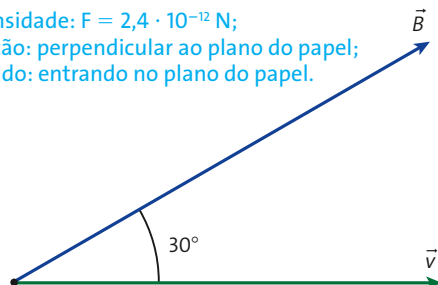
Ver resposta no Manual do Professor.

Em cada um dos casos, determine a direção e o sentido da força magnética atuante sobre a partícula eletrizada em movimento.

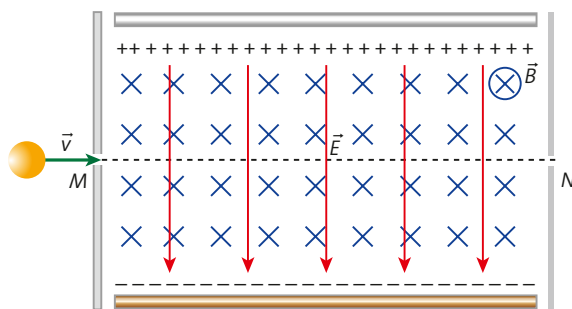
13. Em dado instante, um elétron se desloca com velocidade $v = 2,0 \cdot 10^6$ m/s, com direção e sentido indicados na figura. Na região em que o elétron se desloca existe um campo magnético $\vec{B}$ de intensidade 15 T, com direção e sentido também representados na figura. Determine o módulo, a direção e o sentido da força magnética que atua nessa partícula. Dados:

$$\sin 30^\circ = \frac{1}{2}; \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Intensidade: $F = 2,4 \cdot 10^{-12}$ N;
direção: perpendicular ao plano do papel;
sentido: entrando no plano do papel.



14. Em um arranjo conhecido como “seletor de velocidade”, um feixe de íons positivos com diferentes massas, mas todos com a mesma carga, penetra através do orifício M em uma região em que atuam campos uniformes, um magnético $\vec{B}$ e um elétrico $\vec{E}$, perpendiculares entre si, conforme ilustra a figura (sem escala e em cores fantasia).



Sabendo-se que as intensidades dos campos são $B = 2,0 \cdot 10^{-3}$ T e $E = 4,0 \cdot 10^3$ V/m e que somente alguns íons emergem pelo orifício N, qual é a velocidade dos íons emergentes? Despreze as ações gravitacionais. $v = 2,0 \cdot 10^6$ m/s

15. Uma partícula eletrizada com carga de $1 \mu\text{C}$ é lançada em um campo magnético de intensidade 2 T, com velocidade 2,5 m/s. Determine a intensidade da força magnética para os ângulos de lançamento:
- a) 30° $F_m = 2,5 \cdot 10^{-6}$ N b) 90° $F_m = 5,0 \cdot 10^{-6}$ N
16. Em relação ao problema anterior, determine os ângulos de lançamento da partícula para os quais a força magnética é nula. 0° ou 180°



4 Movimentos de cargas em campos magnéticos uniformes

A trajetória de uma carga elétrica sob a ação exclusiva de um campo magnético uniforme depende de como ela é lançada dentro do campo; ou seja, depende do ângulo θ determinado pelos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$. Vamos analisar três casos de lançamento: paralelo ($\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$), perpendicular ($\theta = 90^\circ$) e oblíquo ($\theta \neq 90^\circ$ e $0^\circ < \theta < 180^\circ$).

Lançamento paralelo ao campo magnético ($\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$)

Nesse caso, a força magnética é nula. Como, por hipótese, a força magnética é a única que atua sobre a carga, então, por inércia, o movimento da carga dentro do campo é retilíneo e uniforme (figura 6.23).

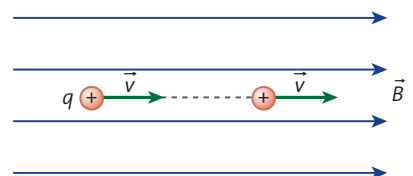


Figura 6.23 Lançamento paralelo ao campo magnético.

Banco de imagens/Arquivo da editora

Lançamento perpendicular ao campo magnético ($\theta = 90^\circ$)

Nesse caso, a força magnética que atua sobre a carga elétrica tem módulo constante, e sua direção é sempre perpendicular à do vetor campo magnético; então o movimento da carga elétrica é circular e uniforme (figura 6.24).

A força magnética modifica a direção e o sentido do vetor velocidade, sem alterar o seu módulo; e, em cada ponto, ela continua perpendicular à direção do movimento. A figura 6.25 ilustra uma carga positiva nessa situação.

Intensidade da força magnética: $F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$

Nesse caso, $\theta = 90^\circ$ ($\sin 90^\circ = 1$); logo: $F_m = |q| \cdot v \cdot B$

Como a força magnética corresponde à resultante centrípeta ($F_m = R_c$) e $R_c = m \cdot \frac{v^2}{R}$, obtemos:

$$m \cdot \frac{v^2}{R} = |q| \cdot v \cdot B \Rightarrow R = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B}$$

Partículas de mesma carga e com a mesma velocidade, mas de massas diferentes, descrevem diferentes arcos de circunferência num mesmo campo magnético. Essa propriedade é utilizada em instrumentos para a análise de substâncias, como ocorre, por exemplo, no exame *antidoping*, em que os componentes são separados, segundo a sua massa molecular, em um aparelho chamado espectrômetro de massa.

Podemos calcular também o período, ou seja, o tempo que a partícula leva para dar uma volta completa na sua trajetória circular.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{2\pi \cdot R}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi \cdot R}{v} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B} \Rightarrow T = \frac{2\pi \cdot m}{|q| \cdot B}$$



Figura 6.24 Lançamento perpendicular ao campo magnético.

Sciencenotes/Alamy/Glow Images

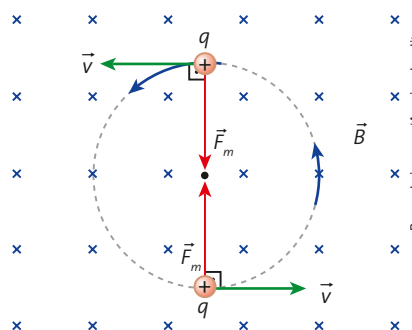


Figura 6.25 Observe que a força magnética é a resultante centrípeta.

Banco de imagens/Arquivo da editora

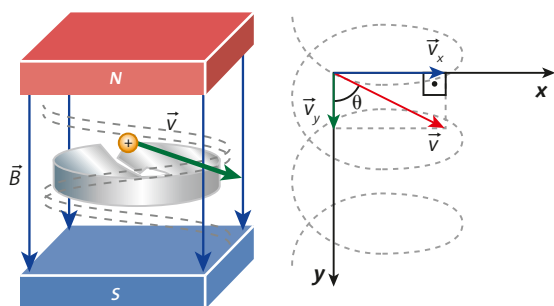


Figura 6.26 Trajetória vista por um observador posicionado lateralmente ao campo magnético. Representação esquemática.

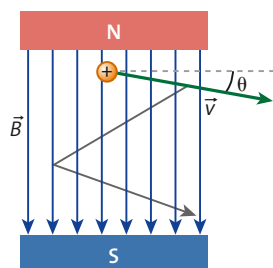


Figura 6.27 A velocidade é oblíqua em relação ao campo magnético. Representação esquemática.

Lançamento oblíquo ao campo magnético ($\theta \neq 90^\circ$ e $0^\circ < \theta < 180^\circ$)

Vamos agora aplicar os conceitos de composição de movimentos que estudamos. A **figura 6.26** ilustra, em perspectiva, o vetor velocidade, decomposto em v_x e v_y .

$$v_y = v \cdot \cos \theta$$

$$v_x = v \cdot \sin \theta$$

Em razão da componente perpendicular ao campo magnético (v_y), a partícula executa um movimento circular e uniforme (conforme vimos no item anterior); ao mesmo tempo, em virtude da componente paralela ao campo (v_x), ela executa um movimento retilíneo e uniforme.

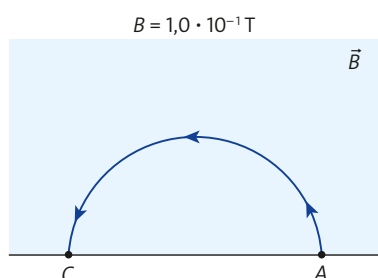
Compondo os dois movimentos, pois eles acontecem simultaneamente, obtemos uma trajetória que acompanha a superfície de um cilindro. É uma curva tridimensional, denominada hélice cilíndrica, a qual não deve ser confundida com a espiral, que é uma curva plana.

Um observador situado no polo norte do ímã visualizaria uma trajetória circular. Se ele se posicionasse lateralmente, veria a trajetória em zigue-zague representada na **figura 6.27**.

Exercícios



- 17.** Um íon de massa $8,0 \cdot 10^{-27}$ kg e carga $1,6 \cdot 10^{-19}$ C entra na câmara de um espectrômetro de massa com uma energia cinética de $1,6 \cdot 10^{-16}$ J, após ter sido acelerado por uma ddp.



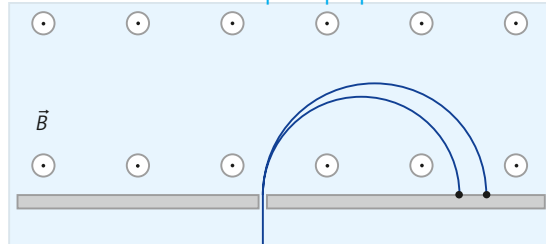
Depois de descrever a trajetória ilustrada na figura, o íon atinge o ponto C de uma chapa fotográfica distante de A:

- a) 0,10 cm d) 10 cm
x b) 1,0 cm e) 20 cm
 c) 2,0 cm

- 18.** Uma partícula eletrizada com carga q é lançada com velocidade v , perpendicularmente a um campo magnético uniforme, de intensidade B , realizando movimento circular uniforme. Qual é o trabalho da força magnética enquanto a partícula percorre meia-volta?

- 19.** Duas partículas eletrizadas com a mesma carga têm massas ligeiramente diferentes e são lançadas em um campo magnético uniforme, com a mesma velocidade, executando os movimentos indicados na figura. Qual delas tem maior massa?

A partícula de maior massa é aquela que percorre o maior raio.



- 20.** Considere uma partícula eletrizada, em movimento retilíneo uniforme, sob a ação de um campo elétrico de intensidade E e de um campo magnético de intensidade B . Sabendo-se que o movimento é perpendicular ao campo magnético, qual é o valor absoluto da velocidade da partícula? $v = \frac{E}{B}$

- 21.** Uma partícula eletrizada negativamente ($-q$) é lançada com velocidade v , formando 30° com um campo magnético de intensidade B . Descreva o movimento helicoidal da partícula, calculando o raio da hélice.

$$\tau = 0$$

$$R = \frac{mv}{2qB}$$



Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

Força magnética sobre condutores

Estudaremos agora não uma, mas várias cargas em movimento sob a ação de um campo magnético uniforme. Essas várias cargas estão confinadas em um fio e constituem uma corrente elétrica (i). Veja a [figura 6.28](#).

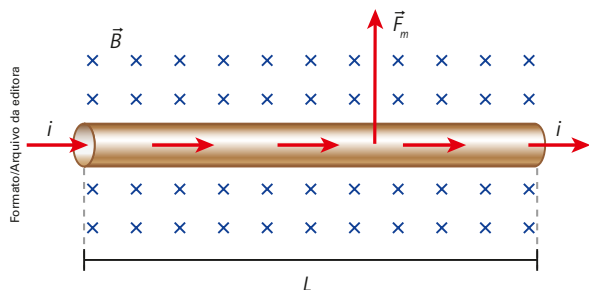


Figura 6.28 Condutor percorrido por uma corrente elétrica e submetido a um campo magnético. Representação esquemática.

Sendo L o comprimento do fio e v a velocidade dos portadores de carga, escrevemos:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{L}{\Delta t}$$

Como $F_m = |\Delta q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$, temos:

$$F_m = |\Delta q| \cdot \frac{L}{\Delta t} \cdot B \cdot \sin \theta$$

Lembrando que $i = \frac{|\Delta q|}{\Delta t}$, concluímos que, em módulo, a força magnética é:

$$F_m = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta$$

A direção da força magnética é perpendicular ao plano determinado pela reta que contém o fio e pela reta que contém o vetor campo magnético. O sentido pode ser obtido pela regra da mão esquerda, na qual o vetor velocidade é substituído pelo sentido da corrente elétrica.

Na [figura 6.29](#) é a força magnética que empurra o pequeno condutor que pende da haste.

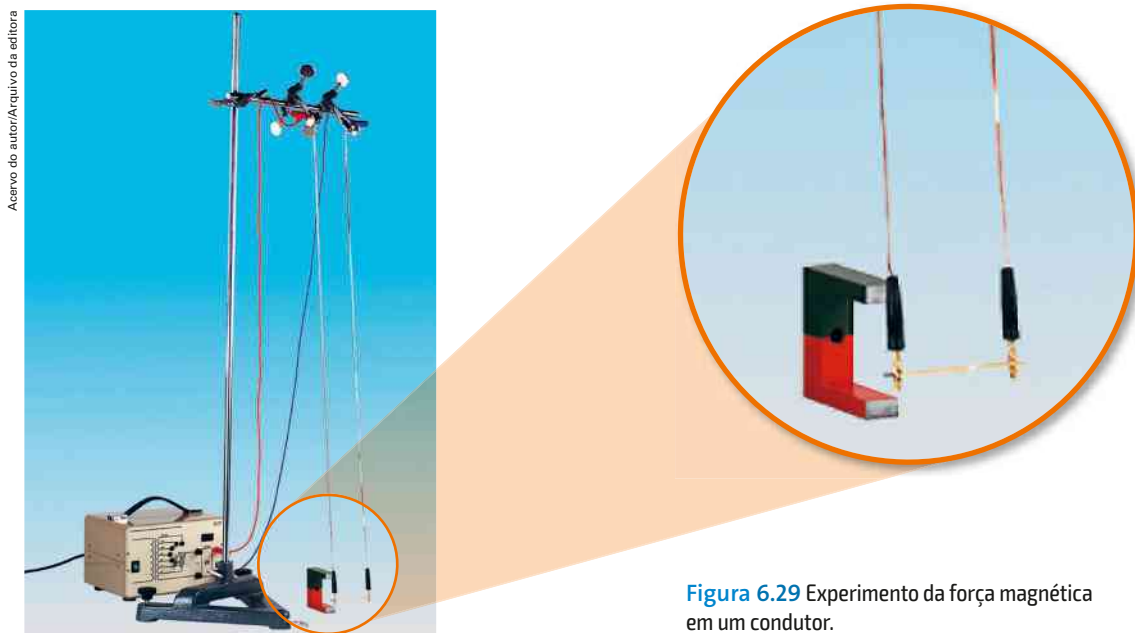
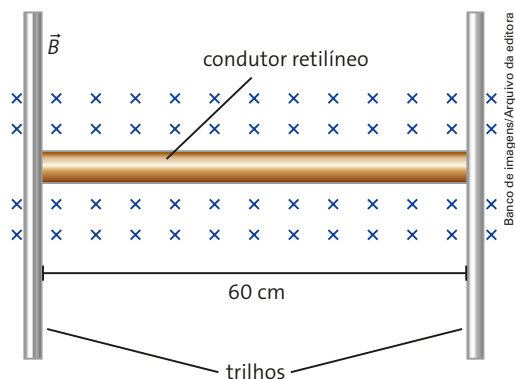


Figura 6.29 Experimento da força magnética em um condutor.

Exercícios

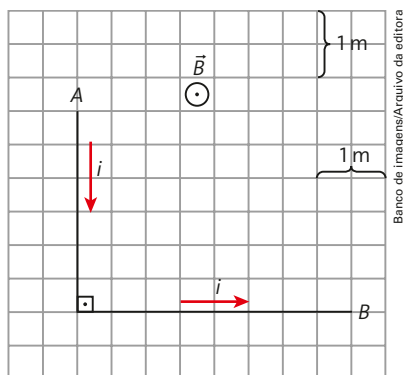
22. Um fio retilíneo de comprimento 2 cm forma 30° com a direção de um campo magnético de intensidade 0,5 T. Caso o fio seja atravessado por uma corrente de 3 A, qual será a intensidade da força magnética aplicada nele? $F_m = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$

23. Um condutor retilíneo possui contatos que podem deslizar por trilhos, como está esquematizado na figura. O condutor está na horizontal e sobre ele atuam exclusivamente a força magnética e a gravitacional. Se o peso do condutor é 6 N, qual deverá ser a intensidade da corrente elétrica e seu sentido no interior do condutor para que ele fique em equilíbrio sob ação do campo magnético $B = 2 \text{ T}$?



Intensidade: 5 A; sentido: da esquerda para a direita (regra da mão direita).

24. O condutor AB da figura a seguir está imerso numa região onde atua um campo de indução magnética B de intensidade 0,5 T, perpendicular ao plano desta folha e orientado para o leitor. O condutor é percorrido por uma corrente $i = 2 \text{ A}$.



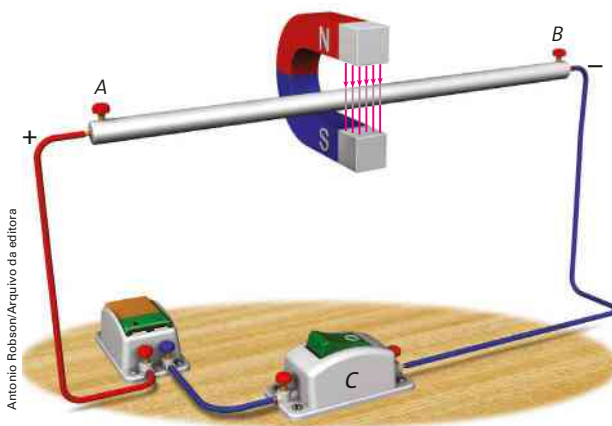
A intensidade da força magnética que atua sobre o condutor é:

- ☒ a) 5 N
- b) 4 N
- c) 2 N
- d) 1 N
- e) zero

25. Um fio de 20 cm é disposto paralelamente a um campo magnético de intensidade 0,5 T. Se o fio for percorrido por 0,25 mA, qual será a intensidade da força magnética a que ficará submetido? $F_m = 0 \text{ N}$

26. Um fio reto de comprimento L e massa m é colocado perpendicularmente a um campo magnético de intensidade B . Sabe-se que, nessas condições, a força magnética é equilibrada pelo peso do fio. Sendo g a aceleração da gravidade, dê a expressão da corrente que deve circular pelo fio. $i = \frac{mg}{BL}$

27. (Vunesp-SP) A figura mostra um fio metálico AB suspenso entre os polos de um ímã por meio de dois fios condutores leves e flexíveis, ligados a uma bateria e a uma chave C .



O fio AB está colocado perpendicularmente às linhas de campo magnético $\vec{B}$. Desprezando a presença de outros campos magnéticos, podemos afirmar que, ao ser fechada a chave C :

- a) não aparecerá nenhuma força adicional atuando no fio.
- ☒ b) aparecerá uma força magnética atuando no fio, perpendicularmente ao plano da figura e penetrando na página.
- c) aparecerá uma força magnética atuando no fio, perpendicularmente ao plano da figura e apontando para o leitor.
- d) aparecerá uma força magnética atuando na direção do fio e sobre ele e que aponta para a esquerda do leitor.
- e) aparecerá uma força magnética atuando na direção do fio e sobre ele e que aponta para a direita do leitor.

Hans Christian Oersted

Hans Christian Oersted, um dos principais cientistas do século XIX, nasceu em Rudkøbing, Dinamarca, em 1777, e morreu em Copenhague, Dinamarca, em 1851. Em 1820, fez uma descoberta crucial para o eletromagnetismo, ao observar que a agulha de uma bússola sofre a ação de uma corrente elétrica próxima a ela.

Isso mostrou que eletricidade e magnetismo eram fenômenos correlatos, um fato essencial para o desenvolvimento posterior do eletromagnetismo que possibilitou tecnologias como a do rádio, da televisão e das fibras ópticas. Por essa razão, a unidade de intensidade de campo magnético recebeu o nome de Oersted.

Hans Christian Oersted era filho de Søren Christian Oersted e Karen Hermandsen. Seu pai era farmacêutico em Rudkøbing. Hans e seu irmão Anders Sandøe Oersted (1778-1860), mais tarde professor de Jurisprudência e Política, educaram-se com aulas particulares que os habilitaram a ir para Copenhague. Lá ambos mostraram excepcionais qualidades, as quais moldaram suas vidas futuras.

O interesse de Hans pela ciência começou na farmácia do pai. Em 1797 ele passou no exame para farmacêutico com distinção. Em 1796 e 1797 publicou artigos premiados em Estética e Medicina. Dois anos depois obteve o doutorado com uma dissertação sobre Kant.

Depois de 1800 ele estudou o novo galvanismo. No verão de 1801 foi agraciado com uma bolsa para passar três anos visitando a Alemanha e a França. Nessa viagem, teve contato com o físico alemão Johann Wilhelm Ritter (1776-1810), que o influenciou fortemente. Durante esse tempo, aprofundou-se nos estudos do trabalho de Kant e de Filosofia da natureza.

De volta para casa, em 1806, tornou-se professor da Universidade de Copenhague, onde começou a pesquisar correntes elétricas. Ele foi o verdadeiro fundador dos estudos de Física da Escola de Copenhague.

Entre 1812 e 1813, fez nova viagem, passando por Alemanha, França e Bélgica. De volta para casa, casou-se com Brigitte Ballum, com quem viveu harmoniosamente e teve cinco filhas e três filhos.

De 1815 até a sua morte foi secretário da Academia Real Dinamarquesa de Ciências e Letras.

Durante uma aula, em abril de 1820, Oersted descobriu a evidência experimental da relação entre eletricidade e magnetismo. Enquanto preparava um experimento, notou algo que o surpreendeu: a bússola que deixara próxima de um fio condutor percorrido por corrente elétrica não permanecia na direção do campo magnético da Terra, sendo movida por ação dessa corrente. Esse fenômeno havia sido descoberto em 1802 pelo jurista italiano Gian Domenico Romagnosi (1761-1835), mas seu anúncio fora ignorado.

Em julho de 1820, Oersted escreveu um artigo relatando sua descoberta. Esse artigo foi publicado nos mais importantes periódicos científicos. A descoberta foi imediatamente reconhecida como um grande avanço científico e aprimorada por André-Marie Ampère. Oersted trabalhou, também, com compressibilidade de gases e líquidos.

Oersted acreditava que a ciência devia ser amplamente divulgada e para isso criou a "Sociedade para a disseminação da ciência natural". Por sua iniciativa, o Instituto Politécnico de Copenhague foi criado em 1829.

Além disso, Oersted produziu obras literárias e era um grande interessado no estudo do idioma dinamarquês.



Sheila Terry/SPL/Latinstock

Retrato de Hans Christian Oersted (1777-1851).

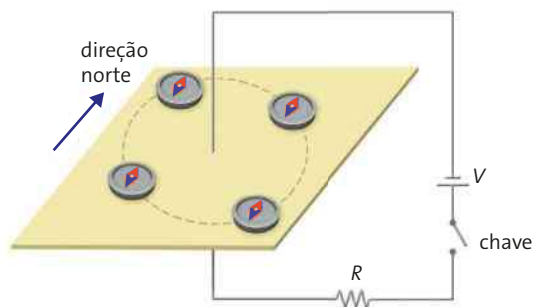
Retomando

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

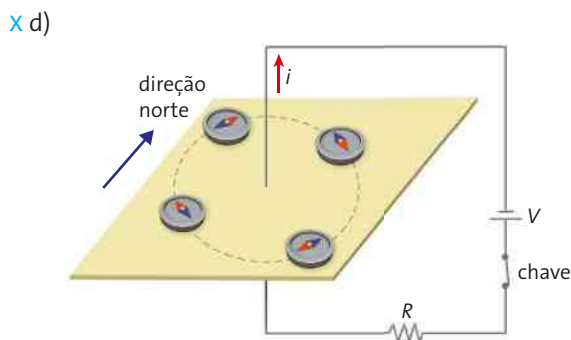
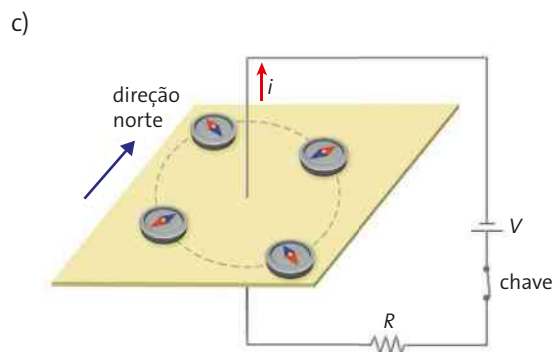
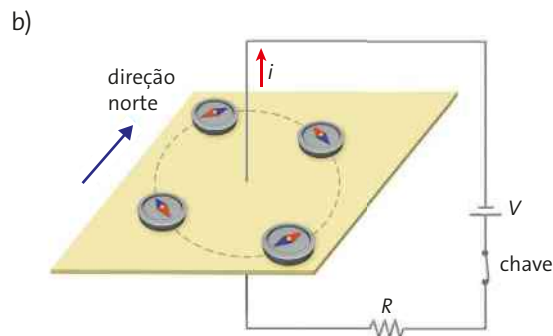
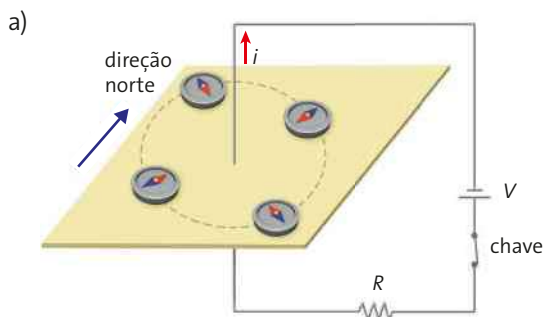
28. (UFV-MG) Aline estava em sua casa realizando um trabalho de Ciências. Ela dispunha de um ímã em forma de barra, um clipe de aço, uma placa de alumínio, uma borracha, um prego e um fio de cobre. Ao aproximar o ímã dos materiais de que dispunha, ela percebe que:

- a) o ímã atrai o prego com apenas um de seus polos.
- b) o ímã atrai o clipe de aço, a placa de alumínio, o prego e o fio de cobre.
- X c)** o prego fica imantado, atraindo o clipe quando está encostado no ímã.
- d) o ímã cai, quebra-se ao meio e separa-se em dois polos diferentes.

29. (UFRN) Visando a discutir os efeitos magnéticos da corrente elétrica sobre quatro pequenas bússolas postas sobre uma placa, um professor montou, em um laboratório didático, o dispositivo experimental representado na figura abaixo.



Inicialmente, com a chave desligada, as bússolas ficam orientadas exclusivamente pela ação do campo magnético terrestre. Ao ligar a chave e fazer circular uma corrente elétrica no circuito, esta irá produzir um campo magnético muito mais intenso que o terrestre. Com isso, as bússolas irão se orientar de acordo com as linhas desse novo campo magnético. Das representações a seguir, a que melhor representa o efeito do campo magnético produzido pela corrente sobre as bússolas é:



30. Dois fios retilíneos e de tamanho infinito, que conduzem correntes elétricas i_1 e i_2 em sentidos opostos, são dispostos paralelamente um ao outro, como mostra a figura abaixo. A intensidade de i_1 é a metade da intensidade de i_2 e a distância entre os fios ao longo da linha ox é d .



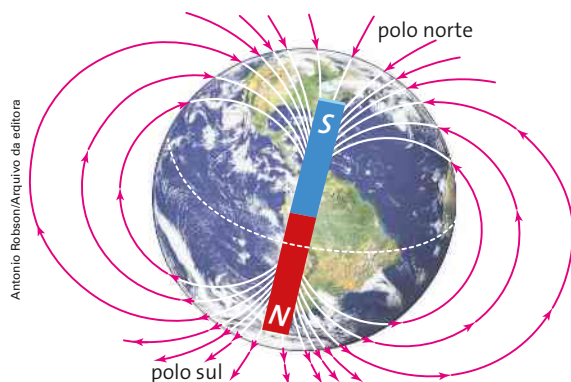
Considere as seguintes proposições sobre os campos magnéticos produzidos pelas correntes i_1 e i_2 nos pontos localizados ao longo da linha ox :

- I. À esquerda do fio 1 não existe ponto no qual o campo magnético resultante seja nulo.
- II. Nos pontos localizados entre o fio 1 e o fio 2, os campos magnéticos produzidos por ambas as correntes têm o mesmo sentido.
- III. À direita do fio 2 existe um ponto no qual o campo magnético resultante é nulo.
- IV. O campo magnético resultante é nulo no ponto que fica à distância $\frac{3d}{4}$ à esquerda do fio 2.

Assinale a alternativa correta.

- a) Somente as afirmativas II e III são verdadeiras.
- b) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.
- c) Somente a afirmativa III é verdadeira.
- ☒ d) Somente a afirmativa II é verdadeira.
- e) Somente a afirmativa IV é verdadeira.

31. (UnB-DF)



A figura acima ilustra, de maneira esquemática, as linhas do campo magnético da Terra no espaço que a circunda. A barra mostrada no meio do planeta representa um ímã que geraria um campo equivalente ao da Terra.

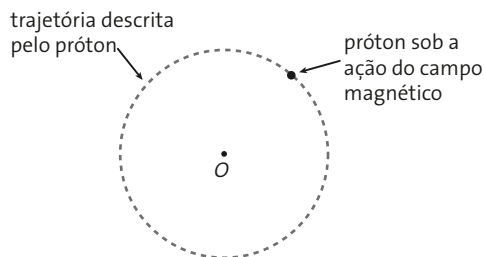
Com base nessas informações, julgue os itens abaixo.

- I. Segundo a figura, o polo norte geográfico corresponde ao polo norte magnético do ímã, uma vez que, no polo norte, as linhas do campo magnético estão **entrando** na Terra. **Incorreta.**
- II. Considerando que o campo magnético da Terra seja equivalente ao campo gerado por uma espira circular percorrida por uma corrente constante, com o eixo central coincidindo com a reta que une os polos sul e norte, é correto inferir que, ao aplicar

a regra da mão direita para o sentido de rotação da corrente na espira, o dedo polegar apontará para o polo sul. **Incorreta.**

- III. Uma partícula carregada, lançada paralelamente às linhas de campo mostradas na figura, sofrerá um desvio de 90° devido à ação de uma força magnética. **Incorreta.**

32. (Ueap) No último mês de setembro [de 2008] entrou em funcionamento no Cern (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, localizado na Suíça) o maior acelerador de partículas do mundo, o LHC (Large Hadron Collider), com um anel de colisão com cerca de 27 km de circunferência e 8,6 km de diâmetro, instalado num túnel subterrâneo, numa zona de fronteira da Suíça com a França. São 27 quilômetros de túneis que visam a colidir dois feixes de prótons a 99,9% da velocidade da luz, guiados pela ação de campos magnéticos muito elevados. Imagine, numa situação análoga, um próton percorrendo uma trajetória circular sob a ação de um campo magnético uniforme, com velocidade constante, conforme a figura.



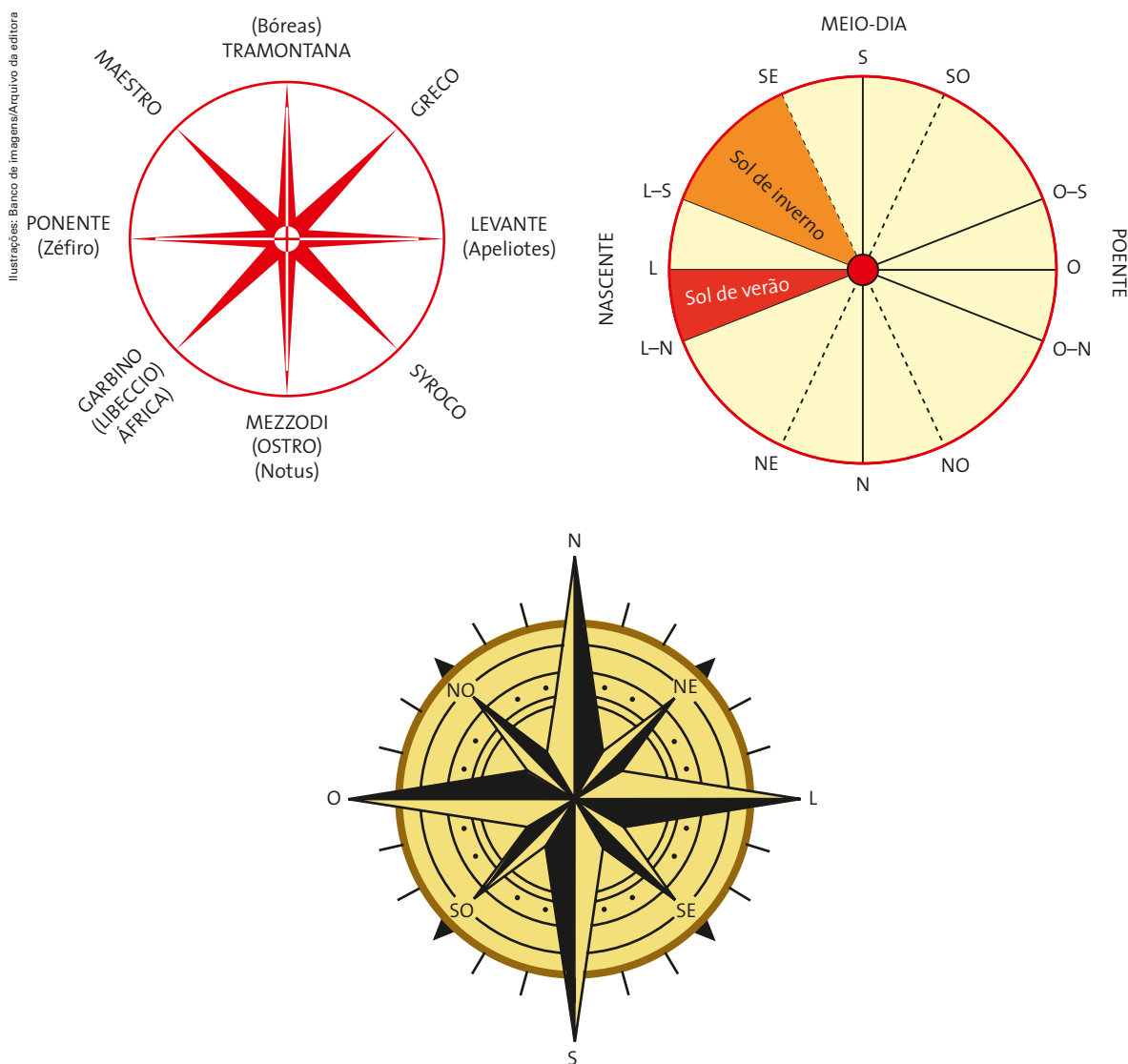
As afirmativas abaixo são feitas com base na situação exposta anteriormente. Levando em conta a geometria da figura, analise as afirmativas que vêm a seguir e assinale a alternativa correta.

- I. Se o próton se desloca no sentido anti-horário, então o campo magnético está orientado perpendicularmente ao plano da folha, e aponta para dentro.
 - II. Se o próton se desloca no sentido horário, então a direção do campo magnético é tangente à trajetória, no sentido horário.
 - III. Se o campo magnético for perpendicular ao plano da folha, saindo dela, o próton se deslocará no sentido horário.
- a) Todas estão corretas.
 - b) Apenas I e II estão corretas.
 - ☒ c) Apenas I e III estão corretas.
 - d) Apenas II e III estão corretas.
 - e) Nenhuma das afirmativas está correta.

As navegações e a bússola

A história da bússola magnética demonstra que a invenção certa no momento certo pode mudar o mundo. Uma grande invenção pode ficar esquecida ou ser usada para fins secundários por um longuíssimo tempo e então, de repente, ser descoberta pelas pessoas certas – gente com visão e espírito empreendedor – e ser aproveitada ao máximo. Quando isso acontece, essas invenções podem mudar o modo como vivemos.

A bússola foi inventada durante a Antiguidade na China, onde não serviu de imediato para aperfeiçoar a navegação. [...] Depois que a ideia da bússola magnética tornou-se amplamente conhecida, no fim do século XII, o terreno estava preparado para que essa invenção fosse utilizada na navegação, em que poderia produzir o maior benefício. Por acaso, havia na época uma potência marítima na Europa que foi capaz de pôr a bússola em uso – e aperfeiçoá-la o bastante para que pudesse ser empregada com eficiência na navegação para indicar todas as direções, não apenas o norte e o sul.



O desenvolvimento da rosa dos ventos: os oito ventos do Mediterrâneo (com seus nomes latinos), os doze ventos da Antiguidade clássica e uma rosa dos ventos de bússola contemporânea.

[...] A revolução tecnológica que criou a bússola conduziu também aos mapas e postulados, e com esses desenvolvimentos vieram navios grandes, viagens frequentes e o resultante aumento da prosperidade.

O estágio seguinte do desenvolvimento mundial veio com a Era das Grandes Navegações, quando Colombo, Vasco da Gama, Magalhães e outros navegadores espanhóis e portugueses conquistaram os oceanos e abriram novas rotas comerciais para lugares antes inacessíveis. Nisso, a bússola magnética encontrou seu uso mais confiável, e muitas vezes exclusivo, como instrumento de navegação. Cartas dos oceanos Atlântico e Pacífico não eram em geral disponíveis a esses corajosos navegantes. A profundidade do mar era desconhecida, e havia pouco conhecimento de margens, ilhas e enseadas. Na vastidão do oceano, um capitão tinha de depender da rosa dos ventos flutuante da bússola magnética e de observações celestes.

A bússola permitiu aos navegadores mapear os oceanos e estabelecer rotas marítimas que cruzavam todo o globo. Usamos as mesmas rotas atualmente, e elas conectam as economias do mundo umas às outras. Navios que viajam através do Pacífico, carregados com milhares de produtos destinados ao Oriente, ainda usam uma bússola não muito diferente da de Magalhães, mesmo considerando que a atual seja operada principalmente por eletricidade (a bússola giroscópica).

[...] A bússola magnética foi a primeira invenção tecnológica depois da roda a mudar o mundo. Desde sua origem na China antiga, através da Idade Média e até nosso tempo, ela foi usada e aperfeiçoada. Hoje, bússolas eletrônicas continuam sendo o instrumento de navegação mais importante em uso em navios e aviões. E, é claro, o Sistema de Posicionamento Global (GPS), que usa satélites, substituiu as observações celestes com o sextante.

ACZEL, Amir D. *Bússola: a invenção que mudou o mundo*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2002. p. 115-118.

A luneta, o sextante e a bússola são instrumentos utilizados na época das Grandes Navegações.



Trabalho com o texto

1. Por que a bússola propiciou um comércio mais intenso entre os povos?
2. Como você explica o funcionamento de uma bússola magnética?
3. Quais os materiais que podem ser usados na confecção da agulha da bússola?
4. Por que é necessária a utilização da rosa dos ventos em uma bússola magnética?

Pesquise e discuta

5. Discuta com seus colegas a seguinte afirmação do autor do texto: “Se o século XX foi a era da revolução da informação e o século XVIII foi o início da Revolução Industrial, o final do século XIII poderia ser propriamente denominado o início da Revolução Comercial.”
6. Pesquise como os navegadores se orientavam no mar antes da utilização da bússola magnética.

UNIDADE

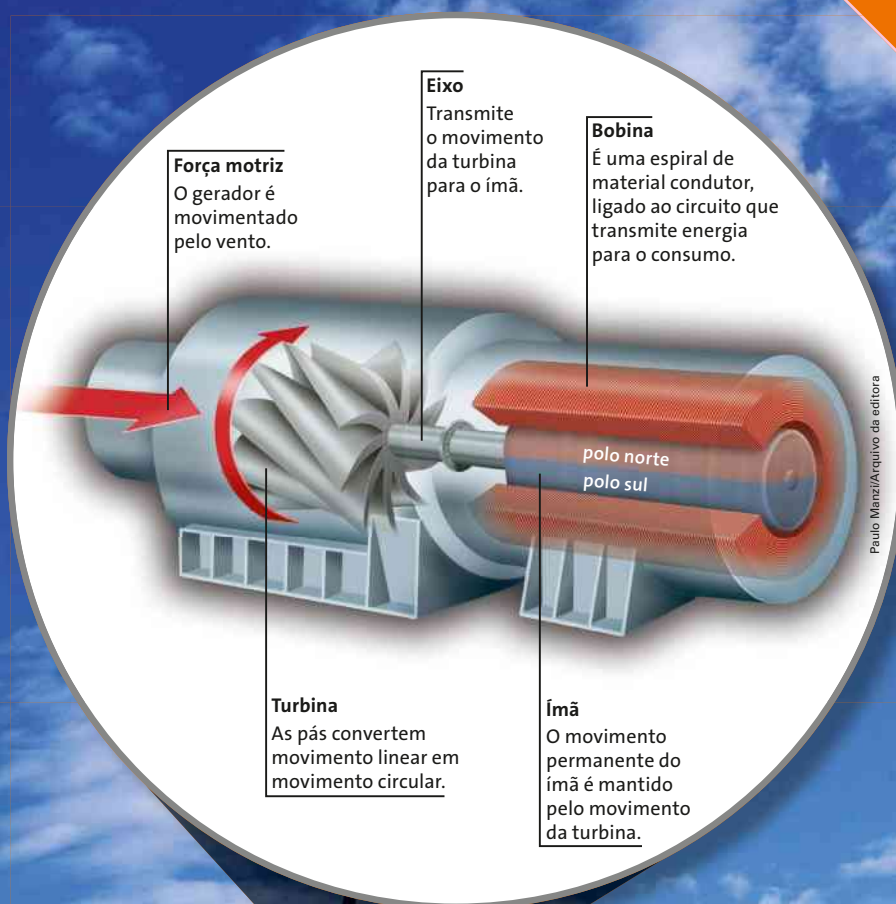
3

Fenômenos eletromagnéticos e a sociedade moderna

Indução eletromagnética

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

Cândido Neto/Opção Brasil Imagens



Gerador eólico (no detalhe, representação esquemática sem escala e em cores fantasia).

O modo mais econômico de distribuir grandes quantidades de energia em grandes extensões territoriais é convertê-la em energia elétrica usando para isso as mais diversas fontes: hidráulica, nuclear, térmica, eólica... Como é feita a conversão das diferentes formas de energia em energia elétrica?

1 Faraday e a indução eletromagnética

Em 1831, Michael Faraday apresentou um artigo científico denominado “Experimental Researches in Electricity” [Pesquisas experimentais em Eletricidade] no qual descreveu, pela primeira vez, o fenômeno da indução eletromagnética. Esse talvez seja o fato histórico mais relevante para o modo de vida da sociedade atual, uma vez que proporcionou dois desenvolvimentos tecnológicos importantes: a possibilidade de conversão, de maneira econômica, da energia mecânica em elétrica e a possibilidade de comunicação, sem suporte material, pelo uso de ondas eletromagnéticas.

Física tem História



Ciência e prática

Uma série de eventos fortuitos na Royal Institution, na Grã-Bretanha, fez com que Faraday se tornasse o novo assistente do cientista Humphry Davy (1778-1829), químico e físico inglês. Logo, ele se transformou no principal experimentador de Davy em eletromagnetismo e, em 1821, conseguiu criar um dispositivo em que uma corrente elétrica provocava o movimento circular de um ímã. Era o início de um trabalho que o levaria à criação do motor elétrico.

Dez anos mais tarde, fez algo mais significativo. Projetou uma máquina que fazia o inverso: o movimento de um magneto gerava corrente elétrica numa bobina formada por um fio enrolado ao ímã. Esse era o princípio do dínamo – um motor em constante rotação, como a máquina a vapor, podia gerar corrente elétrica.

Faraday criou as duas partes da indústria de energia elétrica: a corrente elétrica que gera movimento e o movimento que gera eletricidade.

No início, dínamos e motores elétricos ficavam restritos aos laboratórios ou eram usados como curiosidades para impressionar o público. Porém, na década de 1870, já se havia construído um dínamo capaz de fornecer eletricidade em escala industrial, projeto do engenheiro belga Zénobe Théophile Gramme (1826-1901), que construiu outra máquina quase idêntica operando no sentido contrário e funcionando como um motor elétrico.



The Bridgeman/Keystone

Uma das primeiras fábricas movidas a eletricidade do século XX.

Agora, com a eletricidade disponível em escala industrial, as fábricas podiam usar vapor ou água para girar enormes dínamos e criar energia elétrica, distribuída para motores elétricos menores que acionavam as máquinas, livrando-se da complexidade das correias e polias usadas na conexão de motores a vapor. Até o fim da década, Thomas Edison [inventor norte-americano] (1847-1931) já desenvolvera lâmpadas incandescentes de produção comercialmente viável, e o ambiente de trabalho podia ser iluminado até tarde da noite. A nova tecnologia elétrica anunciava a Segunda Revolução Industrial.

MOSLEY, Michael; LINCH, John. *Uma história da ciência: experiência, poder e paixão*. Rio de Janeiro: Zahar, 2011. p. 174.

- Converse com o professor de História sobre as implicações da Segunda Revolução Industrial na sociedade da época: as relações entre empregado e empregador, a jornada de trabalho, os direitos e deveres civis e trabalhistas, entre outros elementos, comparando-os com a situação atual.

Faraday era um cientista criativo que dominava o trabalho de laboratório. As experiências em eletromagnetismo, de que uma corrente elétrica gera um campo magnético, levaram-no a questionar se seria possível a produção de uma corrente elétrica a partir de um campo magnético ou outra corrente elétrica em um corpo próximo.

Faraday obteve a resposta a essa questão com os seguintes experimentos:

- **Ímã se movimentando em relação a uma bobina:** de uma bobina ligada aos terminais de um galvanômetro, instrumento capaz de indicar a corrente elétrica, aproxima-se e afasta-se um ímã em forma de barra (figura 7.1).

Observa-se que, enquanto o ímã está em repouso em relação à bobina, não há indicação de corrente pelo galvanômetro. Quando o movimento ocorre, há corrente elétrica em um sentido durante a aproximação e no sentido oposto, durante o afastamento.

É importante notar que a bobina não está ligada a gerador algum e a corrente que aparece é resultado do movimento relativo entre ela e o ímã.

- **Uma bobina próxima de outra:** próxima à mesma bobina, ligada aos terminais de um galvanômetro, aproxima-se uma segunda bobina, ligada a um gerador por uma chave (figura 7.2).

Mantendo-se a chave fechada ou aberta, isto é, mantendo-se constante a corrente i da bobina da esquerda, a corrente i' da bobina da direita será nula.

O ato de ligar ou desligar a chave da bobina da esquerda produz, na bobina da direita, uma corrente instantânea i' em um sentido ao desligar a chave e em sentido oposto, ao ligar. Essa corrente se reduz a zero quando a posição da chave não muda.

- **Barra condutora em movimento em um campo magnético:** em uma região em que existe um campo magnético uniforme, que pode ter sido criado por um ímã ou uma corrente elétrica, monta-se um circuito com dois trilhos paralelos, ligados por um resistor, perpendicularmente a esse campo. Sobre esses trilhos, monta-se uma barra XY, fechando o circuito (figura 7.3).

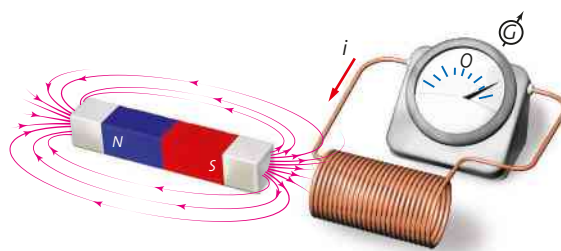
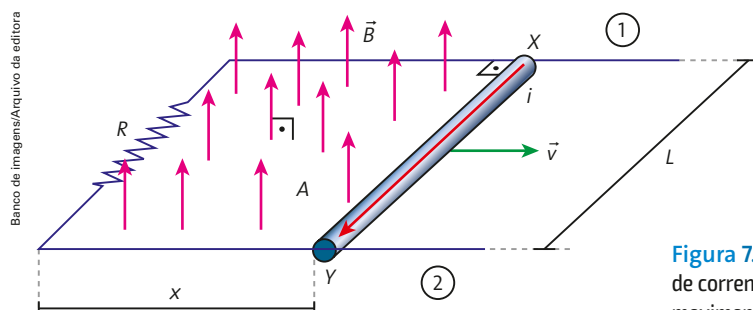


Figura 7.1 Representação esquemática do movimento do ímã em relação à bobina induz uma corrente elétrica.

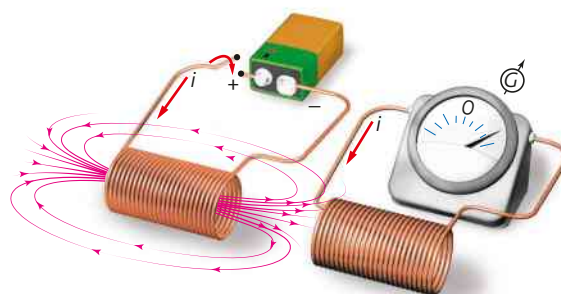


Figura 7.2 Representação esquemática da indução de corrente elétrica entre duas bobinas.

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

Figura 7.3 Representação esquemática de corrente induzida em uma barra condutora movendo-se em um campo magnético.

Caso essa barra permaneça em repouso, não circulará corrente pelo resistor. Seu movimento para a direita, isto é, no sentido de aumentar a área do circuito exposta ao campo magnético, provocará circulação de corrente em um sentido.

Seu movimento para a esquerda, isto é, no sentido de diminuir a área do circuito exposta ao campo magnético, provocará circulação de corrente no sentido oposto.

- **Espira girando em um campo magnético uniforme:** um par de bobinas atravessadas por uma corrente elétrica gera, em uma região limitada, um campo magnético uniforme. Nessa região, coloca-se uma espira ligada a um osciloscópio, aparelho capaz de fornecer uma visualização de uma corrente ou uma *ddp*, variável no tempo. A montagem é executada de maneira que permita a rotação da espira no interior da região exposta ao campo magnético (figura 7.4).

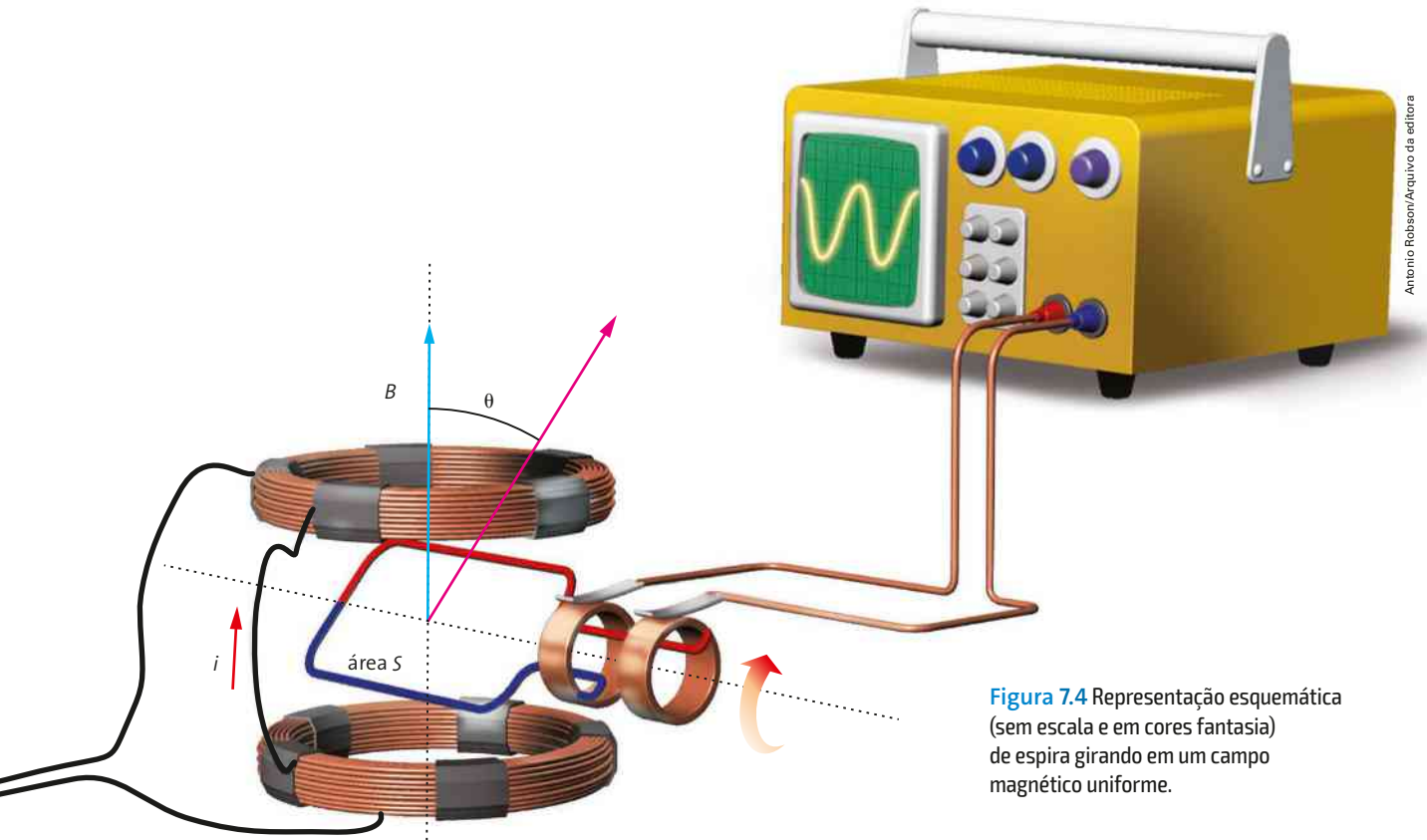


Figura 7.4 Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) de espira girando em um campo magnético uniforme.

Girando uniformemente a espira, conforme indicado na figura, entre seus terminais aparece uma diferença de potencial variável no tempo, segundo uma função senoidal.

Essas quatro experiências podem resumir as principais realizações de Faraday que permitiram a descoberta da **indução eletromagnética**.

Assim, podemos dizer que, toda vez que um dado circuito estiver imerso em um campo magnético, o qual, a partir de agora, chamaremos de **campo original** ($B_{orig.}$), o aparecimento de corrente elétrica induzida (circuito fechado) ou de *ddp* induzida (circuito aberto) ocorre em três situações diferentes:

- o campo original varia com o tempo;
- a área do circuito, exposta ao campo original, varia com o tempo;
- o ângulo formado entre o campo original e o circuito varia com o tempo.

É importante ressaltar que o campo original pode ter sido criado por um ímã ou por uma corrente elétrica.

Uma vez publicados por Faraday, esses experimentos fizeram com que os cientistas da época tentassem estabelecer uma teoria que unificasse os modelos já desenvolvidos para os campos magnéticos.

James Clerk Maxwell (1831-1879), contemporâneo de Faraday, era um pesquisador que dominava amplamente a Matemática, aplicando-a com maestria para elaborar modelos de sistemas físicos. Em ampla e extensa correspondência, Maxwell propôs a Faraday o conceito de fluxo do vetor campo magnético, ou fluxo de indução magnética (Φ), o qual permitia sintetizar as experiências dele. Esse conceito foi definido no *Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo* de Maxwell (figura 7.5.b).



Image Asset Management/Keystone

Fluxo magnético

A figura 7.6 ilustra as linhas de um campo magnético $\vec{B}$ “atravessando” a área A em uma superfície.

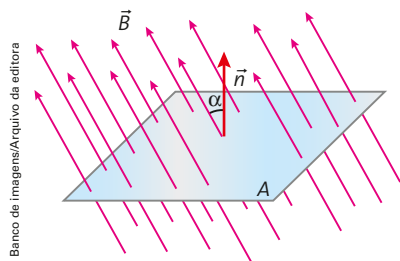


Figura 7.6 Representação das linhas de indução magnética através de uma superfície de área A .

O fluxo do campo magnético (Φ) através dessa área é dado por:

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos \alpha$$

Nessa expressão, α é o ângulo entre o vetor $\vec{n}$, perpendicular ao plano da superfície, e as linhas de campo. No Sistema Internacional de Unidades (SI), o fluxo magnético é dado em **weber (Wb)**.

O fluxo magnético está relacionado à quantidade de linhas de campo que atravessa a área da superfície. Para facilitar o entendimento do conceito de fluxo, vamos fazer uma analogia.

Suponha que uma pessoa, com uma vasilha, queira coletar a água da chuva que cai verticalmente. A quantidade de água coletada, num determinado intervalo de tempo, depende da intensidade da chuva, do tamanho da “boca” da vasilha e da inclinação desta em relação ao movimento da chuva. Com a “boca” posicionada horizontalmente, a quantidade de água coletada é máxima. À medida que a pessoa inclina a vasilha, a captação de água diminui; com a área da “boca” da vasilha na vertical, a quantidade de água coletada é zero (figura 7.7).



Figura 7.7 Representação da variação na captação de água pela vasilha. O mesmo se aplica à variação do fluxo magnético em uma área.

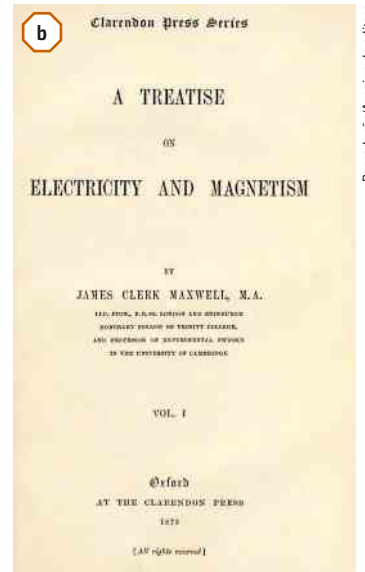


Figura 7.5 Retrato de Maxwell (a) e frontispício do *Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo* (b).

Reprodução/Arquivo da editora

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Força eletromotriz (*fem*)

Usando o conceito de fluxo de indução proposto por Maxwell e os experimentos realizados por Faraday, podemos dizer que indução eletromagnética é:

O aparecimento de uma *fem* induzida (ϵ) em um circuito, que é provocada pela variação do fluxo do campo magnético (fluxo de indução).

A manifestação dessa força eletromotriz induzida pode ocorrer de duas formas: corrente elétrica (circuito fechado) e *ddp* (circuito aberto).

A causa dessa *fem* é a variação do fluxo (ϕ) do campo magnético original ($B_{orig.}$), que pode ter sido gerado por um ímã ou uma corrente elétrica. É importante notar que os valores de campo e fluxo, sejam pequenos ou grandes, não criam a indução eletromagnética, apenas a variação dessas grandezas que a originam. Essa variação pode ser produzida por uma alteração da:

- área A ;
- intensidade do campo magnético ($B_{orig.}$);
- inclinação (α) da reta normal à superfície de área A em relação às linhas do campo magnético.

O diagrama em blocos da **figura 7.8** ilustra o fenômeno da indução eletromagnética.

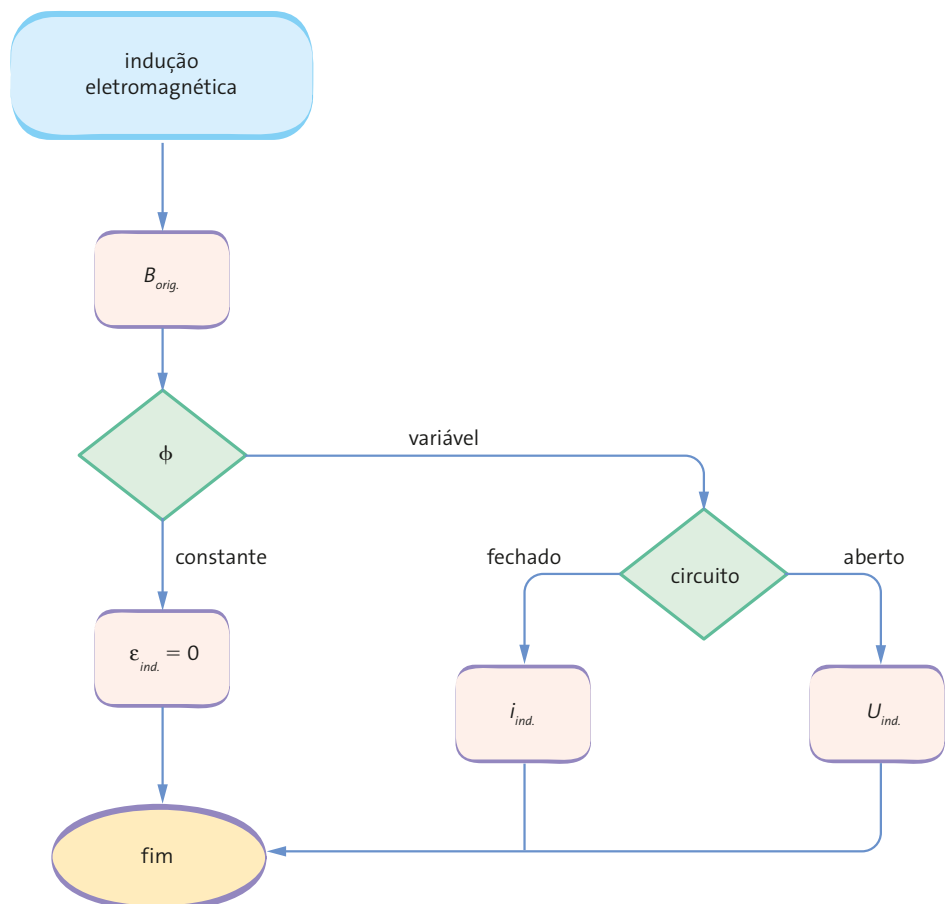
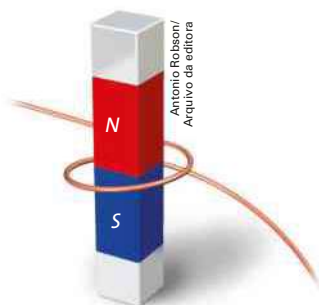


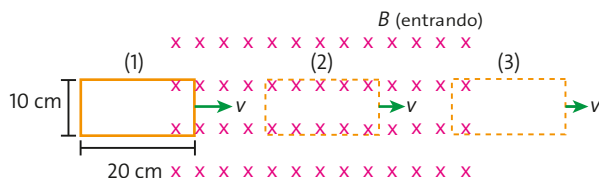
Figura 7.8 Diagrama em blocos do fenômeno da indução eletromagnética.

1. A figura representa uma espira condutora flexível, em forma de laço, em um plano horizontal. No interior da espira há um ímã em forma de barra, disposto na direção vertical, com o polo norte para cima.



Descreva se há variação de fluxo do campo magnético do ímã, através da espira, nos seguintes casos:

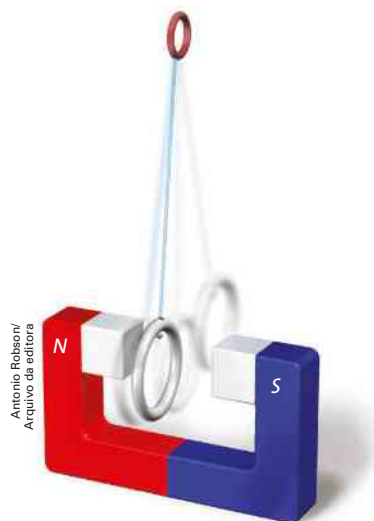
- A espira e o ímã são deslocados juntos, sem movimento relativo. **Não há variação de fluxo.**
 - O ímã é mantido na mesma posição e a espira é deslocada para cima. **Há variação de fluxo.**
 - O laço é apertado em volta do ímã. **Há variação de fluxo.**
2. Uma espira retangular movimenta-se em um campo magnético com velocidade constante, conforme mostra a figura.



Há corrente induzida na espira quando ela está passando pelo(s) ponto(s): **(1) e (3).**

- a) (1). b) (2). c) (3).

3. Um anel de alumínio, suspenso por um fio isolante, oscila entre os polos de um ímã, mantendo-se no plano perpendicular ao eixo norte-sul, conforme mostra a figura. Sabendo que o campo magnético criado pelo ímã é uniforme, responda às perguntas a seguir. Justifique suas respostas.



- Há corrente induzida no anel? **Sim.**
 - Caso a oscilação fosse paralela ao eixo norte-sul do ímã, haveria corrente induzida no anel? **Não.**
4. Descreva, em seu caderno, a importância da descoberta da indução eletromagnética para o desenvolvimento dos processos de geração de energia elétrica.
5. Redija, em seu caderno, um texto explicando o diagrama de blocos para o fenômeno da indução eletromagnética.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.



Lei de Lenz

Após a publicação do trabalho de Faraday e das primeiras formulações matemáticas proporcionadas por Maxwell, o fenômeno da indução eletromagnética continuou a ser estudado por muitos outros cientistas que tentavam obter uma relação quantitativa entre a variação do fluxo de indução magnética ($\Delta\Phi$) e a intensidade da força eletromotriz induzida (ϵ). Em 1833, o físico estoniano Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) apresentou a seguinte interpretação para o fenômeno da indução eletromagnética: era uma reação à variação do fluxo do campo magnético original.

A hipótese era de que os sistemas físicos sempre tendiam a manter seus estados de equilíbrio dinâmico. Assim, ao variar o fluxo magnético em um circuito, haveria uma reação com o objetivo de mantê-lo.

Essas observações levaram Lenz a enunciar a seguinte lei qualitativa:

A força eletromotriz induzida sempre tende a produzir uma corrente induzida cujo campo magnético associado deve compensar a variação do fluxo magnético original.

Embora pareça singelo, o enunciado da lei de Lenz é muito sutil. Veja a seguir alguns itens que devem ser observados para aplicar essa lei de forma adequada.

1. Inicialmente, deve-se verificar o sentido do campo magnético original.
2. Deve-se verificar se o fluxo do campo magnético original está aumentando, diminuindo ou mantendo-se constante.
3. O fluxo do campo magnético original constante indica que a *fem* induzida é nula.
4. O aumento do fluxo do campo magnético original indica que a *fem* induzida deve produzir uma corrente induzida ($i_{ind.}$) para criar um campo magnético induzido ($B_{ind.}$) em sentido oposto ao campo magnético original.
5. A diminuição do fluxo do campo magnético original indica que a *fem* induzida deve produzir uma corrente induzida ($i_{ind.}$) para criar um campo magnético induzido ($B_{ind.}$) no mesmo sentido do original.

Nos dois últimos casos, o conhecimento do sentido do campo magnético induzido permite determinar o sentido da corrente elétrica induzida pela regra da mão direita.

O diagrama em blocos da [figura 7.9](#) ilustra o processo de aplicação da lei de Lenz.

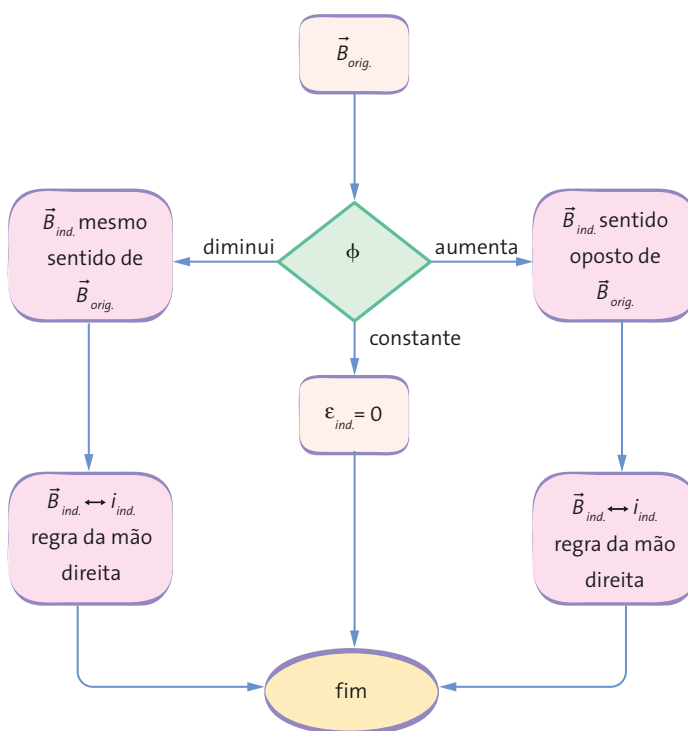


Figura 7.9 Diagrama em blocos que ilustra a lei de Lenz para a indução eletromagnética.

Exercícios

8. a) Não há *fem* induzida no solenoide.

b) A *fem* induzida terá uma polaridade que gera uma corrente no sentido do campo original.

c) A *fem* induzida terá uma polaridade que gera uma corrente no sentido oposto ao do campo original.



6. Um fio reto é atravessado por uma corrente elétrica de intensidade i , variável no tempo, criando à sua volta um campo magnético. Uma espira circular condutora C é colocada próxima ao fio, conforme mostra a figura.



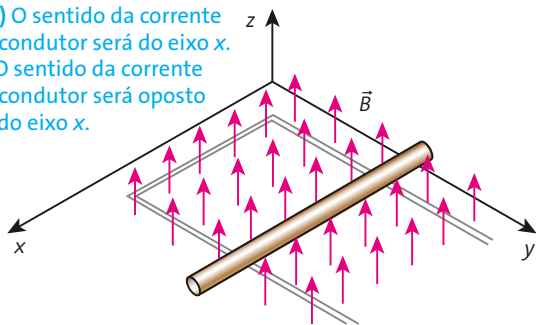
Determine o sentido (horário ou anti-horário) da corrente induzida em C quando a corrente elétrica i :

- a) aumenta com o tempo; **Anti-horário.**
b) diminui com o tempo. **Horário.**

7. Um condutor em forma de U tem um lado paralelo ao eixo x e os dois outros paralelos ao eixo y , como mostra a figura. Uma barra condutora pode ser movimentada paralelamente ao eixo x sobre o condutor, e o conjunto está imerso em um campo magnético uniforme na direção e no sentido de z .

7. a) O sentido da corrente no condutor será do eixo x .

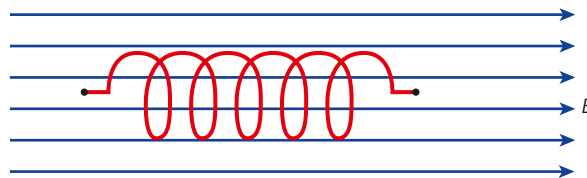
b) O sentido da corrente no condutor será oposto ao do eixo x .



Determine o sentido da corrente induzida no conjunto caso o condutor se movimente:

- a) no sentido do eixo y .
b) no sentido oposto ao do eixo y .

8. Um solenoide é colocado no interior de um campo magnético, conforme mostra a figura (sem escala e em cores fantasia).



Descreva a força eletromotriz originada no solenoide de quando:

- a) o campo magnético não varia;
b) a intensidade do campo magnético diminui;
c) a intensidade do campo magnético aumenta.

9. A figura (sem escala e em cores fantasia) mostra correntes induzidas em espiras circulares pelo movimento de ímãs próximos a elas.

a) Situação correta.



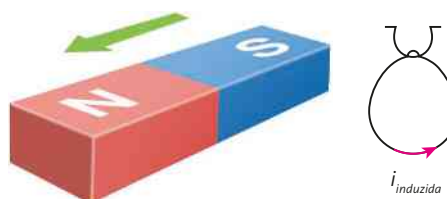
b) Situação correta.



c) Situação incorreta.



d) Situação correta.



Verifique, em cada caso, se o sentido da corrente induzida está correto, justificando a resposta.

Veja complemento da resposta no Manual do Professor.

3 Força eletromotriz induzida

Seguindo os trabalhos realizados por Faraday, Maxwell e Lenz, o físico alemão Franz Ernst Neumann (1798-1895) enunciou, em 1845, uma lei que resumia todos os pontos do fenômeno da indução eletromagnética estudados até aquele momento.

Essa lei ficou conhecida como **lei de Faraday-Neumann** e expressa como a força eletromotriz induzida em um circuito se relaciona com a variação de fluxo magnético através dele.

Vejam um exemplo. Consideremos que, em um dado instante t , o fluxo magnético através de um circuito seja ϕ . Em um instante posterior $t' > t$, consideremos que esse fluxo seja ϕ' . Sendo $\Delta\phi$ a variação do fluxo magnético, e Δt o intervalo de tempo, a lei de Faraday-Neumann diz que a *fem* induzida (ε) que aparece no circuito é dada por:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

O sinal (–) da lei de Faraday-Neumann indica sua coerência com a lei de Lenz e permite a construção do diagrama em blocos da **figura 7.10**, que resume os principais aspectos qualitativos e quantitativos da indução eletromagnética.

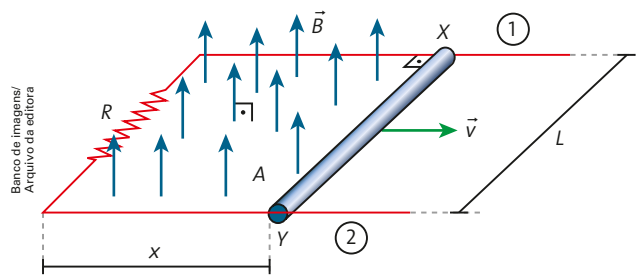
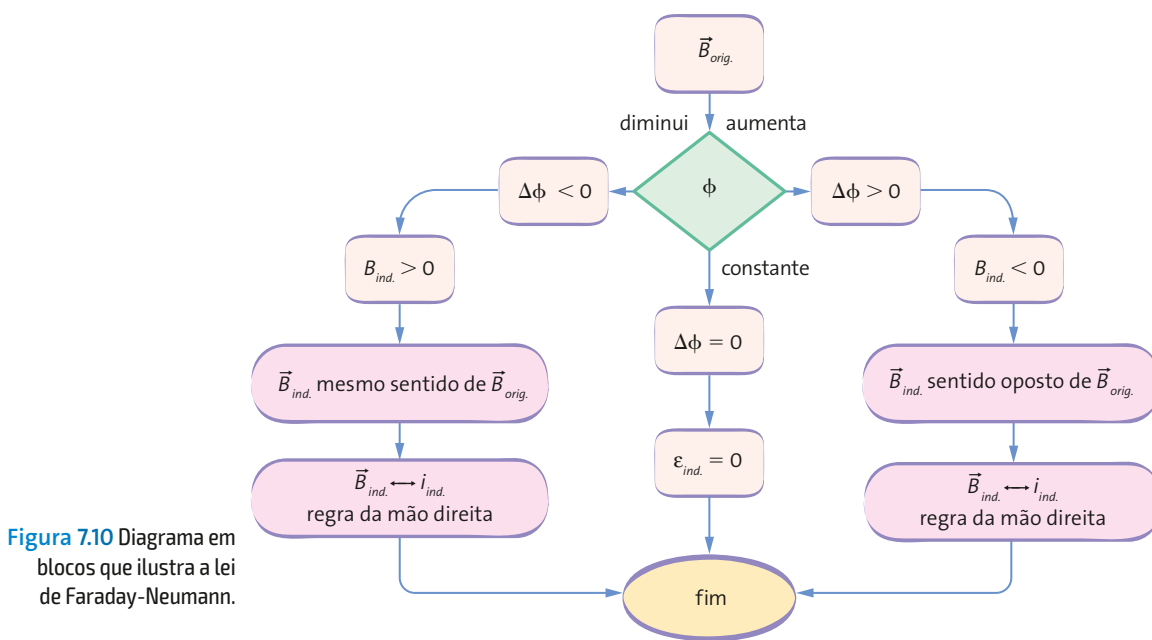


Figura 7.11 O condutor retilíneo XY é deslocado com velocidade constante sobre dois fios e imerso em um campo magnético uniforme. Representação esquemática.

Condutor retilíneo

Vamos determinar a *fem* induzida no caso específico de um condutor retilíneo XY , de comprimento L , conectado a um circuito elétrico, que pode deslizar pelos fios 1 e 2 e está imerso em um campo magnético uniforme $\vec{B}$ (**figura 7.11**).

O circuito compreende uma região de área A , denominada espira, atravessada por um campo magnético uniforme $\vec{B}$, perpendicular ao plano que contém o condutor e os fios 1 e 2.

Ao deslocarmos o condutor XY, há uma variação de fluxo, pois a área A também varia. Em módulo, a *fem* induzida na espira é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Como a variação de fluxo magnético se deve à variação da área A da espira, podemos escrever:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot \Delta A \cdot \cos 0^\circ}{\Delta t}$$

Sendo $\Delta A = L \cdot \Delta x$ e $\cos 0^\circ = 1$, temos:

$$\varepsilon = \frac{B \cdot L \cdot \Delta x}{\Delta t}$$

Como a velocidade do condutor XY é dada por $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, a expressão da *fem* induzida é:

$$\varepsilon = B \cdot L \cdot v$$

Em virtude da força eletromotriz (*fem*) induzida, estabelece-se no circuito uma corrente elétrica induzida, cujo sentido é determinado utilizando-se a lei de Lenz.

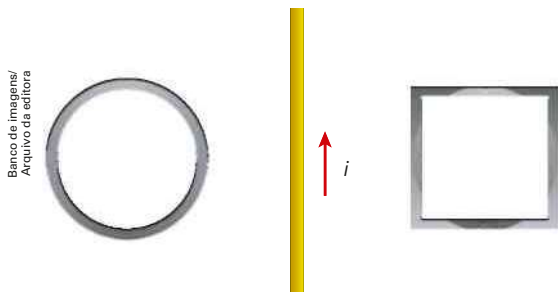
Exercícios

13. a) (1) o fluxo está aumentando; (2) o fluxo é constante; (3) o fluxo está diminuindo.
b) $\varepsilon = 0,5 \text{ V}$



10. a) $\phi = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m}^2$

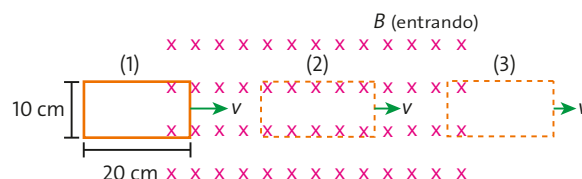
10. Um fio condutor em forma de anel de raio $R = 5,0 \text{ cm}$ está em uma região do espaço em que existe um campo magnético uniforme $B = 2,0 \text{ T}$ formando 30° com o plano do anel. Nessas condições:
- Qual é o fluxo magnético através do anel?
 - Determine a *fem* induzida caso a intensidade do campo magnético seja reduzida a zero em $2,0 \text{ ms}$.
 $\varepsilon = 3,9 \text{ V}$
11. Considere um fio reto percorrido por uma corrente que produz fluxos de 4 Wb e de 2 Wb através das espiras circular e quadrada da figura, respectivamente.



Considere que as duas espiras têm resistência elétrica $R = 3 \Omega$ e que a corrente elétrica tenha seu valor dobrado em um intervalo de tempo de 4 s .

Na espira circular.

- A intensidade da corrente elétrica induzida é maior na espira quadrada ou na circular? Justifique.
 - Qual é o sentido da corrente elétrica induzida em cada espira? *Espira circular: sentido horário; espira quadrada: sentido anti-horário.*
12. De acordo com o diagrama em blocos que ilustra a lei de Faraday-Neumann, quais são as condições para que haja uma corrente elétrica induzida?
13. Deve ocorrer variação de fluxo em um circuito fechado.
- Uma espira retangular condutora, com velocidade $v = 10 \text{ m/s}$, atravessa uma região onde existe um campo magnético $B = 0,5 \text{ T}$, perpendicular ao plano da espira, conforme mostra a figura.



- O que acontece com o fluxo magnético através da espira nas posições (1), (2) e (3)?
- Determine a *fem* induzida na espira na posição (1).
- Explique se o sentido da corrente elétrica induzida é o mesmo nas posições (1) e (3). *Os sentidos são diferentes. Veja complemento da resposta no Manual do Professor.*

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

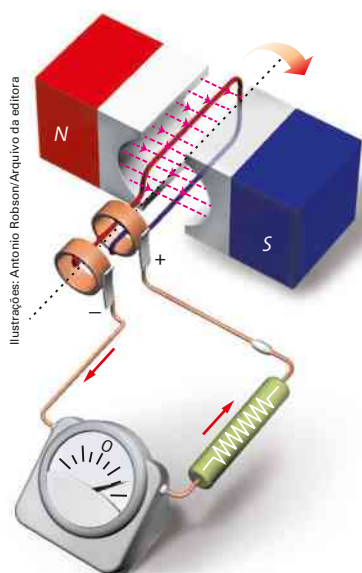


Figura 7.12 Representação esquemática de uma espira retangular girando em um campo magnético uniforme.

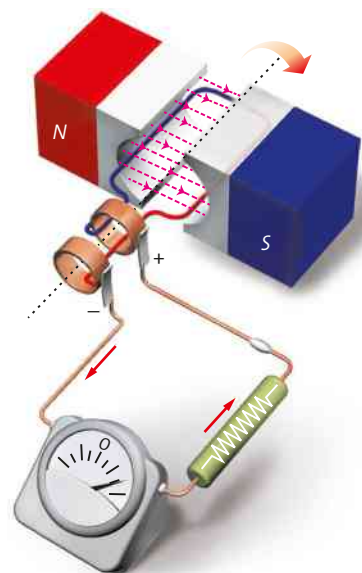


Figura 7.13 Representação esquemática da posição da espira paralela às linhas de campo.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir

Por que o sistema energético utiliza corrente alternada, e não corrente contínua?



Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

Gerador de corrente alternada

A descoberta da indução eletromagnética e o entendimento das leis que a descrevem permitiram um avanço tecnológico considerável, pois foi possível, de maneira prática e econômica, construir dispositivos capazes de converter energia mecânica em elétrica. Estes, os chamados **geradores de corrente alternada**, têm seu funcionamento fundamentado na produção de uma *fem* induzida, provocada pelo movimento de rotação de uma espira em uma região em que existe um campo magnético.

Seja, por exemplo, a espira retangular da **figura 7.12**, colocada entre os polos de um ímã, posicionada inicialmente na vertical e girando no sentido indicado.

Na posição inicial, indicada na figura, o vetor normal à espira e o campo magnético formam um ângulo $\alpha = 0^\circ$. À medida que a espira gira, esse ângulo α varia ao longo do tempo, assumindo valores entre 0° e 360° (uma volta completa). Na posição mostrada na **figura 7.13**, temos $\alpha = 90^\circ$.

Desse modo, o fluxo magnético que atravessa a espira tem, inicialmente, um valor máximo ($\alpha = 0^\circ$); depois, passa por um valor nulo ($\alpha = 90^\circ$), assume um valor negativo de módulo máximo ($\alpha = 180^\circ$) e volta para o valor nulo ($\alpha = 270^\circ$). Após ser completada uma volta, retorna ao seu valor inicial.

Esse fluxo variável produz uma *fem* induzida que é responsável por uma corrente no resistor, medida pelo galvanômetro. O fluxo do campo magnético é dado por:

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos \alpha$$

Supondo que a rotação da espira seja uniforme, podemos escrever:

$$\alpha = \alpha_0 + \omega \cdot t$$

em que ω é a velocidade angular do movimento.

Logo, o fluxo do campo magnético é uma função cossenoidal do tempo, dada por:

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos (\alpha_0 + \omega \cdot t)$$

Nessas condições, efetuando cálculos, que fogem à finalidade deste capítulo, pode-se concluir que a *fem* induzida na espira é dada por:

$$\varepsilon = -\omega \cdot B \cdot A \cdot \sin (\alpha_0 + \omega \cdot t)$$

e, como consequência, a corrente elétrica indicada pelo galvanômetro é:

$$i = \frac{\omega \cdot B \cdot A}{R} \cdot \sin (\alpha_0 + \omega \cdot t)$$

Esse é o princípio de funcionamento dos geradores de corrente alternada. Essa simplicidade de funcionamento permitiu que esses geradores fossem usados de maneira ampla, formando a base do sistema energético de nossa sociedade.



Usinas elétricas

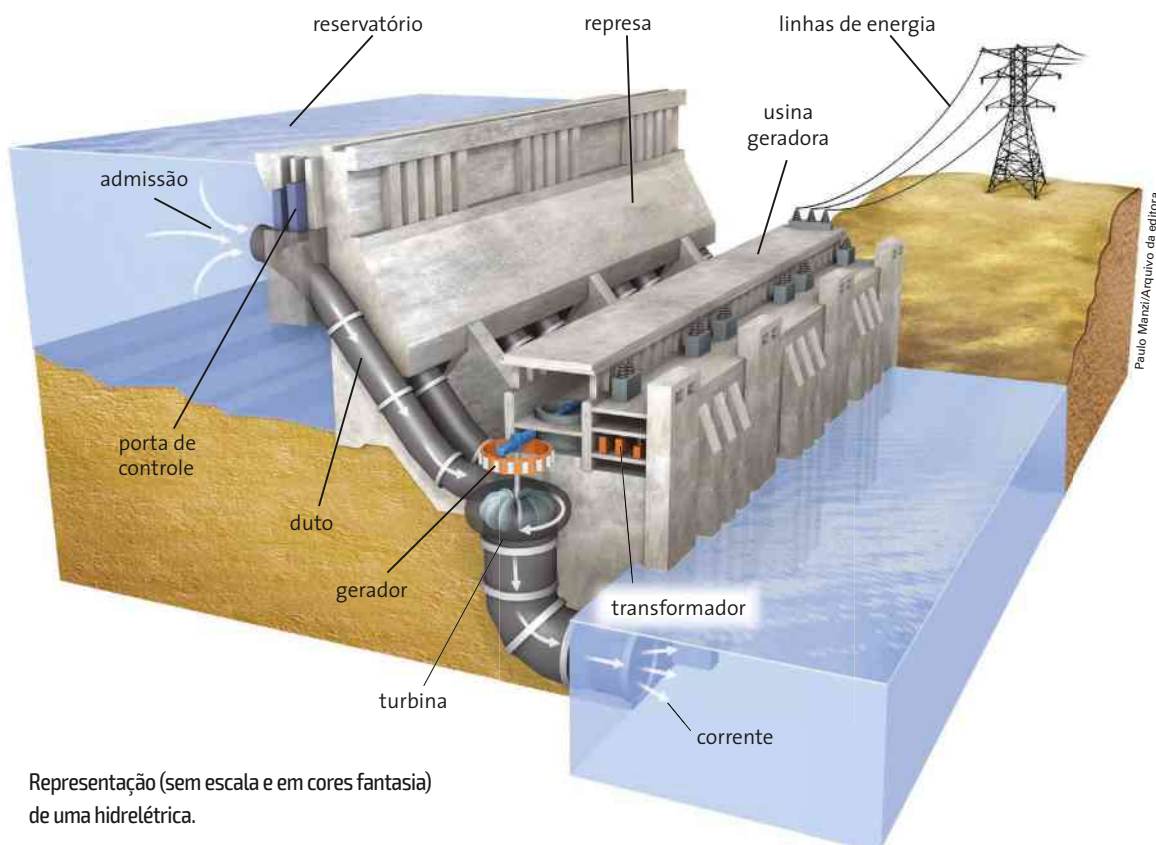
A questão energética é bastante complexa, pois, apesar de ser a fonte de energia, nosso planeta também é o depósito dos resíduos. Por isso a escolha e o desenvolvimento de fontes de energia, o consumo consciente e a preservação ambiental devem sempre estar presentes no dia a dia do cidadão. Mas o que diferencia as usinas elétricas?

Todas as usinas elétricas têm algo em comum: a energia elétrica, em razão da indução eletromagnética, é obtida pelo movimento de uma turbina. A diferença está no modo de movimentação das turbinas de cada uma delas.

- **Hidrelétrica:** a energia mecânica das águas que se encontram acima do nível da turbina se transfere para ela que, ao se movimentar, ativa espiras em campos magnéticos.
- **Termelétrica:** a energia da queima de carvão, gás ou óleo é transferida ao vapor que, ao se movimentar, ativa espiras em campos magnéticos.
- **Termonuclear:** a energia liberada nas reações nucleares aquece um fluido, normalmente a água, que, ao se movimentar, aciona a turbina.
- **Eólica:** a energia dos ventos movimenta pás anexas às espiras, que se movem em campos magnéticos.

O Brasil é um país privilegiado, pois todos esses métodos são viáveis. O ideal é compor a matriz energética da maneira mais inteligente e diversificada possível, distribuindo assim o “custo” da geração de energia e a localização das fontes energéticas pelo país.

- Explique a sequência de transformação de energia em cada um dos quatro tipos de usina elétrica citados no texto.



Exercícios

14. c) $\varepsilon = -2 \cdot 10^{-4} \pi \cdot \sin(\omega t)$ (V) 15. a) $i = \sin(120 \pi t)$ (A)

b) Esse tempo é muito inferior ao limite de resolução de nossa visão.

14. Uma espira de área $A = 1 \text{ cm}^2$ gira em um campo magnético com velocidade angular $\omega = \pi \text{ rad/s}$, partindo de um ângulo inicial $\alpha_0 = 0$. Se a intensidade do campo magnético é de 2 T, usando as expressões matemáticas apresentadas:

- calcule o fluxo do campo magnético através da espira; $\phi = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \cos(\pi t) \text{ Wb}$
- faça, no seu caderno, o gráfico desse fluxo em função do tempo;
- calcule a *fem* induzida pelo movimento da espira;
- faça, no seu caderno, o gráfico dessa *fem* em função do tempo.

Veja respostas dos itens b e d no Manual do Professor.

15. Em uma residência, a *ddp* é alternada com valor máximo 110 V e frequência de 60 Hz, com fase inicial $\alpha_0 = 0$.

- Expresse a corrente elétrica que ela produz em uma lâmpada de dados nominais 110 W – 110 V.
- Se a corrente elétrica é alternada com frequência 60 Hz, ela assume o valor zero 120 vezes por segundo. Explique, em seu caderno, por que não vemos a lâmpada acender e apagar 120 vezes por segundo.

16. Com relação às usinas elétricas, julgue cada afirmativa e indique se está certa ou errada.

- Em uma usina eólica, a energia do vento movimenta uma coluna de água em um campo magnético. **Errada.**
- Em uma usina termoeletrica, o calor dilata um pistão que, ao movimentar-se em um campo magnético, produz uma *fem* induzida. **Errada.**
- Em uma usina hidrelétrica, rodas-d'água movimentam as turbinas. **Errada.**

Artur Keunecke/Pulsar Imagens



Figura 7.14 Subestação de energia elétrica na Chapada dos Guimarães (MT), em 2015.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.



Transformadores

A energia elétrica gerada nas centrais percorre um longo caminho até chegar aos centros consumidores. Esse caminho envolve sistemas de transmissão e distribuição ao longo dos quais a *ddp* deve sofrer modificações para se adaptar às necessidades operacionais.

No Brasil, em que a energia provém essencialmente de hidrelétricas, os geradores são de corrente alternada, seguindo as leis aqui descritas, nas frequências de 60 Hz ou 50 Hz. A tensão de geração, na maioria dos casos, varia entre 20 000 V e 25 000 V.

Para que essa energia seja transmitida satisfatoriamente a longas distâncias, a tensão deve ser ampliada para valores entre 138 000 V e 1 200 000 V (figura 7.14). Ao chegar aos centros de distribuição, essa tensão deve ser novamente reduzida para valores entre 3 000 V e 25 000 V.

Dispositivos capazes de produzir esses aumentos e diminuições de *ddps* alternadas, sem variar a energia associada, são chamados **transformadores** (figura 7.15). Eles são comumente utilizados para ligar um aparelho que funciona com 110 V em tomadas nas quais a tensão é 220 V.

Arquivo do autor/Arquivo da editora



Figura 7.15 Este transformador aumenta 40 vezes a intensidade da tensão eficaz. A alta intensidade do campo entre as hastes provoca a ionização do ar. Isso resulta em descargas elétricas entre as hastes.

Na **figura 7.16**, o circuito denominado primário contém N_1 espiras enroladas em um núcleo de ferro. O circuito denominado secundário contém N_2 espiras enroladas no mesmo núcleo de ferro.

Um fluxo magnético ϕ atravessa o núcleo de ferro. Caso esse fluxo seja constante, não haverá indução. Para que o transformador funcione, é necessário um fluxo variável, obtido através de uma tensão variável.

Em cada espira do circuito primário ou secundário, a tensão induzida é:

$$u = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}.$$

Como há N_1 espiras, a tensão induzida total no circuito primário é:

$$U_1 = N_1 u \text{ (I)}$$

Do mesmo modo, no circuito secundário a tensão induzida total é:

$$U_2 = N_2 u \text{ (II)}$$

De I e II, obtemos:
$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

Os transformadores apresentam alto rendimento. Assim, podemos dizer que a potência do circuito primário (P_1) é igual à do circuito secundário (P_2):

$$P_1 = P_2 \Rightarrow U_1 i_1 = U_2 i_2$$

Portanto, à maior tensão corresponde uma menor corrente elétrica.

O valor eficaz de uma tensão ou corrente elétrica é aquele que, se permanesse constante, resultaria na mesma quantidade de energia – transferida ou transformada – ao longo do tempo.

É importante ressaltar que o transformador deve sempre ser utilizado em circuitos de corrente alternada. As relações entre tensão e corrente deduzidas devem ser interpretadas como válidas para os valores de pico de cada uma delas.

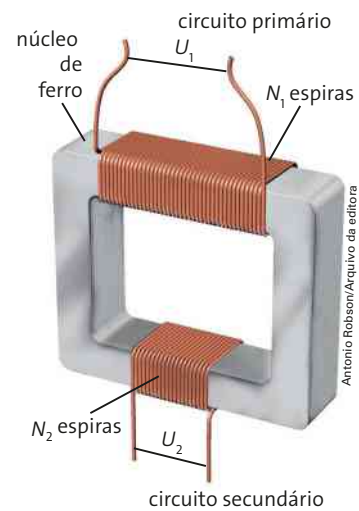


Figura 7.16 Representação esquemática de um transformador (sem escala e em cores fantasia).

Exercícios

17. Se a corrente for contínua, não há variação de campo e, portanto, não há variação de fluxo para produzir corrente ou ddp.

17. Explique, em seu caderno, por que os transformadores devem sempre ser utilizados em circuitos de corrente alternada.

18. Em um sistema de distribuição local de energia elétrica, a tensão de linha é de 138 kV. Sabendo que a tensão a ser distribuída é de 380 V, descreva o transformador a ser utilizado. $N_1 = 364 \cdot N_2$

19. A corrente no circuito primário de um transformador com 100 espiras é 1,0 A. Sabendo que a potência no primário é de 100 W e que a tensão no secundário é 50 V, determine:

- a) a tensão no primário; $U_1 = 100 \text{ V}$
- b) a potência no secundário. $P_2 = P_1 = 100 \text{ W}$

20. Um adaptador para “carregar” celular apresenta a seguinte indicação:

Entrada:
110-240 V; 50-60 Hz; 0,15 A.
Saída:
5 V; 0,7 A.

- a) Esse adaptador funciona normalmente se for ligado em uma tomada de 127 V? E em uma tomada de 220 V? **Sim.**
- b) A tensão de saída do adaptador é contínua ou alternada? Explique. **Contínua.**
Veja complemento da resposta no Manual do Professor.



Michael Faraday

Michael Faraday nasceu em 22 de setembro de 1791 em Londres [Inglaterra]. Sua família não era de posses e Faraday recebeu somente educação formal básica. Aos 14 anos de idade, tornou-se aprendiz de encadernador e, nos sete anos seguintes, fez-se autodidata por intermédio da leitura de livros sobre diversos assuntos científicos que encadernava.

Em 1812, Faraday frequentou quatro aulas proferidas pelo químico Humphry Davy no Royal Institute. Em seguida, escreveu para ele candidatando-se para trabalhar como seu assistente. Davy não o aceitou de imediato, mas, em 1813, escolheu-o para o trabalho de químico assistente no Royal Institute.

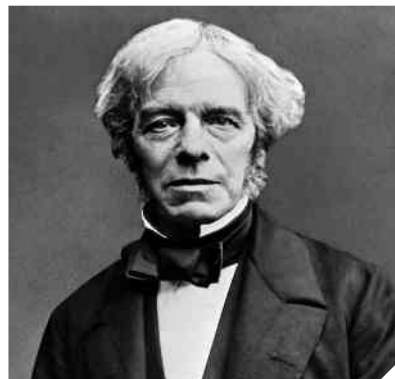
Um ano depois, Faraday foi convidado a acompanhar Davy e sua esposa em uma temporada turística de 18 meses pela Europa, passando pela França, Suíça, Itália e Bélgica, encontrando muitos cientistas influentes. Em seu retorno, em 1815, Faraday continuou a trabalhar no Royal Institute, ajudando Davy e outros cientistas nos experimentos.

Em 1821 publicou seu trabalho em rotação eletromagnética contendo os princípios de funcionamento do motor elétrico. Em 1826, fundou os *Friday Evening Discourses* [Discursos de Sexta-Feira à noite], no Royal Institute, e no mesmo ano as *Christmas Lectures* [Aulas de Natal], ambos existentes até hoje. Ele mesmo proferiu várias aulas, estabelecendo sua reputação de excelente palestrante científico.

Em 1831, Faraday descobriu a indução eletromagnética, princípio de funcionamento do transformador e do gerador. Essa descoberta foi crucial, transformando a eletricidade de curiosidade em poderosa tecnologia. Durante o restante da década, trabalhou desenvolvendo suas ideias sobre eletricidade. Ele foi parcialmente responsável pela criação das expressões: eletrodo, cátodo e íon.

O conhecimento científico de Faraday sempre teve uso prático, levando-o a ocupar postos como conselheiro científico do Trinity House (1836-1865) e professor de Química da Academia Real Militar em Woolwich (1830-1851).

Faraday faleceu em 25 de agosto de 1867 em Hampton, deixando enorme legado de conhecimentos à Física e à Química, sendo responsável pelo grande progresso tecnológico do século XX.



Retrato de Michael Faraday (1791-1867).

Hulton-Deutsch Collection/Corbis/Latinstock

Historic Figures. BBC. Disponível em: <www.bbc.co.uk/history/historic_figures/faraday_michael.shtml>. Acesso em: jan. 2016. Texto traduzido.

Trabalho em equipe

Façam uma pesquisa sobre a vida e a obra de Michael Faraday. Conversem com o professor de Química sobre as contribuições de Faraday nessa área. Apresentem seus resultados em um seminário.

Vocês podem consultar, entre outras referências:

BASSALO, José M. F. Faraday e o efeito magnético-óptico (efeito Faraday). *Seara da ciência: curiosidades da Física*. Disponível em: <www.seara.ufc.br/folclore/folclore148.htm>. Acesso em: mar. 2016.

PIRES, Antonio S. T. Teoria eletromagnética. In: *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2008. p. 271-275.

ROCHA, José F. M. Origens e evolução do eletromagnetismo. In: *Origens e evolução das ideias da Física*. Salvador: Edufba, 2002. p. 246-264.

Experimento



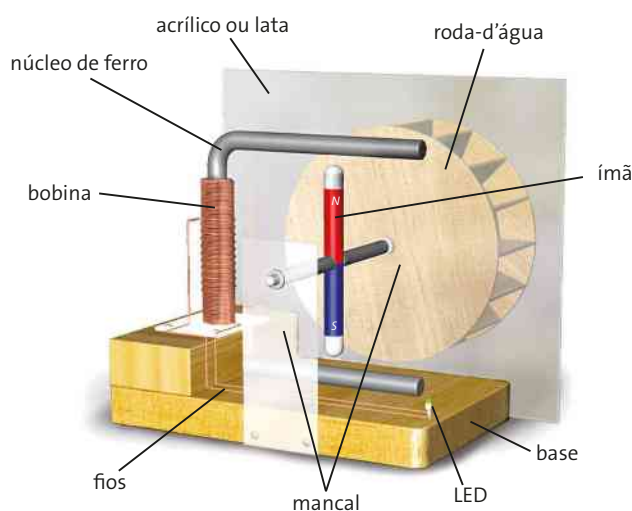
Veja comentários e sugestões sobre este experimento e respostas das atividades no Manual do Professor.



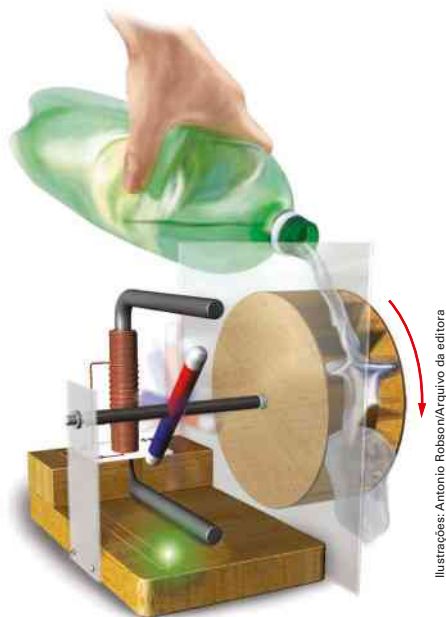
Usina hidrelétrica

Propomos a construção de uma pequena usina hidrelétrica. Para isso, você vai precisar dos seguintes materiais: uma roda-d'água de plástico, um ímã permanente, um núcleo de ferro em forma de U, fio de cobre esmaltado (AWG-26) e um LED ou uma pequena lâmpada incandescente "mignon".

A roda-d'água de plástico (turbina) é ligada ao ímã permanente por seu eixo. Ambos são capazes de girar solidariamente, num plano vertical, conforme mostra a figura.



Representações (sem escala e em cores fantasia) do experimento.



O ímã gira dentro do núcleo de ferro em forma de U. Nesse núcleo temos, na perna vertical, uma bobina de fio de cobre esmaltado (150 espiras de fio AWG-26) a qual, por sua vez, está ligada à pequena lâmpada incandescente "mignon" (1,5 V) ou ao LED.

A turbina é acionada pelo jato de água proveniente de uma torneira. A parte elétrica é separada da hidráulica por uma chapa de lata ou alumínio (para evitar respingos). Ao girar o ímã, observa-se o acendimento da lâmpada (ou do LED).

A parte crítica da montagem proposta é o ímã permanente; todas as demais partes deverão se ajustar a ele. A seguir, fornecemos as especificações para a utilização de um ímã cilíndrico de 10 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro (também pode ser um ímã de seção quadrada ou retangular). Ajuste o processo às medidas do ímã que tiver em mãos.

O núcleo da bobina deve ser feito de um vergalhão de ferro de construção de pelo menos 37 cm de comprimento e diâmetro de 1 a 1,5 cm. Para ter a forma de U, esse vergalhão de ferro maciço deve ser curvado de forma que a abertura das pernas do U fique com 11 cm. Desse modo, o ímã poderá girar entre as pernas desse U, bem próximo delas. Descontando as dobras do ferro, as pernas do U ficarão com cerca de 12 cm.

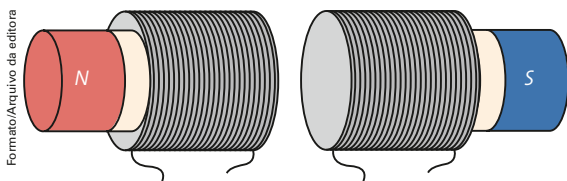
Na perna central do U enrolam-se 150 voltas de fio de cobre esmaltado AWG-26. (Nessa perna central, caberão tranquilamente até umas 200 voltas de fio, se as espiras forem bem arrumadas, juntas, em camadas.)

1. Qual é a função do ímã permanente no modelo proposto? E a da bobina?
2. Aumentando-se o jato de água, o brilho da lâmpada varia?

Retomando

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

- 21.** (Ufscar-SP) Você já deve ter visto um tipo de lanterna que necessita ser chacoalhada na direção de seu comprimento para que funcione. Ao desmontar uma delas, verifica-se que, entre outras coisas, há uma bobina, fixa no corpo da lanterna, e um ímã solto no interior da bobina.



Sobre a corrente elétrica induzida na bobina, analise:

- I. Se o ímã entrar na bobina com velocidade constante, a corrente elétrica induzida tem valor constante.
- II. Quando o ímã se encontra estacionado no interior da bobina, não ocorre indução.
- III. Quando uma força faz o ímã atravessar a bobina de um lado para o outro, o movimento dos elétrons na bobina ora é num sentido, ora é no outro.

É certo o contido em:

- a) I, apenas.
- b) III, apenas.
- c) I e II, apenas.
- d) II e III, apenas.
- x e)** I, II e III.

- 22.** (Enem) O manual de funcionamento de um captador de guitarra elétrica apresenta o seguinte texto: Esse captador comum consiste de uma bobina, fios condutores enrolados em torno de um ímã permanente. O campo magnético do ímã induz o ordenamento dos polos magnéticos na corda da guitarra, que está próxima a ele. Assim, quando a corda é tocada, as oscilações produzem variações, com o mesmo padrão, no fluxo magnético que atravessa a bobina. Isso induz uma corrente elétrica na bobina, que é transmitida até o amplificador e, daí, para o alto-falante.
- Um guitarrista trocou as cordas originais de sua guitarra, que eram feitas de aço, por outras feitas de náilon. Com o uso dessas cordas, o amplificador ligado ao instrumento não emitia mais som, porque a corda de náilon:

- a) isola a passagem de corrente elétrica da bobina para o alto-falante.
- b) varia seu comprimento mais intensamente do que ocorre com o aço.
- x c)** apresenta uma magnetização desprezível sob a ação do ímã permanente.
- d) induz correntes elétricas na bobina mais intensas que a capacidade de captador.
- e) oscila com uma frequência menor do que a que pode ser percebida pelo captador.

- 23.** (Enem) A eficiência de um processo de conversão de energia é definida como a razão entre a produção de energia ou trabalho útil e o total de entrada de energia no processo. A figura mostra um processo com diversas etapas. Nesse caso, a eficiência geral será igual ao produto das eficiências das etapas individuais. A entrada de energia que não se transforma em trabalho útil é perdida sob formas não utilizáveis (como resíduos de calor).

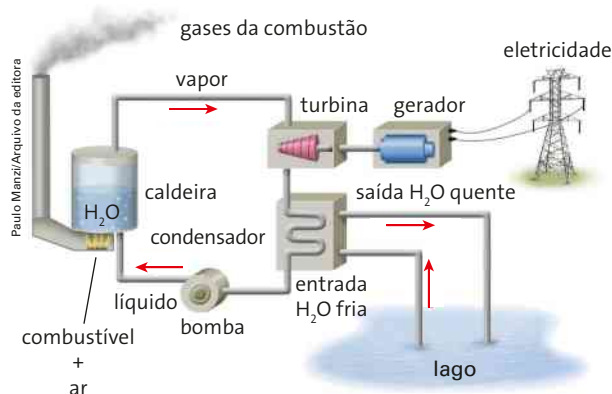


HINRICH, R. A. *Energia e meio ambiente*. São Paulo: Pioneira/Thomson Learning, 2003. Adaptado.

Aumentar a eficiência dos processos de conversão de energia implica economizar recursos e combustíveis. Das propostas seguintes, qual resultará em maior aumento da eficiência geral do processo?

- a) Aumentar a quantidade de combustível para queima na usina de força.
- b) Utilizar lâmpadas incandescentes, que geram pouco calor e muita luminosidade.
- c) Manter o menor número possível de aparelhos elétricos em funcionamento nas moradias.
- d) Utilizar cabos com menor diâmetro nas linhas de transmissão a fim de economizar o material condutor.
- x e)** Utilizar materiais com melhores propriedades condutoras nas linhas de transmissão e lâmpadas fluorescentes nas moradias.

24. (Enem) O esquema mostra um diagrama de bloco de uma estação geradora de eletricidade abastecida por combustível fóssil.



HINRICH, R. A.; KLEINBACH, M. *Energia e meio ambiente*. São Paulo: Pioneira/Thomson Learning, 2003. Adaptado.

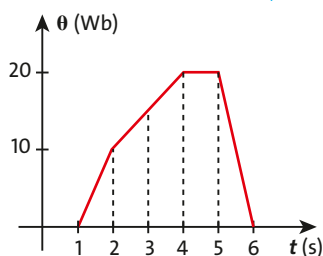
Se fosse necessário melhorar o rendimento dessa usina, que forneceria eletricidade para abastecer uma cidade, qual das seguintes ações poderia resultar em alguma economia de energia, sem afetar a capacidade de geração da usina?

- Reduzir a quantidade de combustível fornecido à usina para ser queimado.
 - Reduzir o volume de água do lago que circula no condensador de vapor.
 - Reduzir o tamanho da bomba usada para devolver a água líquida à caldeira.
 - Melhorar a capacidade de os dutos com vapor conduzirem calor para o ambiente.
- X e) Usar o calor liberado com os gases pela chaminé para mover um outro gerador.

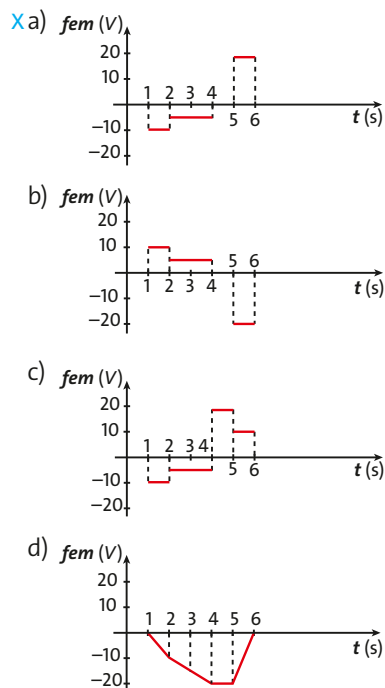
25. b) $I_2 = 3 \text{ A}$
 25. Um transformador é alimentado no circuito primário com tensão de 110 V e corrente de 6 A. O primário possui 300 espiras; o secundário, 600 espiras.

- Qual é a tensão no secundário? $U_2 = 220 \text{ V}$
- Qual é a intensidade de corrente no secundário?
- Se o secundário fosse ligado a uma fonte de tensão de 180 V, que tensão teríamos no primário? $U_1 = 90 \text{ V}$

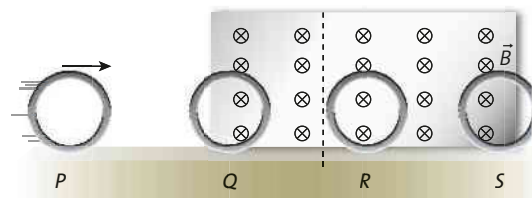
26. (UEL-PR) O fluxo magnético sobre uma espira varia no tempo de acordo com o gráfico ao lado.



Qual das alternativas melhor representa a força eletromotriz induzida na espira?



27. (UFMG) Um anel metálico rola sobre uma mesa, passando, sucessivamente, pelas posições P, Q, R e S, como representado nesta figura:



Na região indicada pela parte sombreada na figura, existe um campo magnético uniforme, perpendicular ao plano do anel, representado pelo símbolo $\otimes$. Considerando-se essa situação, é correto afirmar que, quando o anel passa pelas posições Q, R e S, a corrente elétrica, nele:

- é nula apenas em R e tem sentidos opostos em Q e em S.
- tem o mesmo sentido em Q, em R e em S.
- é nula apenas em R e tem o mesmo sentido em Q e em S.
- tem o mesmo sentido em Q e em S e sentido oposto em R.

Ondas eletromagnéticas

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

Julie Toy/Getty Images



As ondas eletromagnéticas possuem grande extensão de frequências, e entre elas estão as de raios X.

As ondas eletromagnéticas foram previstas teoricamente por Maxwell e confirmadas experimentalmente por Hertz, mas foi Guglielmo Marconi quem empregou as descobertas de Hertz (as ondas hertzianas) no envio de mensagens através do espaço, sem a utilização de fios.

Qual é a característica comum entre as imagens de televisão e a comunicação por telefones celulares?

Ao usar a internet para acessar *sites* de outros países, de que maneira a informação é transferida?

Como as ondas eletromagnéticas podem ser utilizadas na Medicina?

O espectro eletromagnético

O século XIX teve uma posição de destaque no desenvolvimento da Eletricidade, do Magnetismo e da Óptica, mais especificamente da natureza da luz. O ponto culminante dessa evolução foi a previsão e, posteriormente, a comprovação das ondas eletromagnéticas. Desse período, vamos destacar, resumidamente, alguns trabalhos.

O primeiro deles é de Thomas Young ([figura 8.1](#)). Ele doutorou-se em 1796 na Universidade de Gottingen, na Alemanha, com uma tese sobre acústica, mais especificamente sobre a voz humana. As pesquisas sobre cordas vibrantes e tubos sonoros, e a influência das experiências com ondas sonoras e sobre a interferência de ondas na água, levaram Young a apresentar à Royal Society of London, em 1801, os resultados dos seus experimentos sobre a interferência de raios luminosos, que revelavam o caráter ondulatório da luz.

O segundo trabalho é sobre a conexão entre eletricidade e magnetismo. Em 1820, Hans Christian Ørsted ([figura 8.2](#)), durante uma aula, observou a deflexão da agulha de uma bússola colocada próxima a um fio percorrido por uma corrente elétrica. Essa observação, de uma corrente elétrica gerando um campo magnético, pode ser considerada como o marco zero do Eletromagnetismo, ou seja, a unificação da Eletricidade com o Magnetismo.

O terceiro trabalho é de Michael Faraday ([figura 8.3](#)) sobre sua descoberta da indução eletromagnética, em 1831. Em um dos seus experimentos, ele descobriu que era possível produzir uma corrente elétrica por meio de um ímã em movimento na região onde se encontrava um fio condutor.

Na segunda metade do século XIX, entre 1864 e 1865, James Clerk Maxwell (Veja a seção Em construção na página 180) unificou as teorias sobre eletricidade e magnetismo existentes na época em um conjunto de equações, que passariam a ser conhecidas como **equações de Maxwell**. A importância desse trabalho é comparável à formulação das leis dos movimentos por Newton.

Além de as equações de Maxwell englobarem as leis da Eletricidade e do Magnetismo, elas tiveram uma consequência fundamental: previam a existência de **ondas eletromagnéticas** que se deslocam no vácuo com a velocidade da luz, ou seja, 300 000 km/s. Essa previsão foi verificada experimentalmente por Henrich Rudolf Hertz ([figura 8.4](#)) em 1887, utilizando uma fonte de frequência conhecida para produzir ondas eletromagnéticas estacionárias.

Hertz mediu o comprimento de onda e, como a frequência da onda é igual à da fonte, ele, usando a equação fundamental da ondulatória, $v = \lambda \cdot f$, verificou que a velocidade da onda era igual à da luz, comprovando a teoria de Maxwell. Em reconhecimento ao trabalho de Hertz, a unidade de frequência no Sistema Internacional de medidas (SI) recebeu o nome de hertz.



Figura 8.1 Retrato de Thomas Young (1773-1829).



Figura 8.2 Retrato de Hans Christian Ørsted (1777-1851).



Figura 8.3 Retrato de Michael Faraday (1791-1867).



Figura 8.4 Retrato de Henrich Rudolf Hertz (1857-1894).

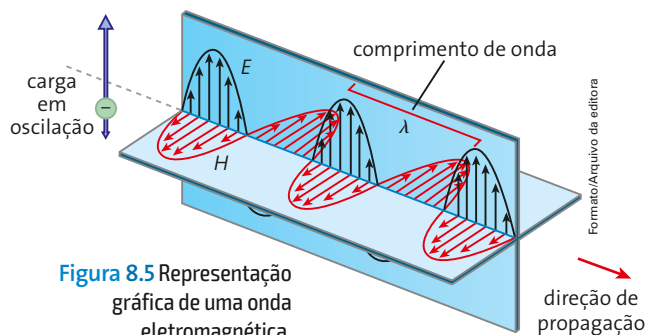


Figura 8.5 Representação gráfica de uma onda eletromagnética.

Mas o que são ondas eletromagnéticas? Elas são, basicamente, um campo magnético perpendicular a um campo elétrico (**figura 8.5**). Assim como produzimos ondas mecânicas na água por meio da agitação de uma varinha, podemos produzir ondas eletromagnéticas no ar mediante a variação de uma corrente elétrica, do movimento de uma carga elétrica, de um campo elétrico ou magnético. A frequência das ondas produzidas é igual à frequência da fonte.

Como todas as ondas eletromagnéticas se propagam com a mesma velocidade no vácuo – com a velocidade da luz – sua classificação é feita com base na frequência ou no comprimento de onda. As frequências das ondas eletromagnéticas variam de alguns ciclos por segundo (Hz) a valores quase inimagináveis, como 10^{22} Hz, que é a frequência de alguns raios cósmicos. Em termos de comprimento de onda, temos uma variação que inclui valores extremamente pequenos, da ordem de 10^{-15} m, até valores da ordem de metros.

Na **figura 8.6**, temos o chamado **espectro eletromagnético**, que inclui as ondas eletromagnéticas com suas frequências e comprimentos de onda correspondentes. Cada tipo de onda eletromagnética é produzido por um dispositivo diferente. Por exemplo, obtemos ondas de rádio por meio de circuitos elétricos oscilantes, e os raios X, que compreendem frequências muito altas, são obtidos por oscilações que ocorrem em nível atômico, ou pela desaceleração brusca de elétrons.

Observamos na **figura 8.6** que as ondas de rádio são as ondas eletromagnéticas com menor frequência e maior comprimento de onda; em seguida, temos: micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama. Nesse espectro, os raios gama são as ondas eletromagnéticas com maior frequência e menor comprimento de onda.

Do mesmo modo que as ondas mecânicas, as eletromagnéticas transportam energia, sem transporte de matéria. O forno de micro-ondas é um excelente exemplo prático que confirma essa declaração: a energia transportada pelas ondas eletromagnéticas é utilizada no aquecimento de alimentos.

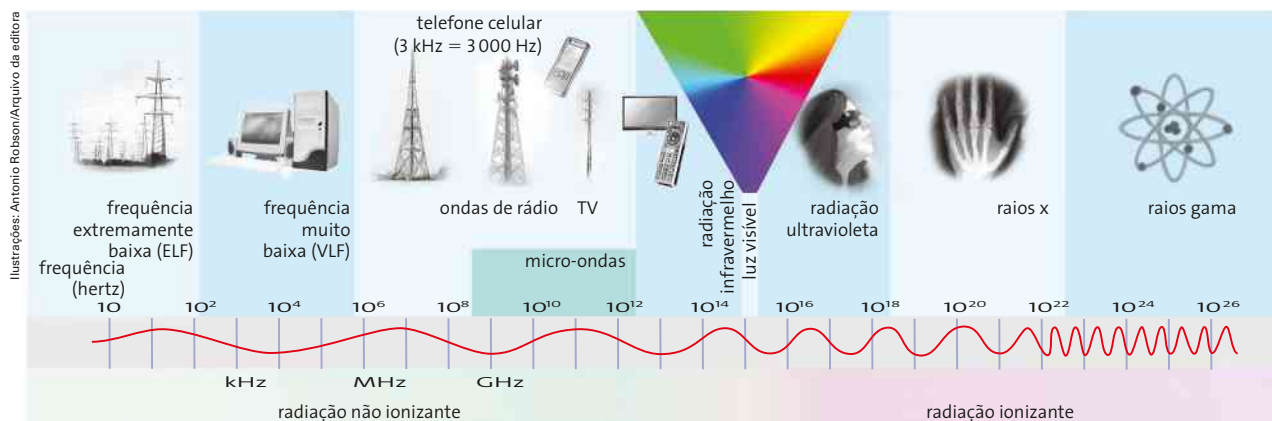


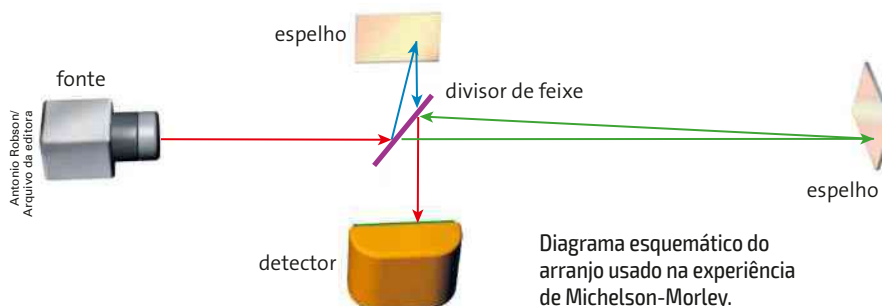
Figura 8.6 Classificação das ondas eletromagnéticas. Representação sem escala e em cores fantasia.



O éter e as ondas eletromagnéticas

Quando Maxwell apresentou seu trabalho com a previsão das ondas eletromagnéticas, era do conhecimento da época que as ondas mecânicas necessitam de um meio para se propagar e que a luz se propagava em um meio hipotético denominado “éter”, que permeava todo o espaço. Essa ideia do éter era uma concepção antiga: no século IV a.C., Aristóteles defendia que o espaço entre os corpos celestes era preenchido por essa substância invisível. Isso tudo levou Maxwell a admitir que as ondas eletromagnéticas também necessitassem de um meio para se propagar, e esse meio era o éter.

Em 1887, dois cientistas estadunidenses, Albert Abraham Michelson, primeiro estadunidense a ganhar um Prêmio Nobel de Física (em 1907), e Edward William Morley, utilizaram um dispositivo experimental denominado interferômetro (figura abaixo) que, para comprovar a existência do éter, levava em conta o movimento da Terra em relação a ele.



Retrato de Albert Abraham Michelson (1852-1931).



Retrato de Edward William Morley (1838-1923).

Esse experimento entrou para a História. Repetido várias vezes, e em diferentes épocas do ano, o resultado era sempre o mesmo: não se conseguia detectar o éter. Os resultados fizeram com que o éter fosse desconsiderado e se compreendesse que as ondas eletromagnéticas não necessitavam de um meio para a sua propagação.

1. Que nome se dava ao suposto meio material que, segundo se acreditava, servia de suporte para a propagação das ondas eletromagnéticas?
2. Qual foi a contribuição dos físicos experimentais Michelson e Morley para o estudo das ondas eletromagnéticas?

Exercício resolvido

1. Ondas eletromagnéticas podem ser produzidas por meio da agitação de um bastão eletricamente carregado. Sabendo-se que o comprimento de onda da luz amarela é de 580 nanômetros ($580 \cdot 10^{-9} \text{ m}$) e que a frequência das ondas produzidas é a de oscilação da fonte, com que frequência um bastão eletrizado deve ser agitado para se produzir luz amarela?



Resolução:

Sendo a velocidade da onda correspondente à luz amarela igual a $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (velocidade da luz), temos:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow 3 \cdot 10^8 = 580 \cdot 10^{-9} \cdot f \Rightarrow f = 5,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Esse resultado nos fornece a frequência da luz amarela e também a de oscilação do bastão eletrizado (fonte). Então, para produzir luz amarela, o bastão eletrizado deve ser agitado com uma frequência de $5,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, ou seja, 520 trilhões de vezes por segundo.

Exercícios

2. A frequência da estação A é 10 vezes maior que a frequência da estação B.

1. Suponha que ondas eletromagnéticas com comprimento de onda igual a $1,2 \cdot 10^{-4}$ m sejam produzidas no vácuo. Em que frequência devemos sintonizar um receptor para captar essas ondas? $f = 2,5 \cdot 10^{12}$ Hz
2. Uma estação de rádio (A) transmite seus programas em ondas curtas de 40 m. Outra estação (B) transmite seus programas em ondas de 400 m. Qual é a relação entre as frequências dessas duas estações?
3. (UFJF-MG) Sabe-se que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende do meio em que ela se propaga. Assim sendo, pode-se afirmar

que uma onda eletromagnética na região do visível ao mudar de um meio para outro:

- a) tem a velocidade de propagação alterada, bem como a sua frequência.
- b) tem a sua cor alterada, permanecendo com a mesma frequência.
- c) tem a velocidade de propagação alterada, bem como a frequência e o comprimento de onda.
- ☒ d) tem a velocidade de propagação alterada, bem como o seu comprimento de onda.
- e) tem a sua cor inalterada, permanecendo com o mesmo comprimento de onda.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.



Ondas de rádio

As **ondas de rádio**, produzidas por circuitos elétricos cujas tensões e correntes variam de maneira oscilatória, são aquelas cujo comprimento de onda varia de alguns metros a centenas de quilômetros ou, em termos de frequência, de 10^2 Hz a 10^9 Hz, aproximadamente.

Basicamente, as ondas de rádio são utilizadas para a comunicação entre dois pontos e seu campo de ação inclui as transmissões de rádio, televisão, telefone e dados da internet.

Produzidas inicialmente por Hertz, as ondas de rádio ganharam grande impulso quando Guglielmo Marconi (**figura 8.7**), um engenheiro italiano, fez, no início do século XX, a primeira transmissão telegráfica através do canal da Mancha, usando o telégrafo sem fio.



Figura 8.7 Retrato de Guglielmo Marconi (1874-1937).

Trabalho em equipe

Em 1892, o padre brasileiro Landell de Moura construiu o primeiro transmissor sem fio para o envio de mensagens. Em 1894, realizou a primeira transmissão por meio de ondas eletromagnéticas, entre o alto da avenida Paulista e o alto de Santana, em São Paulo, cobrindo uma distância de 8 km. Entre 1903 e 1904, Landell de Moura patenteou, nos Estados Unidos, três inventos: o transmissor de ondas hertzianas, o telefone sem fio e o telégrafo sem fio.

Façam uma pesquisa sobre o padre Landell de Moura. Levantem os seguintes dados:

- onde nasceu, cresceu e estudou esse brilhante brasileiro;
- que dificuldades as autoridades brasileiras, civis e eclesiásticas da época impuseram ao seu trabalho;
- qual era a essência do trabalho dele.

Ao final do trabalho, respondam no caderno: seria justo chamar as ondas hertzianas de landellianas? Justifiquem a resposta.



Retrato do padre Landell de Moura (1861-1928).

Reprodução/Arquivo da editora

As ondas de rádio, e também as demais ondas eletromagnéticas, se propagam muito mais rápido e têm alcance muito maior que as ondas sonoras. Enquanto você está ouvindo um programa de rádio, seu aparelho está detectando ondas eletromagnéticas transmitidas pela emissora, quase que instantaneamente, e convertendo-as em ondas sonoras. Os astronautas que pisaram na Lua também se comunicaram com a Terra dessa forma.

De acordo com a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), são denominadas radiofrequências as frequências situadas na faixa entre 0 Hz e 3 000 GHz, conforme definido pela União Internacional de Telecomunicações (UIT).

No Brasil, para as transmissões de som e imagem (rádio e televisão) são usadas antenas ou torres (figura 8.8) que utilizam frequências que variam de 540 kHz a 2 GHz. As estações de rádio que operam na faixa de 540 kHz a 1 700 kHz utilizam as chamadas ondas médias (MF) e realizam transmissões nacionais. Para as transmissões internacionais, as emissoras utilizam as denominadas ondas curtas ou HF (*High Frequency*, alta frequência), de 2 MHz a 25 MHz, em razão de sofrerem reflexão na ionosfera (camada atmosférica da Terra), o que normalmente não ocorre com as ondas médias.

Na faixa de frequência entre 30 MHz e 300 MHz, temos as transmissões em VHF (*Very High Frequency*, frequência muito alta), que são usadas principalmente nas rádios FM e em estações de TV. As ondas de TV apresentam grande vantagem nas transmissões, pois podem ser utilizadas entre continentes, por meio de satélites retransmissores.

De 300 MHz a 2 GHz, temos as transmissões em UHF (*Ultra High Frequency*, frequência ultra-alta), usadas geralmente em televisão e outros tipos de comunicação.

Nas transmissões radiofônicas, o ponto fundamental é a conversão de ondas sonoras, que se situam na faixa de 20 Hz a 20 kHz, em ondas de rádio (eletromagnéticas), na faixa de 540 kHz (AM) a 90 MHz (FM). É necessário que a onda de rádio (eletromagnética) seja modulada pelo sinal de áudio (onda sonora) para a transmissão do som. Essa modulação pode ser na amplitude ou na frequência da onda de rádio.

Se a modulação for na amplitude, temos a transmissão em **AM** (amplitude modulada); se for na frequência, temos a transmissão em **FM** (frequência modulada).

Cada emissora dispõe de uma pequena faixa de frequências em que pode transmitir as suas ondas moduladas. Ao receber a onda, o aparelho receptor considera somente as modulações e as converte em sinal sonoro. Para sintonizar a emissora desejada, basta escolher no receptor a frequência que coincide com a da emissora.

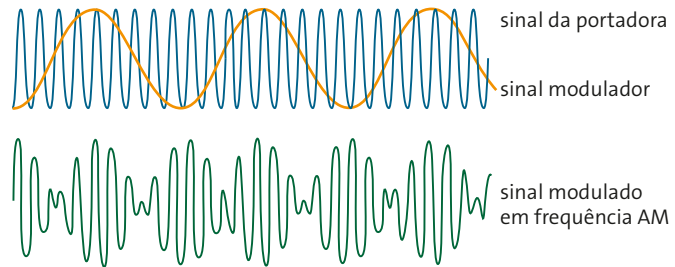


Ernesto Reghian/Pulsar Imagens

Figura 8.8 Torre de transmissão de ondas de televisão. Praça das Fontes, Brasília (DF), 2014.

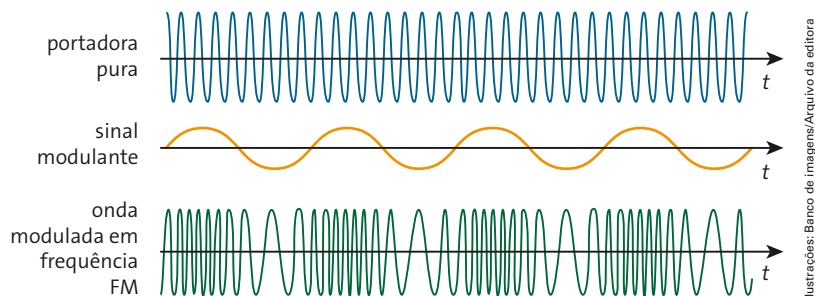
Na **figura 8.9**, apresentamos o esquema de funcionamento de uma típica transmissão em AM. Devemos observar que, não fosse o sinal de áudio (onda sonora) modulando a onda portadora (onda eletromagnética), esta teria amplitude constante no decorrer do tempo e, nesse caso, nenhuma informação seria transmitida.

Figura 8.9 Esquema da transmissão em AM. A amplitude da onda portadora característica de uma dada emissora é modulada pelo sinal de áudio que, em seguida, é transmitido para o receptor.



Conforme mostra a **figura 8.10**, nas transmissões em FM a frequência da onda portadora característica de uma dada emissora é modulada pelo sinal de áudio que, em seguida, é transmitido para o receptor.

Figura 8.10 Esquema da transmissão em FM. As alterações de frequência estão representadas com exagero, para maior clareza.



Ilustrações: Banco de Imagens/Arquivo da editora

As amplitudes das ondas são afetadas por obstáculos e variações atmosféricas, o que não ocorre com as frequências. Em razão disso, as transmissões em FM têm muito mais fidelidade do que aquelas em AM, em relação ao sinal original.

Exercícios

4. b) Emissoras AM: $\lambda_{\text{menor}} = 193,5 \text{ m}$; $\lambda_{\text{maior}} = 545,5 \text{ m}$.
Emissoras FM: $\lambda_{\text{menor}} = 2,8 \text{ m}$; $\lambda_{\text{maior}} = 3,4 \text{ m}$.

Veja respostas das questões 4.a e 8 no Manual do Professor.



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

4. Na maioria dos rádios receptores existe um botão que permite a opção entre as emissoras AM, que operam entre 550 kHz e 1550 kHz, e as emissoras FM, que operam entre 88 MHz e 108 MHz. Nessas condições, responda:
 - a) Com o botão na opção AM é possível sintonizar uma emissora FM? Justifique.
 - b) Considerando que, no ar, a velocidade das ondas eletromagnéticas vale 300 000 km/s, quais são o menor e o maior comprimento de onda das ondas emitidas pelas emissoras AM e FM?
5. Comente a afirmativa seguinte: “Como os aparelhos de rádio emitem sons, podemos concluir que as ondas de rádio são ondas sonoras”.

6. Leia o texto a seguir: “As radiações ionizantes estão localizadas na faixa de frequências acima de 10^{15} Hz e são capazes de produzir alterações químicas em tecidos do corpo humano”.
Com base no espectro eletromagnético mostrado na **figura 8.6**, justifique se radiofrequências utilizadas na televisão são, ou não, radiações ionizantes. *Essas radiofrequências não são ionizantes.*
7. Na **figura 8.9**, que ilustra uma transmissão em AM:
 - a) Qual é a função da onda portadora?
 - b) A onda portadora é uma onda mecânica ou eletromagnética? *Onda eletromagnética.*
7. a) *A função da onda portadora é transmitir o som.*
8. Explique a função do modulador nas transmissões em AM (**figura 8.9**) e naquelas em FM (**figura 8.10**).

5. A afirmativa é falsa, pois as ondas de rádio são ondas eletromagnéticas.

3 Micro-ondas

As radiações denominadas **micro-ondas** são produzidas por correntes alternadas em tubos de vácuo. São ondas eletromagnéticas que possuem frequências que variam de 1 GHz a 100 GHz, ou, em termos de comprimento de onda, de 1 mm a 1 m. No espectro eletromagnético, localizam-se entre as ondas de rádio e a região do infravermelho.

Entre 1940 e 1950, tivemos uma das primeiras aplicações das micro-ondas nos radares. A palavra “radar” (*Radio Detection and Ranging*) significa ‘detecção e localização por ondas de rádio’ (**figura 8.11**). No entanto, a utilização das micro-ondas em substituição às ondas de rádio representou um grande avanço nesse setor, pois as micro-ondas têm comprimento de onda inferior ao das ondas de rádio e, por isso, sofrem menos os efeitos da difração.

Na transmissão de uma estação de rádio, todos os que possuem um receptor podem captar as informações emitidas pela estação. Por isso, quando se deseja transmitir informações para um receptor específico, como o celular, as micro-ondas são mais utilizadas do que as ondas de rádio. Ainda em relação às comunicações, as micro-ondas também levam vantagem sobre as ondas de rádio por apresentarem maior frequência e, conseqüentemente, transmitirem maior número de informações. Mas existe um inconveniente: o envio de informações a grandes distâncias por meio de micro-ondas requer a utilização de antenas receptoras e transmissoras próximas entre si (a uma distância de cerca de 40 km), pois essas ondas não se refletem na alta atmosfera.

Do mesmo modo que, com a radioastronomia, as ondas de rádio deram início a uma nova era na Astronomia, as micro-ondas deram início a uma nova era no estudo da Cosmologia graças à descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas.

Essa radiação, descoberta em 1964 por Arno Penzias (1933-) e Robert Wilson (1936-), é um tipo de ruído que permeia todo o Universo desde os seus primórdios. Ela é um forte argumento em favor da teoria do *big-bang*, proposta em 1940 para explicar a formação do Universo. Em razão da importância da descoberta da radiação cósmica de fundo (**figura 8.12**), Penzias e Wilson receberam o Prêmio Nobel de Física, em 1978.



Figura 8.11 Antenas de um radiotelescópio. Deserto do Atacama, Chile, em 2013.

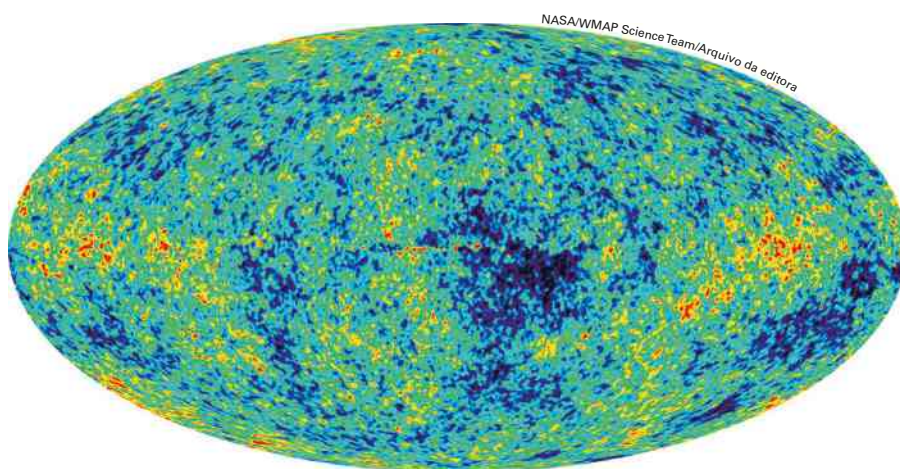


Figura 8.12 Mapa da radiação cósmica de fundo.

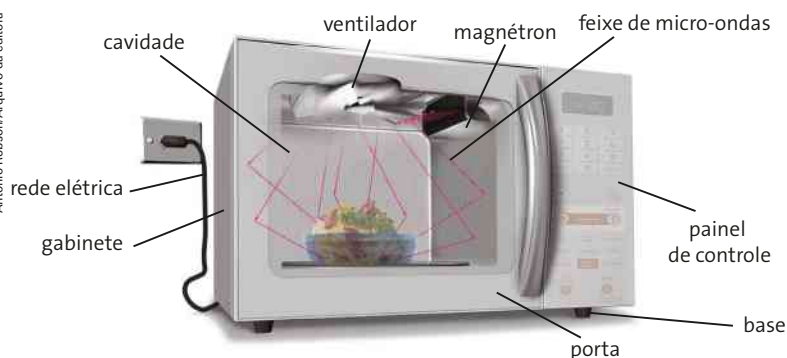


Figura 8.13 Representação (sem escala e em cores fantasia) dos principais componentes de um forno de micro-ondas e seu funcionamento.

O **forno de micro-ondas** é uma aplicação tecnológica das micro-ondas que revolucionou o modo de vida das pessoas. Nesse equipamento, o aumento de temperatura para o aquecimento ou o cozimento de alimentos hidratados é provocado pela vibração das radiações de micro-ondas quando estas interagem com as moléculas de água presentes nesses alimentos. Nos alimentos não hidratados, o processo é o mesmo, mas a temperatura não se eleva tanto, e as radiações de micro-ondas não os afetam muito, nem os recipientes (de alimentos hidratados ou não), como xícaras, pratos, etc.

Na **figura 8.13** temos a representação de um forno de micro-ondas, com os seus principais componentes. A maioria dos fornos domésticos utiliza micro-ondas com frequência de 2,45 GHz, o que proporciona um comprimento de onda similar às dimensões do forno.

No forno de micro-ondas, as radiações são geradas no magnétron e encaminhadas para a câmara de cozimento. Esta possui paredes metálicas que refletem continuamente as micro-ondas, fazendo-as retornar para os alimentos e interagir com as moléculas de água presentes neles.

As micro-ondas também são utilizadas na **telefonía celular** (**figura 8.14**). No Brasil, a faixa de frequência de micro-ondas utilizada pelos telefones celulares varia de 825 MHz a 890 MHz, o que corresponde a comprimentos de onda de 36 cm a 34 cm, aproximadamente.

De acordo com a Anatel, em 2014, o número de linhas de telefone móvel no Brasil era de aproximadamente 280 milhões. Na **figura 8.15** podemos notar como o crescimento desse setor é surpreendente.

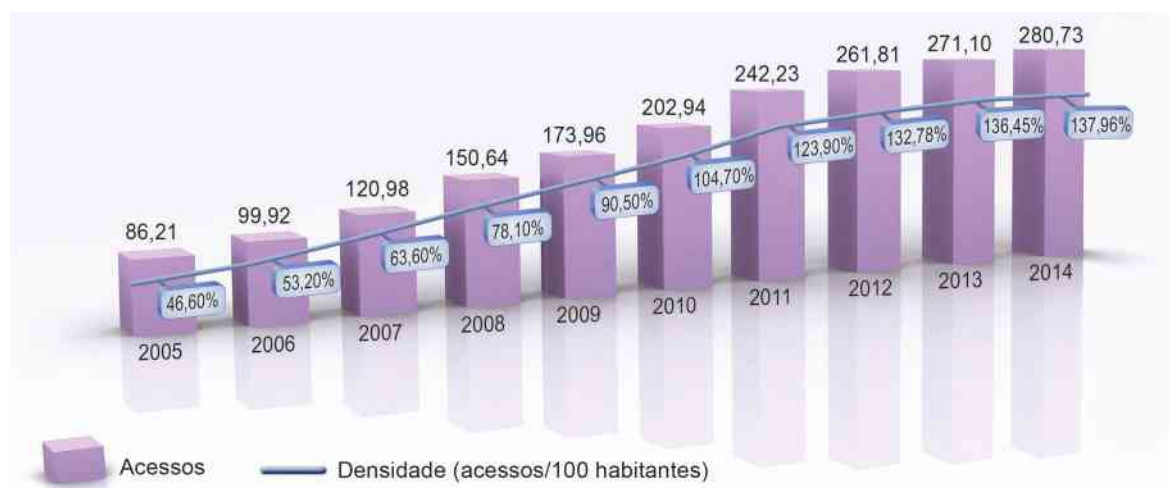
Se, por um lado, é indiscutível a importância do telefone celular na vida das pessoas, por outro, dois pontos são preocupantes.



Figura 8.14 O aparelho celular está cada vez mais presente no cotidiano das pessoas.



Evolução do acesso ao Serviço Móvel Pessoal (SMP) por ano, em milhões



Fonte: RELATÓRIO Anual da Anatel 2015. Disponível em: <www.anatel.gov.br>. Acesso em: jan. 2016.

Figura 8.15

O primeiro ponto é a quantidade de antenas transmissoras/receptoras, que emitem radiação 24 horas por dia, existentes no país. Embora as micro-ondas não sejam **radiações ionizantes**, como os raios X e os raios gama, pois seus efeitos são estritamente térmicos e, em princípio, não alteram a estrutura molecular do material irradiado, os cientistas têm desenvolvido pesquisas com o objetivo de obter resultados conclusivos sobre os efeitos dessa radiação no organismo humano em função do tempo de exposição.

O segundo ponto é a quantidade de horas que as pessoas, principalmente os jovens, convivem com esses aparelhos e outros equipamentos. É comum observarmos crianças substituindo atividades físicas por atividades que envolvem o uso desses equipamentos eletrônicos.

A Medicina é uma área promissora para a aplicação das micro-ondas. Partindo do fato de que elas são usadas para o aquecimento ou o cozimento de alimentos hidratados no forno de micro-ondas, os cientistas pesquisam seu uso em seres humanos, uma vez que o corpo humano é constituído principalmente de água.

Verificando que tumores cancerígenos se aquecem com mais facilidade que o tecido normal, quando expostos às micro-ondas, alguns pesquisadores em Medicina têm usado essa radiação nas cirurgias de câncer de mama. O aquecimento por micro-ondas de baixa potência parece também ser útil no tratamento de inflamações como artrite e reumatismos. No entanto, o uso das micro-ondas em Medicina é restrito às áreas experimentais, pois ainda não estão bem estabelecidos os critérios de utilização segura dessa radiação.

CARVALHO, Regina Pinto de. *Micro-ondas*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

Radiação ionizante –
Uma radiação é denominada ionizante quando possui energia suficiente para ionizar a matéria, ou seja, arrancar elétrons dos átomos da matéria com a qual interage, transformando-os em íons.

Exercícios



9. Um professor pretende demonstrar o fenômeno da difração com ondas eletromagnéticas e dispõe de duas fontes: uma de ondas de rádio e outra de micro-ondas. Com qual delas será mais fácil demonstrar o fenômeno?
[Com as ondas de rádio.](#)
10. Quando aquecemos uma caneca com leite em um forno de micro-ondas, observamos que o leite fica mais quente do que a caneca. Como você explica esse fato, se os dois ficaram o mesmo tempo dentro do forno?
[Veja resposta no Manual do Professor.](#)
11. O professor doutor Vitor Baranauskas, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp-SP), na página 44 de seu livro *O celular e seus riscos*, afirma que:

As micro-ondas, ao serem absorvidas pelo organismo humano, geram aquecimento, ou seja, aumentam a temperatura corpórea. Esse aquecimento não é homogêneo, pois os tecidos ou órgãos têm diferentes taxas de absorção específica. Um exemplo simples para ilustrar essa questão das diferentes taxas de absorção é o problema do “frango no micro-ondas”. Pode-se observar que o frango preparado no forno de micro-ondas doméstico pode ter o seu interior completamente cozido, enquanto sua pele continua crua. Isso ocorre porque a pele, por ter pouca água, tem uma taxa de absorção muito menor do que as partes internas do frango e, como consequência, ainda não está cozida quando, comparativamente, o interior do frango já está pronto.

De acordo com o texto, pode-se concluir que:

- x a) uma pessoa exposta à radiação micro-ondas poderá sofrer queimaduras internas, sem que haja nenhuma transformação visível em sua pele.
- b) as pessoas que utilizam aparelhos celulares não correm esse risco, pois os celulares utilizam ondas eletromagnéticas com frequências inferiores às das radiações micro-ondas.
- c) o organismo humano não absorve radiações micro-ondas, pois elas não atravessam a pele.
- d) o aquecimento irregular do frango pelas radiações micro-ondas só ocorre se ele contiver água em seu interior.



4 Outras ondas eletromagnéticas

Radiações infravermelhas

As radiações **infravermelhas** são aquelas produzidas nas camadas eletrônicas mais externas de átomos e moléculas. Situam-se na faixa de frequência de 10^{12} Hz a 10^{14} Hz (valores aproximados). Os comprimentos de onda dessa radiação variam de 1 milionésimo de metro a 1 milímetro, aproximadamente.

A descoberta da radiação infravermelha data de 1800 e é atribuída ao astrônomo alemão Friedrich Wilhelm Herschel (1738-1822). Herschel, ao realizar experiências sobre as temperaturas das cores do espectro solar, observou que, além de ser maior na região do vermelho, a temperatura aumentava ainda mais além dessa região, já fora do espectro visível.

O corpo humano é um excelente sensor da radiação infravermelha. Ao nos colocarmos próximos de uma fogueira, o nosso corpo acusa a presença dessas radiações e as absorve na forma de calor. A radiação infravermelha emitida pelo Sol, junto com a luz visível e a ultravioleta, é fundamental para o desenvolvimento da vida na Terra.

Existem muitos materiais sensíveis à radiação infravermelha que podem ser usados como sensores. Na [figura 8.16](#), podemos ver torneiras de pia que funcionam automaticamente quando colocamos as mãos sob elas.



Figura 8.16 Pessoa utilizando uma torneira automática. Na base da torneira podemos visualizar o dispositivo que emite radiação infravermelha.

No interior da torneira, existe um dispositivo que emite radiações na faixa do infravermelho. Essas radiações são refletidas no interior da pia e retornam ao dispositivo. A colocação das mãos interceptando esse feixe aciona um mecanismo que libera o fluxo de água. A retirada das mãos faz com que o sistema volte à situação original, e o fluxo de água é interrompido.

As radiações infravermelhas também são utilizadas nos controles remotos, muito comuns para acionar aparelhos de TV, rádio, ar-condicionado, etc. Ao acionarmos o botão do controle remoto para mudar o canal de um aparelho de TV, por exemplo, fazemos com que pulsos de radiação infravermelha, invisíveis aos olhos, sejam emitidos. Esses pulsos são detectados por um sensor no aparelho, que interpreta a mensagem enviada.

Krichanur/Shutterstock

Todo corpo com temperatura acima de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zero absoluto) emite radiação infravermelha. Assim, detectores de infravermelho são usados, por exemplo, para localizar aviões, pessoas e animais (figura 8.17), bem como para determinar a temperatura destes.

A sensibilidade à radiação infravermelha varia de animal para animal. Em alguns casos, essa sensibilidade pode significar a sobrevivência da espécie. Por exemplo, a extrema sensibilidade das cobras ao infravermelho lhes permite a localização de presas, mesmo durante a noite.

Na Medicina também encontramos aplicações das radiações infravermelhas. O uso de fotografias térmicas (obtidas com radiação infravermelha) tem permitido, em algumas áreas, diagnósticos que normalmente não se conseguiria com a luz visível ou com os raios X.

Outro campo que se utiliza das radiações infravermelhas é a Astronomia. Com câmeras infravermelhas, os astrônomos e pesquisadores têm obtido informações sobre os corpos celestes que normalmente os telescópios ópticos não conseguem fornecer (figura 8.18).

Luz visível

A região do espectro eletromagnético denominada **luz visível** é gerada por elétrons que, excitados, mudam de estado e ao retornarem ao estado inicial emitem radiação na forma de luz visível. Essa região ocupa uma estreita faixa no espectro eletromagnético que vai do vermelho, com comprimento de onda de 750 nm, ao violeta, com comprimento de onda de 400 nm. São radiações eletromagnéticas que se situam na faixa de frequência entre $4 \cdot 10^{14}$ Hz (vermelho) e $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz (violeta) e conseguem sensibilizar a retina do olho humano, provocando a sensação de visão (figura 8.19).



Figura 8.17 Pessoa usando binóculo de visão infravermelha.



Figura 8.18 Imagem do centro da Via Láctea feita a partir de infravermelho.

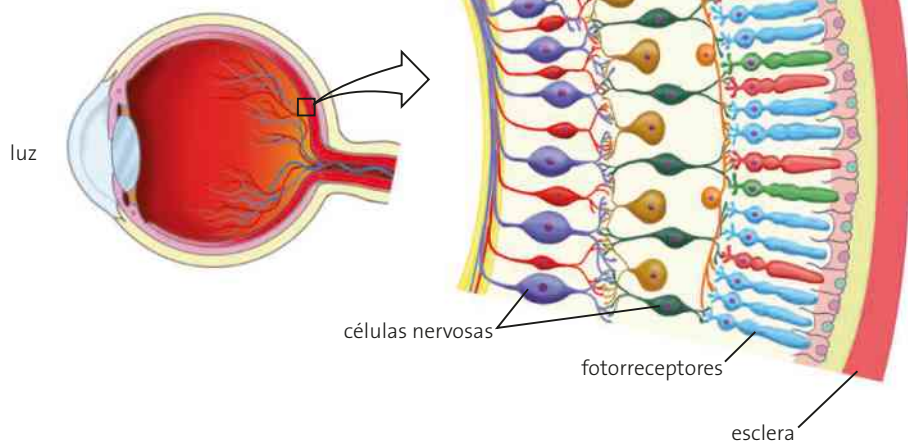
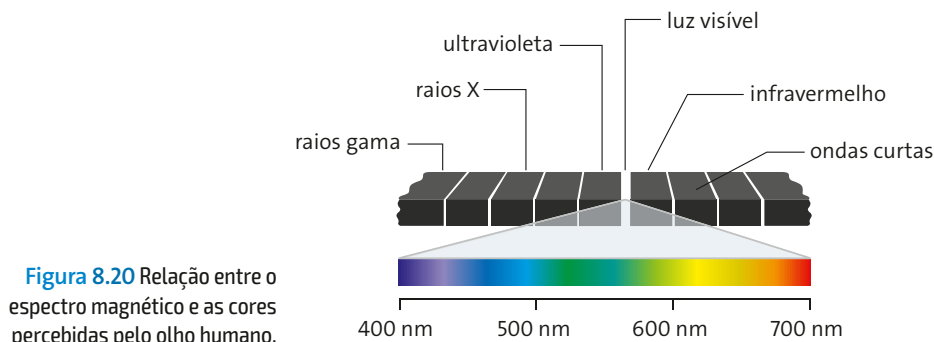


Figura 8.19 Esquema do olho humano com destaque para os elementos responsáveis pela visão. Representação sem escala e em cores fantasia.

Cada cor componente da luz visível (**figura 8.20**), com seu comprimento de onda e frequência característicos, ao interagir com a retina dos olhos provoca uma sensação diferente, o que é interpretado pelo cérebro como uma cor diferente.

A seguir, vamos utilizar a luz para comentar os fenômenos de polarização, difração e interferência, aos quais todas as ondas eletromagnéticas estão sujeitas em condições favoráveis.



Osmi de Oliveira/Arquivo da editora

Figura 8.20 Relação entre o espectro magnético e as cores percebidas pelo olho humano.

Polarização da luz

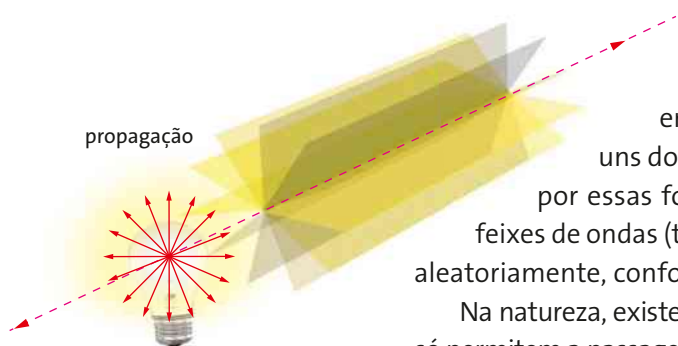


Figura 8.21 Propagação de um feixe de ondas não polarizadas.

Nas fontes de luz comuns, como o Sol, as lâmpadas incandescentes ou a luz das velas, os osciladores elementares são os átomos ou elétrons em transições de energia que atuam independentemente uns dos outros. Por essa razão, quando captamos a luz emitida por essas fontes em uma dada direção, ela é composta de vários feixes de ondas (trens de onda), com vários planos de vibração, orientados aleatoriamente, conforme mostra a **figura 8.21**.

Na natureza, existem alguns cristais que são chamados de polarizadores. Eles só permitem a passagem dos componentes da vibração eletromagnética referente a um determinado plano. Também existem polarizadores produzidos industrialmente, os quais são utilizados em alguns tipos de óculos e em técnicas fotográficas.

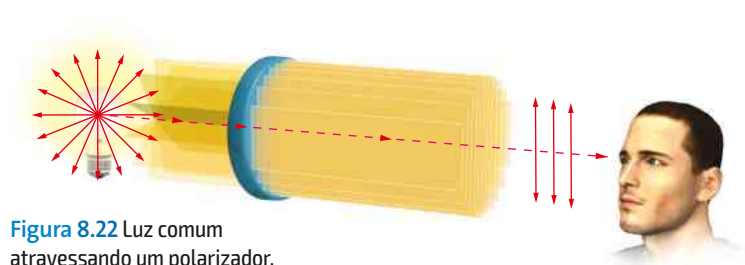


Figura 8.22 Luz comum atravessando um polarizador. Os componentes da vibração que não pertencem ao plano de polarização (plano vertical) são absorvidos.

A **figura 8.22** mostra a luz que emerge polarizada ao incidir sobre uma lâmina polarizadora. As linhas paralelas indicam o plano de polarização.

Visualmente não percebemos se determinada luz é polarizada ou não, mas podemos fazê-lo utilizando um polarizador. Nessa situação, ele é chamado de

analisador. Se o plano de polarização do analisador for perpendicular ao plano de polarização da luz incidente, praticamente nenhuma radiação emergirá do analisador (**figura 8.23**).

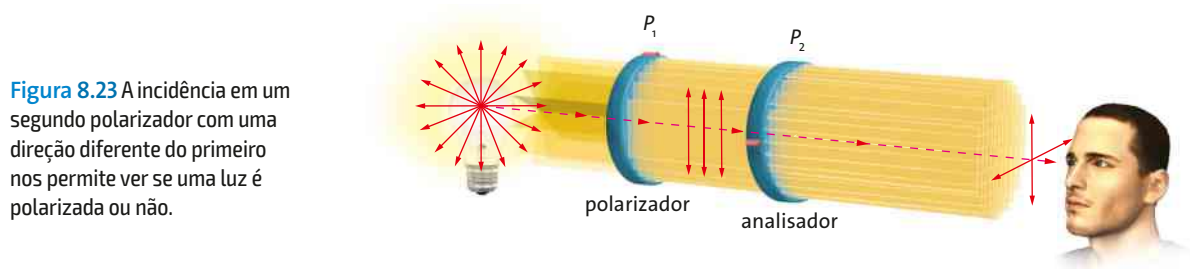


Figura 8.23 A incidência em um segundo polarizador com uma direção diferente do primeiro nos permite ver se uma luz é polarizada ou não.

Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Na **figura 8.24**, temos duas placas polarizadoras com eixos perpendiculares. Praticamente nenhuma radiação emerge da região coberta pela intersecção das duas.

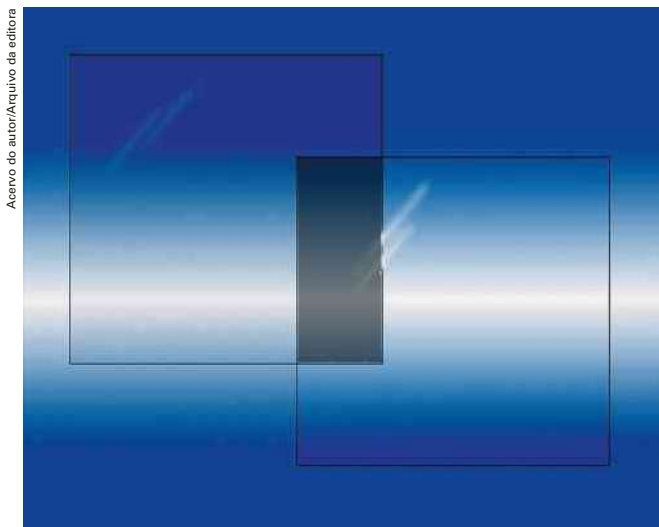


Figura 8.24 A sobreposição das placas polarizadoras em direções diferentes não permite a passagem de nenhuma luz.

A luz refletida em poças de água, vidraças e outras substâncias dielétricas é praticamente polarizada. Em determinadas condições ela pode ser totalmente polarizada. Por essa razão, certos tipos de óculos de sol, como os da **figura 8.25**, têm lentes polarizadas com eixo vertical para diminuir o ofuscamento proveniente desses reflexos.

As ondas eletromagnéticas usadas nas telecomunicações são, em sua maioria, polarizadas; por esse motivo, normalmente são necessários ajustes nas antenas para uma melhor recepção.

A polarização é um fenômeno que ocorre exclusivamente com as ondas transversais, como é o caso das ondas eletromagnéticas. As ondas longitudinais, entre elas o som, não são passíveis de polarização.

Difração e interferência da luz

No capítulo 7 do volume 2, tratamos da difração e da interferência de ondas, com ênfase nas ondas mecânicas. Embora as mesmas ideias possam ser aplicadas a todas as ondas eletromagnéticas, vamos detalhar um pouco mais esse assunto com relação à luz.

Quando uma onda consegue contornar uma fenda ou um obstáculo, ocorre difração, o que não aconteceria caso apresentasse somente propagação retilínea. No caso específico das ondas sonoras, como os obstáculos apresentam dimensões da ordem do comprimento de onda do som – pois no ar variam de 1,7 cm a 17 m –, satisfazendo a condição básica para a difração, este fenômeno é percebido no dia a dia. Um exemplo disso é o som de um rádio, que pode ser ouvido mesmo se o aparelho estiver atrás de uma parede.

No caso específico da luz, essa condição também é verificada. A difração ocorre quando uma onda luminosa atinge uma fenda com dimensões da ordem do comprimento de onda da luz. Ao atravessar a fenda, a onda espalha-se, assumindo uma forma praticamente esférica, conforme a **figura 8.26**.



Figura 8.25 Observe que a superposição das lentes em diferentes direções ocasiona o ofuscamento da luz.

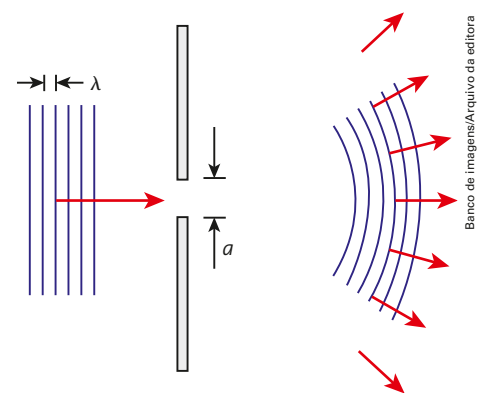


Figura 8.26 Quanto menor for a largura da fenda, mais acentuada será a difração. Representação sem escala e em cores fantasia.

Para ilustrar o fenômeno da interferência da luz, vamos utilizar a **figura 8.27**, na qual uma luz monocromática, após passar pela fenda S_0 , atravessa as fendas S_1 e S_2 e atinge a tela na qual se forma uma figura de interferência constituída por faixas. As faixas brilhantes indicam uma interferência construtiva, e as escuras, uma interferência destrutiva.

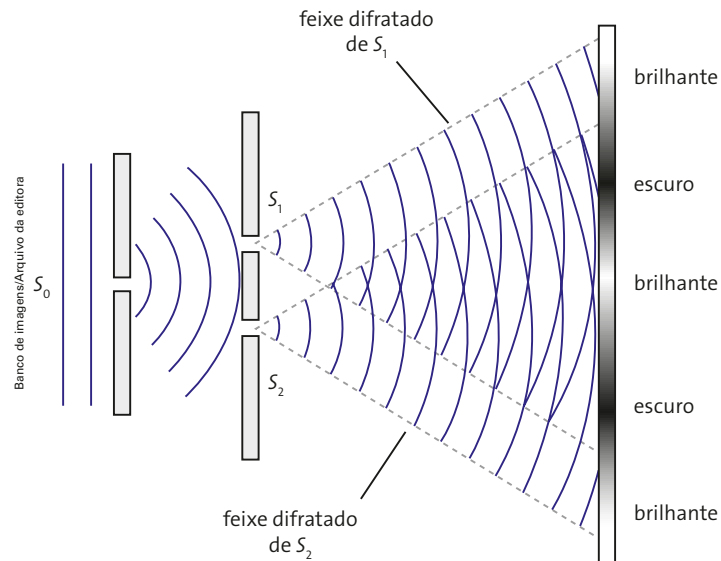
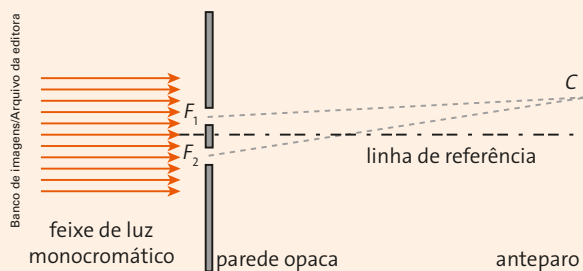


Figura 8.27 Representação (sem escala e em cores fantasia) do dispositivo semelhante ao utilizado por Thomas Young no estudo da interferência luminosa.

Exercício resolvido

2. A figura seguinte é uma representação esquemática da experiência de Thomas Young no estudo da interferência da luz.



Um feixe de luz monocromático incide perpendicularmente sobre a parede opaca da esquerda, que tem duas fendas, F_1 e F_2 , próximas entre si. A luz, após passar pelas fendas, forma uma figura de interferência no anteparo da direita. O ponto C é a posição do primeiro ponto de interferência destrutiva, contada a partir da interferência construtiva central (indicada pela linha de referência).

Sabendo-se que a diferença de percurso entre as luzes provenientes de F_1 e F_2 até o ponto C é de $2,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, determine:

- o comprimento de onda da luz utilizada no experimento;
- a cor da luz do experimento, com base na figura apresentada.



Resolução:

- a) A diferença de percurso das ondas ($\overline{F_2C} - \overline{F_1C}$) para que aconteça uma interferência destrutiva é dada por:

$$\frac{d}{\lambda} = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; \dots$$

Como se trata da primeira interferência destrutiva,

$$\text{temos: } \frac{d}{\lambda} = 0,5.$$

Nessas condições, o comprimento de onda da luz vale:

$$\lambda = \frac{d}{0,5} \Rightarrow \frac{2,7 \cdot 10^{-7}}{0,5} \Rightarrow \lambda = 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

- b) De acordo com o espectro eletromagnético e com a resposta do item **a**, a luz utilizada no experimento é verde.

Exercícios

12. Sabe-se que a energia irradiada por um corpo não é uniforme quanto aos comprimentos de onda. Há um comprimento de onda para o qual a energia irradiada é máxima. Esse comprimento de onda é inversamente proporcional

à temperatura absoluta do corpo e pode ser calculado pela **lei de Wien**: $\lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T}$.

Nessa expressão, T é a temperatura do corpo em kelvin e $\lambda_{\text{máx.}}$ é o comprimento de onda, em metros, para o qual a emissão de energia é máxima.

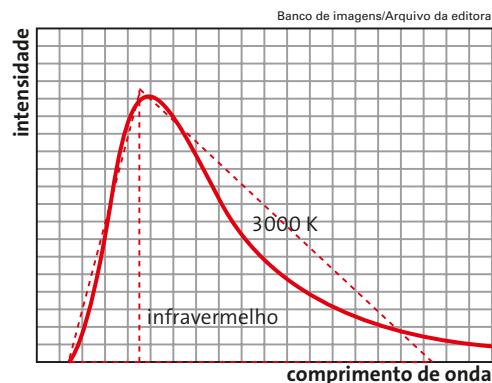
Considere que a temperatura média da pele humana seja 27 °C (300 K). Nessas condições:

- Em que comprimento de onda a pele humana emite radiação com intensidade máxima? $\lambda_{\text{máx.}} = 9,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- Localize no espectro eletromagnético a radiação correspondente ao comprimento de onda obtido no item anterior. **Radiação infravermelha.**

13. A figura ao lado apresenta a curva de distribuição de energia irradiada por um corpo a 3 000 K, que é aproximadamente a temperatura de um filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente.

Observe que a maior parte da energia é irradiada na forma de radiação infravermelha.

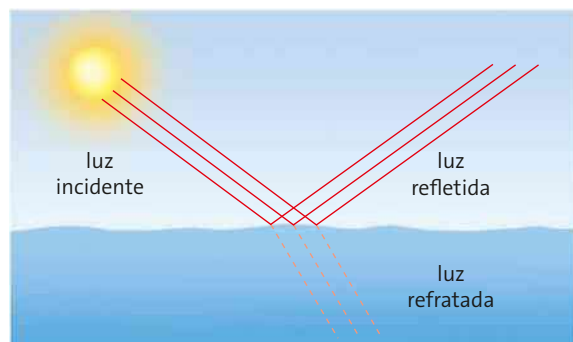
- Faça um cálculo aproximado da porcentagem de energia que é emitida no infravermelho. **81%**
- Considerando que o restante de energia seja emitido na forma de luz visível, essa lâmpada rende mais como aquecedor ou como iluminador? **A lâmpada rende mais como aquecedor.**



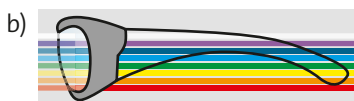
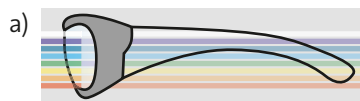
14. Normalmente, quando a luz incide sobre a superfície de um bloco de vidro ou sobre a superfície da água, parte dela é refletida, parte é refratada e parte é transmitida. Observa-se que boa parte da luz refletida é polarizada, o que caracteriza o brilho dessas superfícies (veja a figura).

Se você vai passear em um dia de sol e pretende usar óculos escuros polarizados, qual dos três apresentados a seguir é mais apropriado?

Observe que os eixos de polarização estão indicados pelas linhas retas. **Veja resposta no Manual do Professor.**



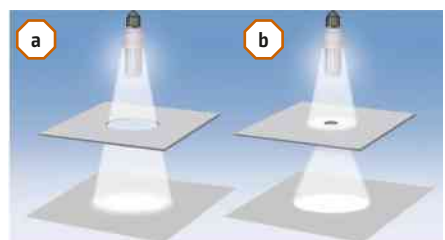
Ilustrações: Paulo Manz/Arquivo da editora



Representações sem escala e em cores fantasia.

15. Explique, em seu caderno, por que a luz pode ser polarizada, mas o som não. **A polarização só é possível para ondas transversais como as ondas eletromagnéticas, nas quais a luz se encaixa. Já o som, por ser uma onda longitudinal, não pode ser polarizado.**

16. Na parte **a** da figura seguinte, uma fonte ilumina uma placa retangular contendo um buraco de grandes dimensões. Na tela, colocada atrás da placa, observa-se uma sombra com os contornos do buraco bem definidos. Quando as dimensões do buraco são reduzidas, formando uma fenda estreita, conforme mostra a parte **b** da figura, os contornos da fenda não são muito bem definidos. Em seu caderno, explique por que isso acontece. **Veja resposta no Manual do Professor.**



Antonio Robson/Arquivo da editora

Representações sem escala e em cores fantasia.



Radiações e fisiologia

Ultravioleta

As **radiações ultravioleta**, cujas frequências variam de 10^{15} Hz a 10^{17} Hz (valores aproximados) e os comprimentos de onda, de 400 nm a 100 nm, respectivamente, são geradas pelos mesmos processos que originam a luz visível, ou seja, elétrons excitados que mudam de um estado mais energético para um menos energético, emitindo radiação.

As radiações ultravioleta foram descobertas pelo físico alemão Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) em 1801. As experiências de Ritter com cloreto de prata (AgCl) exposto à luz visível permitiram a conclusão da existência de raios invisíveis, além do violeta, no espectro solar.

Na década de 1930, a radiação ultravioleta foi classificada em três tipos: A, B e C, conforme mostra a **tabela 8.1**.



Tabela 8.1 Faixas da radiação ultravioleta segundo a Comissão Internacional de Iluminação (CIE)

Denominação da radiação ultravioleta	Intervalo de comprimento de onda (nm)	Denominação popular
A	400 – 315	luz negra
B	315 – 280	luz eritematogênica
C	280 – 100	radiação germicida

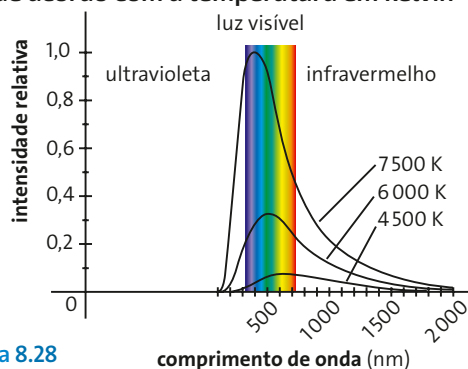
Fonte: OKUNO, Emico; VILELA, Maria A. C. *Radiação ultravioleta: características e efeitos*. São Paulo: Livraria da Física, 2005. p. 19.

A denominação popular para as radiações ultravioleta A, B e C, da **tabela 8.1** está relacionada ao uso e às características de cada tipo de radiação. Assim, a denominação **luz negra** diz respeito ao efeito fluorescente dessa radiação. Na década de 1970, a luz negra era muito usada em discotecas e casas de show.

A denominação **luz eritematogênica**, para a radiação ultravioleta B, está relacionada às queimaduras de pele provocadas por esse tipo de radiação, e a denominação **luz germicida**, para a radiação ultravioleta C, diz respeito à capacidade de destruição de germes. Essa propriedade é utilizada nos hospitais, para esterilizar instrumentos cirúrgicos.



Gráfico da intensidade relativa em função do comprimento de onda, para as radiações UV (ultravioleta), visível e IV (infravermelha), de acordo com a temperatura em kelvin



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 8.28

Fonte: BEISER, Arthur. *Concepts of Modern Physics*. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill Book Company, 1981. p. 52.

O Sol é uma fonte natural de luz visível, radiação infravermelha e radiação ultravioleta. Mas, de modo geral, todos os corpos aquecidos emitem radiações. O tipo de radiação emitida depende da temperatura do corpo, conforme mostra o gráfico da **figura 8.28**. Observe que a intensidade relativa de UV (ultravioleta), luz visível e IV (infravermelho) depende fundamentalmente da temperatura do corpo. Corpos com temperatura da ordem de 6 000 K, que é aproximadamente a temperatura da superfície do Sol, emitem os três tipos de radiação. À medida que a temperatura diminui, a intensidade relativa de UV e luz visível também diminui. À temperatura de 3 000 K, a emissão é praticamente apenas de radiação infravermelha.

De toda a radiação ultravioleta emitida pelo Sol (A, B e C) que poderia atingir a Terra, uma parte é blindada pela camada de ozônio, principalmente a radiação ultravioleta C.

Embora as radiações solares sejam essenciais ao desenvolvimento de plantas e animais, não podemos esquecer que exposições prolongadas ao sol, sem proteção, em horários de maior incidência (das 10h às 16h), podem provocar efeitos biológicos indesejáveis, tais como câncer de pele e catarata. Observamos que a pele e os olhos são os órgãos mais sensíveis à radiação ultravioleta. Assim, a utilização de loções com filtro solar e óculos protetores são recomendáveis para as pessoas que passam muito tempo expostas aos raios solares.

A interação da radiação ultravioleta de baixa energia (grandes comprimentos de onda) com a pele estimula a produção de pigmentos responsáveis pelo bronzeamento (escurecimento da pele). Por outro lado, radiações ultravioleta com pequenos comprimentos de onda possuem energia suficiente para danificar células da pele. Embora a maioria das radiações ultravioleta seja classificada como não ionizante, pode provocar a excitação de elétrons. Nesse caso, os elétrons não são arrancados do átomo, mas levados a um nível energético maior.

Raios X

Em 1895, o físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), usando um tubo com vácuo, um filamento incandescente e alta voltagem, acelerou elétrons emitidos pelo filamento. Nesse dispositivo, conhecido como tubo de raios catódicos, Röntgen utilizou um princípio bem semelhante ao dos tubos de televisão.

Ao atingir a tela do tubo, grande parte da energia dos elétrons era transformada em energia térmica. Havia também uma parte que se transformava em energia radiante. A radiação emitida, muito mais penetrante do que a luz, não era percebida pelo olho humano, mas podia sensibilizar uma chapa fotográfica. Desconhecida até então, ela foi chamada de radiação X, ou raios X.

A descoberta de Röntgen, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1901 (primeiro Prêmio Nobel de Física), teve aplicação quase imediata na Medicina, nas radiografias (figura 8.29), permitindo o acesso a regiões nas quais nossa visão não penetra.

Hoje sabemos que os raios X são radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda muito pequenos, da ordem de 10^{-10} m, e frequências muito altas, da ordem de 10^{20} Hz. São radiações extremamente energéticas, com alto poder de penetração, produzidas por oscilações que ocorrem em nível atômico, ou pela desaceleração brusca de elétrons. Os raios X e os raios gama pertencem à classe de radiações denominadas ionizantes.

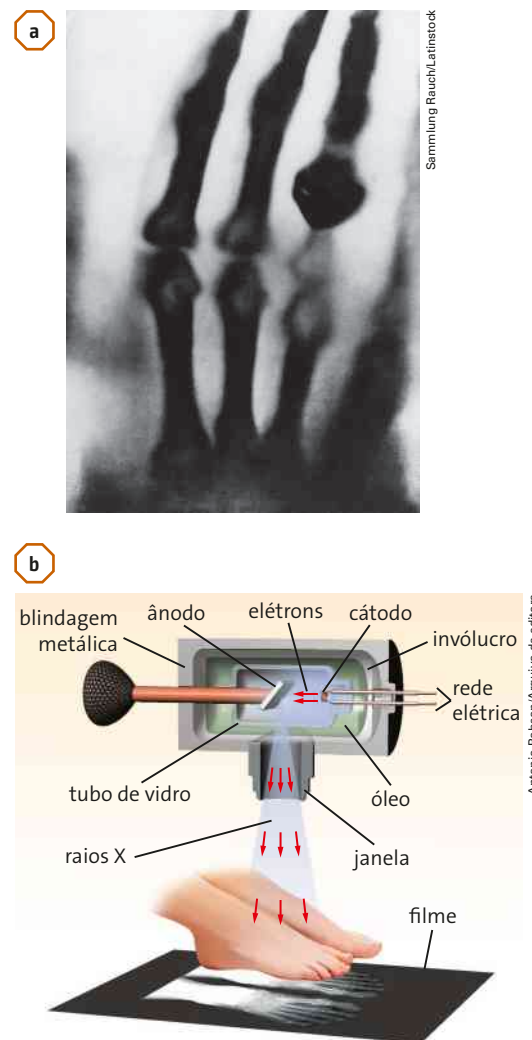


Figura 8.29 A primeira radiografia da História foi obtida em 1896. A imagem é da mão de Bertha, esposa de Röntgen (a). Esquema (sem escala e em cores fantasia) de um aparelho de raios X na obtenção da radiografia de um pé humano (b). Radiografia de pés humanos (c).



Com o desenvolvimento das radiografias, tornou-se possível diagnosticar pequenas anormalidades nos tecidos, como fraturas ósseas, por exemplo. Radiografias de cavidades, como os pulmões, são particularmente eficientes, pois o ar é bem mais transparente que os tecidos biológicos, permitindo, assim, alto contraste. Em vista disso, pouco depois de serem descobertos, os raios X se transformaram no mais importante meio de diagnóstico da tuberculose.

Na radiografia de outras cavidades do corpo humano, como o estômago, por exemplo, pode-se empregar um líquido de contraste para preenchê-las.

A exposição excessiva aos raios X é prejudicial para os tecidos humanos. Pode provocar lesões, manchas na pele e até mesmo câncer. Por essa razão, o uso de radiografias deve ser rigorosamente controlado e os equipamentos muito bem calibrados, para que tanto o paciente quanto o técnico em radiologia estejam seguros. Quando possível, as radiografias devem ser substituídas por outros mecanismos de diagnóstico, como o ultrassom, que é inofensivo para o ser humano.

Em 1972, o inglês Godfrey N. Hounsfield (1919-2004) e o sul-africano naturalizado norte-americano Allan M. Cormack (1924-1998) inventaram o tomógrafo. Por esse trabalho, os dois receberam o Prêmio Nobel de Fisiologia e Medicina, em 1979.

Na tomografia computadorizada (**figura 8.30**), um estreito feixe de raios X é emitido por uma fonte que circunda o paciente. Diametralmente opostos, sensores captam a radiação e a enviam para um computador.

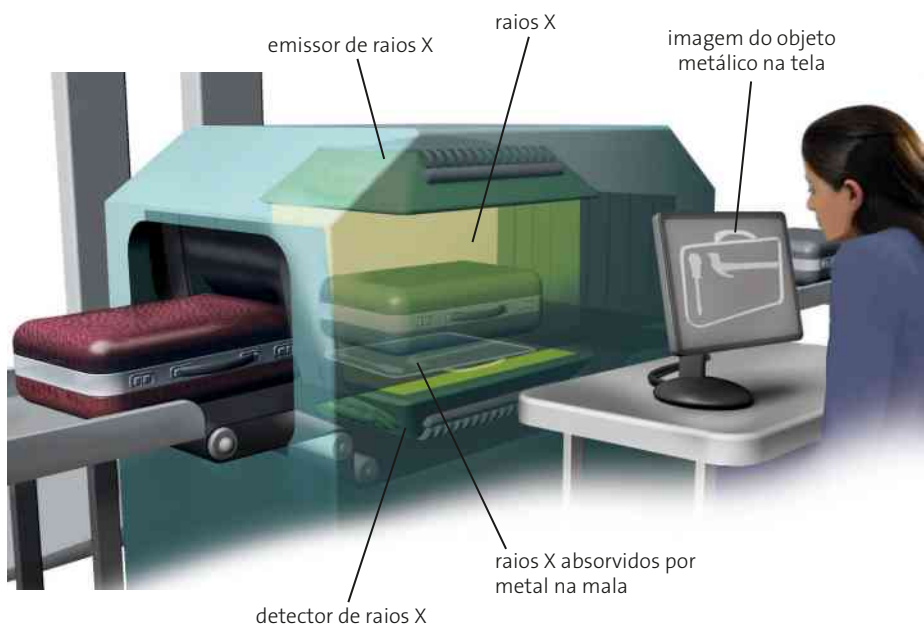
Com a mesma dosagem de radiação de uma radiografia convencional, essa técnica permite a obtenção de vários planos radiográficos (fatias), com uma definição centenas de vezes melhor.

Na indústria, os raios X são muito empregados em dispositivos de segurança. Utilizando-se raios X de baixa energia, pode-se verificar, por exemplo, o conteúdo de embalagens sem a necessidade de abri-las. Nos aeroportos, eles são muito úteis na identificação de objetos metálicos em bagagens (**figura 8.31**).



JazzRT/Getty Images

Figura 8.30 Médico avaliando imagens de uma tomografia computadorizada.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.31 Representação (sem escala e em cores fantasia) de um equipamento de raios X usado em aeroportos para verificação da bagagem dos passageiros.

Radioatividade

A descoberta dos raios X em 1895 teve repercussão imediata na comunidade científica. Muitos físicos passaram a pesquisar essa nova forma de radiação. Um deles foi o físico francês Antoine H. Becquerel (1852-1908).

Durante pesquisas realizadas em 1896, nas quais analisava a possibilidade de emissão de raios X por parte de diferentes elementos químicos, Becquerel notou que uma amostra de sal de urânio impressionava uma chapa fotográfica (**figura 8.32**), mesmo quando não submetida a tratamento térmico ou a qualquer outra forma de excitação.

Becquerel repetiu o experimento com diversos sais de urânio nas mais variadas condições e chegou à conclusão de que o sal emitia espontaneamente uma forma de radiação que, com certeza, não eram raios X, mas impressionava as chapas fotográficas. Essa nova forma de radiação recebeu inicialmente o nome de raios urânicos, e sua emissão espontânea foi atribuída apenas ao urânio.

O casal Pierre Curie (1859-1906) e Marie Curie (1867-1934) deu continuidade a essas pesquisas e mostrou que a emissão espontânea de radiação não era exclusividade do urânio. O tório e o polônio também a emitiam. O elemento polônio foi descoberto pelo casal e seu nome é uma homenagem à terra natal de Marie Curie, a Polônia. Eles também descobriram o rádio, elemento químico que emitia uma radiação muito mais intensa que a do urânio. A partir de então, o fenômeno da emissão espontânea de radiação por parte de alguns elementos químicos passou a ser conhecida como **radioatividade**. Em 1903, Pierre Curie, Marie Curie e Becquerel receberam o Prêmio Nobel de Física pelas pesquisas sobre a radioatividade.

A etapa seguinte das pesquisas visava à descrição das propriedades da radioatividade. Era preciso responder a algumas questões, como: qual é a sua origem? Como é constituída? De onde é emitida?

As pesquisas realizadas pelo físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937), em 1898, levaram à identificação de três tipos de radiação na radioatividade, as quais foram denominadas **alfa** (α), **beta** (β) e **gama** (γ). A radiação α foi identificada como partículas elétricas carregadas positivamente; a radiação β , como partículas elétricas carregadas negativamente; e a radiação γ , como radiação eletromagnética.

Os raios gama são emitidos pelos núcleos de átomos radioativos. São os mais energéticos do espectro eletromagnético até hoje conhecidos. Possuem frequências da ordem de 10^{24} Hz e comprimentos de onda de 10^{-16} m, com grande poder de penetração na matéria. A **figura 8.33** ilustra as blindagens necessárias para as radiações alfa, beta e gama. Observe que a blindagem das radiações gama é feita com blocos de chumbo.

De acordo com o tipo de radiação e a energia a ela associada, temos diferentes riscos e aplicações. As emissões dos núcleos radioativos normalmente têm energia muito superior às das radiações comuns, como as ondas de rádio, de luz ou de infravermelho, e por isso têm alto poder de ionização. Assim como os raios X, são chamadas de radiações ionizantes.



Figura 8.32 Foto que mostra uma das chapas fotográficas originais usadas por Becquerel e impressionadas pela radiação.

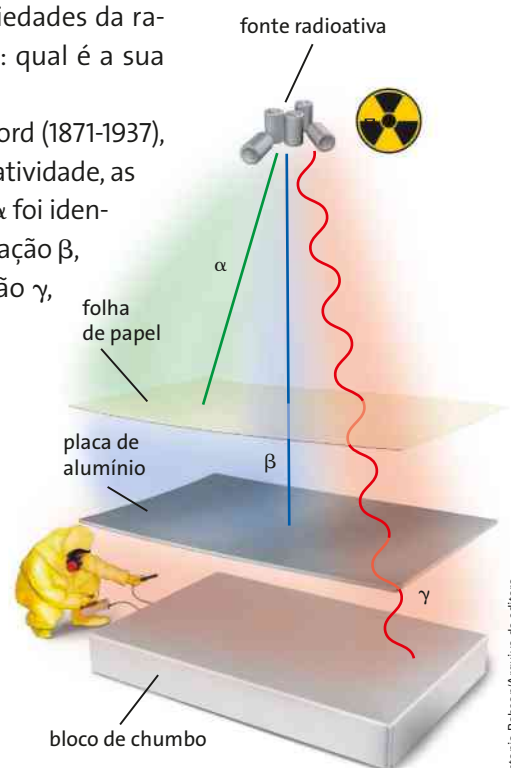
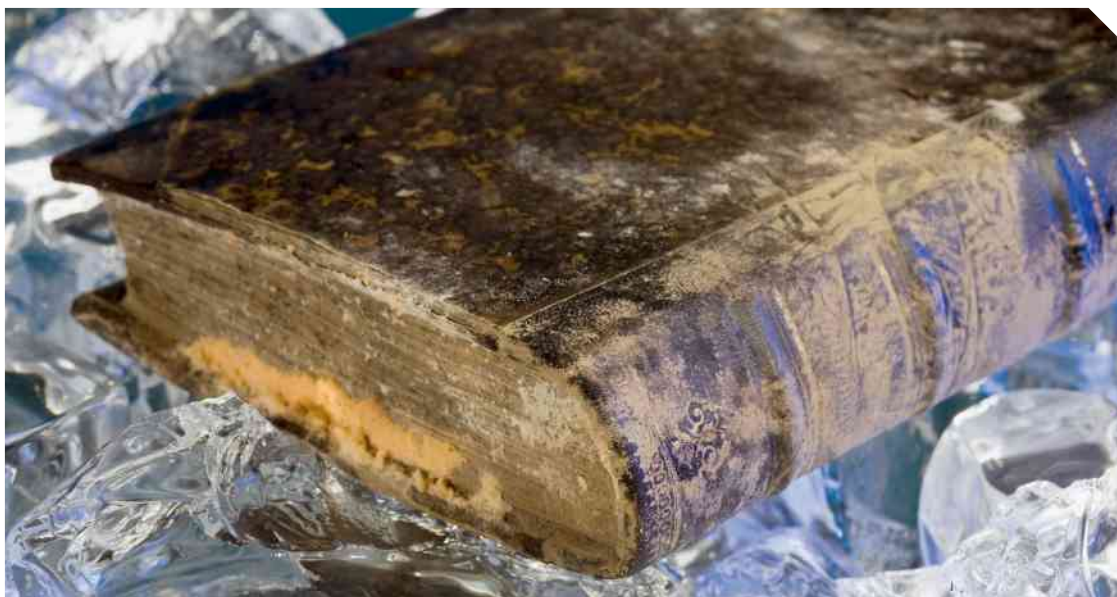


Figura 8.33 Representação (sem escala e em cores fantasia) da blindagem das emissões radioativas.



Radiação gama é usada na preservação do patrimônio brasileiro

O patrimônio histórico e cultural é mais um dos setores que poderá ser beneficiado no Brasil com as aplicações da radiação ionizante. O Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), uma das unidades da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen) no Rio de Janeiro, já testou e começa a aplicar uma técnica que utiliza radiação gama no combate a fungos e bactérias que destroem livros, documentos e obras de arte nas bibliotecas e museus do país. Papéis mais antigos são as grandes vítimas desses microrganismos. [...]



Cooperfield/Shutterstock/Glow Images

A imagem mostra a deterioração de um livro pela ação de fungos.

Os fungos são os maiores vilões. Eles geram substâncias que destroem a celulose do papel, além de afetarem materiais como couro, palha, tecidos, colas e adesivos. O prejuízo aparece na forma de buracos e manchas. O clima tropical do Brasil agrava o problema, pois calor e umidade favorecem o desenvolvimento de fungos.

A forma mais habitual de combatê-los tem sido o uso de produtos químicos. Mas o processo, além de caro, exige intensa manipulação dos livros. Outro problema é que o uso de produtos tóxicos faz com que as publicações fiquem em uma espécie de quarentena, podendo ser novamente consultadas somente quando não oferecem mais perigo à saúde dos leitores.

O uso da radiação gama para esterilização e conservação dos livros e obras de arte já ocorre em alguns países e traz vantagens em relação aos processos químicos. A manipulação é mínima e não há período de quarentena. [...]

A técnica assemelha-se à irradiação de alimentos, que elimina fungos e bactérias de carnes, vegetais e grãos sem interferir no sabor, coloração e valor nutritivo. Na área cultural, seu uso pode ser estendido à preservação de fotografias, desenhos e peças arqueológicas, entre outras coleções.

ASSESSORIA de Comunicação do IEN. Radiação gama é usada na preservação do patrimônio brasileiro. Disponível em: <www.ien.gov.br/noticias/midia_arquivo/2005m02_radiacaogama.pdf>. Acesso em: jan. 2016.

1. De acordo com o texto, quais os maiores vilões de livros, documentos e obras de arte?
2. Qual é a vantagem em se utilizar a radiação gama, em vez de produtos químicos, no combate a fungos e bactérias que destroem livros, documentos e obras de arte nas bibliotecas e museus?

20. Esses procedimentos têm como objetivo produzir um contraste para que os tecidos biológicos sejam destacados na radiografia.

21. As radiografias são essenciais em diagnósticos médicos. Por isso, elas devem ser usadas com moderação e com uma frequência que permita ao organismo humano se recuperar.



Exercícios

17. Qual das três radiações ultravioleta, A, B ou C, é mais energética? Justifique. [A radiação ultravioleta C.](#)

18. Normalmente, as pessoas utilizam óculos escuros quando se expõem ao sol, principalmente nas ruas e na praia. Qual é a função básica desses óculos: estética ou proteção? Explique. [Veja resposta no Manual do Professor.](#)

19. Leia o texto a seguir.

Os filtros solares, utilizados pelas pessoas para se protegerem da ação do sol, são identificados por um número, chamado de **fator de proteção solar** (FPS). Se uma pessoa usar um filtro solar com FPS-15 de acordo com as recomendações, ela poderá ficar exposta ao sol por um tempo até 15 vezes maior do que se não estivesse usando o protetor.

De acordo com o texto, podemos concluir que, se uma pessoa usar um filtro solar com FPS-30:

- a) estará protegida da ação do sol durante 30 horas.
- b) certamente pretende ficar exposta ao sol por um período de 15 a 30 horas.
- ☒ c) poderá ficar exposta ao sol por um período até 30 vezes maior do que se não estivesse usando o protetor.
- d) para estar protegida, precisa aplicar o protetor a cada 30 minutos.

20. Nas radiografias dos pulmões, é comum o técnico pedir à pessoa a ser radiografada que encha os pulmões de ar e prenda a respiração. Já nas radiografias de estômago, solicita-se que a pessoa tome um líquido antes da radiografia. Qual é a finalidade desses procedimentos?

21. Se os raios X podem danificar os tecidos humanos, o que justifica a sua utilização em diagnósticos médicos?

22. O que significa dizer que determinado elemento químico é radioativo? [Um elemento químico radioativo é aquele que espontaneamente emite radiação.](#)

23. Com base em seus conhecimentos de Química sobre a estrutura de um átomo, responda em seu caderno: qual é a diferença básica entre os raios X e os raios gama? [Veja resposta no Manual do Professor.](#)

24. (Enem) Os níveis de irradiância ultravioleta efetiva (IUV) indicam o risco de exposição ao Sol para pessoas de pele do tipo II – pele de pigmentação clara. O tempo de exposição segura (TES) corresponde ao tempo de exposição aos raios solares sem que ocorram queimaduras de pele. A tabela mostra a correlação entre riscos de exposição, IUV e TES.

Riscos de exposição	IUV	TES (em minutos)
baixo	0 a 2	máximo 60
médio	3 a 5	30 a 60
alto	6 a 8	20 a 30
extremo	acima de 8	máximo 20

Uma das maneiras de se proteger contra queimaduras provocadas pela radiação ultravioleta é o uso dos cremes protetores solares, cujo Fator de Proteção Solar (FPS) é calculado da seguinte maneira:

$$\text{FPS} = \frac{\text{TPP}}{\text{TPD}}$$

TPP = tempo de exposição mínima para produção de vermelhidão na pele protegida (em minutos).

TPD = tempo de exposição mínima para produção de vermelhidão na pele desprotegida (em minutos).

O FPS mínimo que uma pessoa de pele tipo II necessita para evitar queimaduras ao se expor ao Sol, considerando TPP o intervalo das 12h às 14h, num dia em que a irradiância efetiva é maior que 8, de acordo com os dados fornecidos, é:

- a) 5 ☒ b) 6 c) 8 d) 10 e) 20

25. (Enem) Considere um equipamento capaz de emitir radiação eletromagnética com comprimento de onda bem menor que o da radiação ultravioleta. Suponha que a radiação emitida por esse equipamento foi apontada para um tipo específico de filme fotográfico e entre o equipamento e o filme foi posicionado o pescoço de um indivíduo. Quanto mais exposto à radiação, mais escuro se torna o filme após a revelação. Após acionar o equipamento e revelar o filme, evidenciou-se a imagem mostrada na figura ao lado.



Dentre os fenômenos decorrentes da interação entre a radiação e os átomos do indivíduo que permitem a obtenção desta imagem inclui-se a:

- a) absorção da radiação eletromagnética e a consequente ionização dos átomos de cálcio, que se transformam em átomos de fósforo.
- ☒ b) maior absorção da radiação eletromagnética pelos átomos de cálcio que por outros tipos de átomos.
- c) maior absorção da radiação eletromagnética pelos átomos de carbono que por átomos de cálcio.
- d) maior refração ao atravessar os átomos de carbono que os átomos de cálcio.
- e) maior ionização de moléculas de água que de átomos de carbono.



James Clerk Maxwell

O físico e matemático James Clerk Maxwell nasceu em Edimburgo, na Escócia, em 1831, e faleceu em Cambridge, na Inglaterra, em 1879.

Em 1847, com 16 anos de idade, Maxwell iniciou seus estudos de Matemática, Filosofia Natural, que incluía a Física, e Lógica na Universidade de Edimburgo. Em 1850, foi para a Universidade de Cambridge, onde iniciou seus estudos sobre eletricidade e magnetismo e formou-se em 1854. Nesse ano, Maxwell foi o segundo estudante com a mais alta distinção em Matemática da universidade e o primeiro detentor do prêmio Smith, prestigiosa competição que premiava as melhores pesquisas originais.

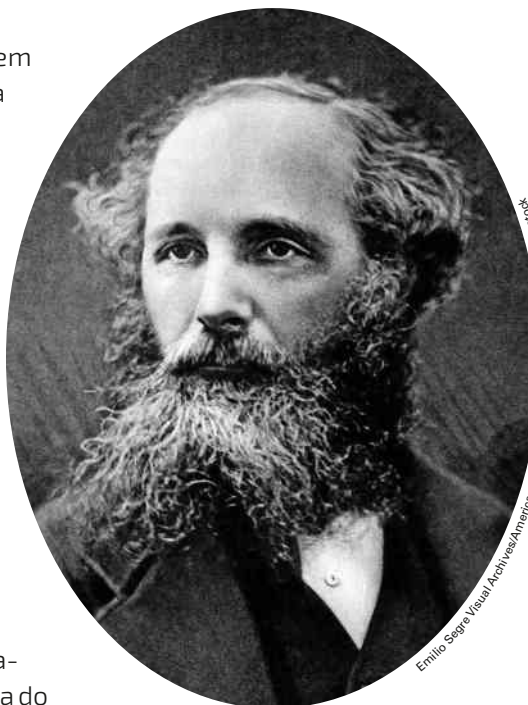
Ainda em 1854, tornou-se membro do Trinity College, e em 1856 foi indicado para o cargo de professor universitário de Filosofia Natural no Marischal College, em Aberdeen, na Escócia. Paralelamente, deu sequência às suas pesquisas sobre eletricidade e magnetismo, e nesse ano publicou seu primeiro trabalho sobre o assunto que, posteriormente, o consagra-ria. Em 1858, Maxwell casou-se com Katherine Mary Dewar, filha do diretor do Marischal College. Não teve filhos, mas essa união foi descrita pelos seus biógrafos como "uma vida conjugal exemplar".

Em 1860, com a fusão entre o Marischal College e o King's College [em Londres], Maxwell foi indicado para professor universitário de Filosofia Natural no King's College, cargo que ocupou até 1865. Em 1861, foi admitido como membro da Royal Society. Esses anos foram, incontestavelmente, os mais produtivos de sua carreira.

Em 1865, Maxwell deixou Londres e retirou-se para Glenlair, onde prosseguiu seu trabalho, que o consagraria como um dos grandes cientistas da História, o mais importante físico do século XIX. Em seu *Tratado sobre eletricidade e magnetismo*, publicado em 1873, que deu origem às famosas "equações de Maxwell" e que uniu a Eletricidade, o Magnetismo e a Óptica, ele apresentou a teoria eletromagnética da luz e previu a existência das ondas eletromagnéticas. A teoria de Maxwell sugeria que ondas eletromagnéticas podiam ser geradas em laboratório, fato comprovado por Heinrich Rudolf Hertz em 1887. Posteriormente, em 1905, esse trabalho serviria de base para Albert Einstein (1879-1955) desenvolver a sua teoria da relatividade restrita.

Maxwell publicou inúmeros artigos científicos. Sua contribuição para a ciência inclui, além do Eletromagnetismo, a Física estatística e molecular, a teoria cinética dos gases e a Óptica geométrica. Supervisionou a determinação experimental das unidades elétricas para a Associação Britânica para o Progresso da Ciência e seu trabalho com medições e padronizações foi de suma importância para o Laboratório Nacional de Física. Maxwell teve participação efetiva na nona edição da *Enciclopédia Britânica*. Em sua homenagem, a unidade eletromagnética de fluxo magnético, no Sistema CGS (centímetro, grama, segundo), foi denominada maxwell.

Em 1871, Maxwell supervisionou a construção do Laboratório Cavendish, em Cambridge, e tornou-se seu diretor. Os últimos anos de sua vida foram dedicados à edição de trabalhos, basicamente sobre Matemática e Eletromagnetismo. Em virtude de um câncer no estômago, faleceu aos 48 anos de idade.



Retrato de James Clerk Maxwell.

Retomando

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



26. (UFRN) Recentemente, tem-se falado muito sobre os possíveis danos que o uso contínuo de aparelhos celulares pode trazer ao ser humano. Por sua vez, muitas pessoas que já utilizaram o celular encostado à orelha, por um tempo suficientemente longo, perceberam que a região em torno desta se aqueceu. Isso se explica pelo fato de que:
- a) o celular absorve ondas eletromagnéticas, que são transformadas em radiação ultravioleta e aquecem os tecidos da região da orelha.
 - b) o celular emite ondas sonoras, as quais são absorvidas pelos tecidos da região da orelha, aquecendo-a.
 - xc) o celular emite ondas eletromagnéticas, as quais são absorvidas pelos tecidos da região da orelha, aquecendo-a.
 - d) o celular absorve ondas sonoras, que são transformadas em radiação infravermelha que aquece os tecidos da região da orelha.

Texto para as questões 27 e 28.

A pele humana é sensível à radiação solar, e essa sensibilidade depende das características da pele. Os filtros solares são produtos que podem ser aplicados sobre a pele para protegê-la da radiação solar. A eficácia dos filtros solares é definida pelo Fator de Proteção Solar (FPS), que indica quantas vezes o tempo de exposição ao sol, sem o risco de vermelhidão, pode ser aumentado com o uso do protetor solar. A tabela seguinte reúne informações encontradas em rótulos de filtros solares.

Sensibilidade	Tipo de pele e outras características	Proteção recomendada	FPS recomendado	Proteção a queimaduras
extremamente sensível	branca, olhos e cabelos claros	muito alta	$FPS \geq 20$	muito alta
muito sensível	branca, olhos e cabelos próximos do claro	alta	$12 \leq FPS < 20$	alta
sensível	morena ou amarela	moderada	$6 \leq FPS < 12$	moderada
pouco sensível	negra	baixa	$2 \leq FPS < 6$	baixa

PROTESTE, ano V, n. 55, fev./2007 (com adaptações).

27. (Enem) As informações acima permitem afirmar que:
- a) as pessoas de pele muito sensível, ao usarem filtro solar, estarão isentas do risco de queimaduras.
 - xb) o uso de filtro solar é recomendado para todos os tipos de pele exposta à radiação solar.
 - c) as pessoas de pele sensível devem expor-se 6 minutos ao sol antes de aplicarem o filtro solar.
 - d) pessoas de pele amarela, usando ou não filtro solar, devem expor-se ao sol por menos tempo que pessoas de pele morena.
 - e) o período recomendado para que pessoas de pele negra se exponham ao sol é de 2 a 6 horas diárias.
28. (Enem) Uma família de europeus escolheu as praias do Nordeste para uma temporada de férias. Fazem parte da família um garoto de 4 anos de idade, que se recupera de icterícia, e um bebê de 1 ano de idade, ambos loiros de olhos azuis. Os pais concordam que os meninos devem usar chapéu durante os passeios na praia. Entretanto, divergem quanto ao uso do filtro solar. Na opinião do pai, o bebê deve usar filtro solar com $FPS \geq 20$ e o seu irmão não deve usar filtro algum porque precisa tomar sol para se fortalecer. A mãe opina que os dois meninos devem usar filtro solar com $FPS \geq 20$.
- Na situação apresentada, comparada à opinião da mãe, a opinião do pai é:
- a) correta, porque ele sugere que a família use chapéu durante todo o passeio na praia.
 - b) correta, porque o bebê loiro de olhos azuis tem a pele mais sensível que a de seu irmão.
 - c) correta, porque o filtro solar com $FPS \geq 20$ bloqueia o efeito benéfico do sol na recuperação da icterícia.
 - d) incorreta, porque o uso do filtro solar com $FPS \geq 20$, com eficiência moderada, evita queimaduras na pele.
 - xe) incorreta, porque é recomendado que pessoas com olhos e cabelos claros usem filtro solar com $FPS \geq 20$.

A radiação ultravioleta e a vida das pessoas

A radiação ultravioleta é muito importante para as pessoas, principalmente na síntese da vitamina D, fundamental para uma melhor qualidade de vida. Isto é evidenciado nos textos a seguir.

Jovens têm deficiência de vitamina D

Ao investigar a carência de vitamina D em moradores da cidade de São Paulo, uma pesquisa realizada na Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (FMUSP), em parceria com o Hospital Universitário, verificou que 77,4% dos analisados apresentavam o problema.

Participaram 603 voluntários (118 homens e 485 mulheres) no estudo, cujo objetivo foi estabelecer quais fatores estão associados à hipovitaminose D no organismo. A média registrada da vitamina foi de 21,4 ng/ml, bem abaixo da recomendada, que é de 30 ng/ml. A análise foi feita no fim do inverno, após um período em que a exposição à luz solar é menor.

Meses depois, no fim do verão, retornaram para coleta de sangue 219 voluntários, dos quais 39 homens e 180 mulheres. Apesar da maior exposição à luz solar, e da consequente sintetização da vitamina no organismo, a pesquisa identificou a deficiência da vitamina D em 39,6% dos analisados.

Apesar da redução, segundo Rosa Maria Affonso Moysés, médica e pesquisadora do Hospital das Clínicas da FMUSP e coordenadora do estudo, o número ainda foi muito elevado, considerando a latitude em que São Paulo se encontra e a comparação com cidades do hemisfério norte. [...]

A seleção dos voluntários incluiu pacientes de rotina do Hospital das Clínicas, funcionários da USP que realizam o exame médico anual e estudantes com idades entre 18 e 30 anos. Os critérios de inclusão foram extremamente rígidos. Os pacientes não podiam ter doença renal ou cardíaca. “O máximo que poderiam ter era diabetes e hipertensão controladas, ou seja, tratava-se de pessoas estáveis do ponto de vista clínico” [segundo Rosa].

O estudo apontou condições associadas à maior prevalência de hipovitaminose D, como idade, presença de hipertensão arterial, maior índice de massa corporal e cor de pele negra.

“Também chamou a atenção o fato de que quanto mais idoso, maior a prevalência. Mas, mesmo entre os jovens, até 30 anos, o índice foi muito elevado.”

Outro estudo, feito na Faculdade de Saúde Pública da USP, verificou a insuficiência da vitamina D entre os jovens. O trabalho foi feito por Bárbara Santarosa Emo Peters e orientado pela professora Lígia Araújo Martini.

O estudo avaliou a quantidade de vitamina D em 136 adolescentes em Indaiatuba, interior de São Paulo, e constatou que 62% tinham insuficiência da vitamina.

Cerca de 90% da absorção da vitamina D se dá pela exposição à luz solar, com o restante sendo resultado da alimentação. Segundo o estudo, nenhum dos jovens que participou da pesquisa ingeria a quantidade recomendada de vitamina D. Alimentos como salmão, sardinha, leite e derivados (somente os integrais) possuem a vitamina.

[...] Outro resultado importante é que os voluntários com hipovitaminose apresentavam maiores níveis de paratormônio, hormônio responsável pela regulação dos níveis de cálcio no organismo. [...] O alto índice desse hormônio é uma resposta à diminuição dos níveis de vitamina D. Todas as vezes que os níveis de cálcio caem, há maior secreção de paratormônio. “Os efeitos dessa elevação a longo prazo não são totalmente conhecidos, mas pode haver um risco maior de desenvolvimento de osteoporose e de doenças cardiovasculares. Esses achados estão previamente associados ao que chamamos de hiperparatireoidismo secundário”.

Diversos estudos recentes têm associado a deficiência da vitamina D a riscos de doenças, como hipertensão, gripe ou cardiovasculares. [...]

Na síntese da vitamina D, a radiação ultravioleta – uma das componentes da radiação solar – assume um papel decisivo. De acordo com Melissa O. Premaor e Tania W. Furlanetto, do Departamento de Medicina Interna, Hospital de Clínicas de Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul:

Em nosso conhecimento atual, a pele é o único sítio capaz de produzir vitamina D nos seres humanos. A pré-vitamina D ou 7-deidrocolesterol é produzida tanto pela derme quanto pela epiderme. A luz ultravioleta entre 290 nm e 315 nm (UVB) conjuga duplas pontes de hidrogênio nos carbonos C5 e C7, produzindo pré-vitamina D. Uma vez produzida, a pré-vitamina D forma homodímeros em aproximadamente 24 horas, transformando-se em vitamina D. Como esse processo ocorre principalmente próximo ao leito capilar, ele não é influenciado por alterações de temperatura externas ao corpo humano.

ARQ. BRAS. DE ENDOCRINOLOGIA & METABOLOGIA. São Paulo, v. 50, n. 1, fev. 2006.

Trabalho com o texto

1. Utilize a tabela a seguir para explicar por que a radiação UVB é mais eficaz na produção de vitamina D do que as radiações UVA e UVC.



Faixas da radiação ultravioleta segundo a Comissão Internacional de Iluminação (CIE)

Denominação da radiação ultravioleta	Intervalo de comprimento de onda (nm)	Denominação popular
A	400 – 315	luz negra
B	315 – 280	luz eritematogênica
C	280 – 100	radiação germicida

Fonte: OKUNO, Emico; VILELA, Maria A. C. *Radiação ultravioleta: características e efeitos*. São Paulo: Livraria da Física, 2005. p. 19.

2. Por causa do fato de vivermos em um país tropical, no qual na maioria dos estados faz sol praticamente o ano todo, a população, principalmente os jovens, não deveria apresentar níveis baixos de vitamina D no organismo. Será que o estilo de vida atual, com atividades físicas em locais cobertos e lazer em recintos fechados (caso dos *shoppings* nas médias e grandes cidades), tem relação com o fato?
3. A veiculação em rádio, televisão, jornais e revistas em geral dos perigos de câncer de pele tem levado as pessoas a evitar o sol. É possível conciliar as duas coisas: evitar o câncer de pele e tomar sol suficiente para a síntese da vitamina D?
4. Apesar de 90% da absorção da vitamina D se dar pela exposição ao sol, não podemos desconsiderar a alimentação. Segundo os nutricionistas, reforçar o consumo de salmão, bacalhau, atum, sardinha e leite certamente trará resultados benéficos. Como a população, principalmente os jovens, está se alimentando?
5. Por que precisamos da vitamina D? Quais as principais ações que ela executa em nosso organismo? Quais as consequências da falta de vitamina D, principalmente nos idosos?

Pesquise e discuta

6. Pesquise como a radiação UVB interage com o carbono para a produção de vitamina D.

UNIDADE

4

O muito pequeno e o muito grande

Os pilares da Física moderna

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

Matthew Russell/Visuals Unlimited/Corbis/Latinstock



A galáxia de Andrômeda tem formato espiral e está localizada a 2,54 milhões de anos-luz da Terra. Imagem obtida da captação de radiações eletromagnéticas de diferentes frequências.



A Física no final do século XIX

Próximo ao final do século XIX parecia que toda a ciência estava sob a influência da corrente filosófica denominada **determinismo**. Nessa época, os avanços do conhecimento científico foram muito significativos, e reinava a impressão de que a humanidade deixara para trás sua ignorância em relação ao Universo e estava às portas do saber absoluto.

As leis da Mecânica, da Física térmica, da Óptica, da Ondulatória, do Eletromagnetismo, enfim, da Física em geral, estavam tão solidamente confirmadas pelas experiências e aplicações que muitos imaginavam que o equacionamento completo da natureza era apenas uma questão de tempo. Restavam ainda algumas pontas soltas, mas isso parecia sem importância diante de tudo o que já se conhecia.

Felizmente, existem os que sempre veem a ciência como uma obra inacabada. E foi graças ao questionamento desses espíritos críticos que a natureza revelou novos e inesperados aspectos. Estes, de tão surpreendentes, foram enquadrados no que se convencionou chamar de **Física moderna**.

Mas por que “moderna”?

Já se passaram mais de cem anos desde a publicação dos trabalhos do físico alemão Max Planck (1858-1947) sobre a quantização da energia, e mais de cem anos das publicações de Einstein sobre o efeito fotoelétrico e a relatividade restrita. É também mais ou menos o mesmo intervalo de tempo que nos separa da formulação do físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) sobre o átomo de hidrogênio e dos trabalhos do casal Curie sobre a radioatividade. Em outras áreas do conhecimento, dificilmente alguém chamaria de modernos fatos que ocorreram um século antes. Mas há razões para que a Física mantenha essa distinção.

Sem os avanços que essa nova abordagem da natureza física da matéria, do espaço e do tempo trouxe para nossos dias, ainda seria possível a concepção de invenções como os aviões, os automóveis e muitas outras máquinas. No entanto, certamente não existiriam as células fotoelétricas que controlam as portas de elevadores, bem como as utilizadas na cronometragem, os telefones celulares, as cirurgias a *laser*, a ressonância magnética, a injeção eletrônica, que aprimorou o desempenho dos motores, os CDs e, sobretudo, os computadores.

A Física clássica, que rege o comportamento do nosso dia a dia newtoniano, continua válida e extremamente precisa dentro de certos limites, mas, quando nos voltamos para problemas que envolvem velocidades muito altas (**figura 9.1**) ou distâncias astronômicas, não podemos resolvê-los sem considerar a teoria da relatividade. Além disso, é com base na relatividade que se concluiu haver possibilidade de transformar matéria em energia. Deixando de lado a polêmica sobre sua utilização, sem a energia nuclear países como a França entrariam em colapso. Em novembro de 2012, segundo a Associação Mundial Nuclear, 77,7% da energia gerada na França era de centrais nucleares: sem essa energia, hospitais, metrô, trens, fábricas e sistemas de aquecimento não funcionariam.

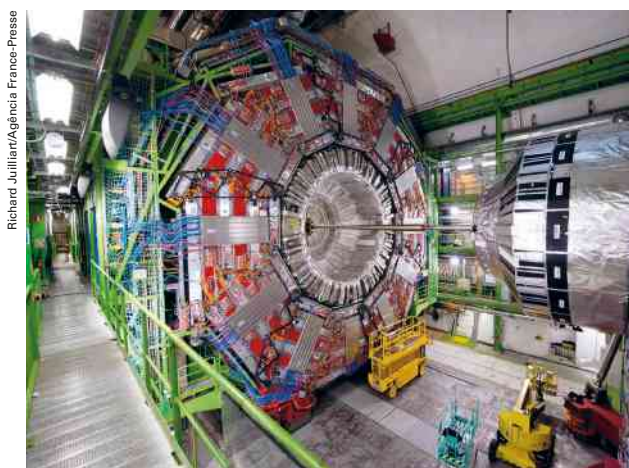


Figura 9.1 Em experimentos no Large Hadron Collider (LHC), partículas são aceleradas e colidem em velocidades próximas à da luz. Foto de 2015.

Já nas questões dos *microchips* (figura 9.2) e da radioatividade, é a Mecânica quântica que melhor descreve esses sistemas, com aprofundamento da Física do estado sólido.

A Física do século XX, denominada Física moderna, tem como alicerces a relatividade, que fornece a estrutura teórica para a compreensão do Universo em escala macroscópica (estrelas, galáxias, etc.), e a Mecânica quântica, que fornece a estrutura teórica para a compreensão do Universo em escala microscópica (partículas elementares, átomos, etc.).

De um lado, temos o limite do extremamente grande, a idade e o tamanho de nosso Universo – as questões cosmológicas em que aplicamos a relatividade geral; de outro lado, temos a abordagem do extremamente pequeno, o limite do observável na matéria, onde reina o princípio da incerteza proposto pelo físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976) e que é um dos pilares da Mecânica quântica. As duas teorias se complementam, mas não estão unificadas.

O que se busca, hoje, é a teoria do campo unificado: uma teoria que junte a relatividade e a Mecânica quântica e que nos permita compreender o Universo em sua totalidade, ou seja, desde o infinitamente pequeno até o extremamente grande.

Nelson Morris/Latinstock



Figura 9.2 O avanço da pesquisa científica tem possibilitado a fabricação de *microchips* cada vez menores e mais potentes, o que possibilita a miniaturização de vários aparelhos.

2 Postulados da teoria da relatividade especial

Física tem História



Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

A relatividade de Einstein

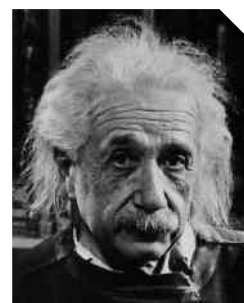
O ano de 2005 foi eleito pela comunidade internacional dos físicos como o Ano Mundial da Física, por ser o do centenário de publicação dos trabalhos de Albert Einstein. Em 1905, considerado o ano miraculoso, foi publicada pela revista alemã de Física *Annalen der Physik* [Anais da Física] uma série de artigos do jovem Einstein, então com 26 anos e ocupando o cargo de especialista técnico do Departamento Suíço de Patentes, em Berna.

Um desses artigos – “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”, publicado em 9 de junho de 1905 e que contém a explicação quântica de como a radiação eletromagnética interage com a matéria (efeito fotoelétrico) – rendeu-lhe o Prêmio Nobel de Física de 1921.

Outro artigo – “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, publicado em 26 de setembro de 1905 – contém o que hoje conhecemos como teoria da relatividade restrita ou especial. Nesse artigo, Einstein conciliou as leis da mecânica de Newton com o eletromagnetismo de Maxwell, postulando a constância da velocidade da luz. Esse postulado trouxe sérias consequências à nossa concepção de espaço e tempo.

Em 21 de novembro de 1905 foi publicado o artigo “A inércia de um corpo depende de seu conteúdo energético?”, no qual Einstein introduz a equação mundialmente conhecida, $E = m \cdot c^2$, que estabelece a relação entre matéria e energia.

Nos anos seguintes, Einstein expandiu sua teoria da relatividade. Em 1916, publicou o artigo sobre as origens da teoria geral da relatividade. Ainda nesse ano, terminou o livro sobre as teorias da relatividade especial e da relatividade geral, o qual trazia as explicações para a gravitação newtoniana e representou um desafio para o senso comum.



Philippe Halsman/Magnum/Latinstock

Retrato de Albert Einstein (1879-1955).

Antes da publicação da teoria de Einstein, o conceito de relatividade já havia sido incorporado à Física. Os trabalhos de Copérnico, Galileu e Newton faziam referências à relatividade dos movimentos. Essas contribuições podem ser sintetizadas no chamado princípio da relatividade do século XVII:

As leis da Mecânica (leis de Newton) são as mesmas para dois observadores que se movem, um em relação ao outro, com velocidade constante (referenciais inerciais).

De acordo com a relatividade de Galileu, quando dois corpos se movimentam no mesmo sentido, a velocidade relativa entre eles é diferente daquela de quando eles se movimentam em sentidos contrários, ou ainda daquela de quando se movimentam em direções perpendiculares entre si.

A **figura 9.3** mostra dois carros, A e B, que se movem simultaneamente, em relação ao solo, com velocidades constantes v_A e v_B , respectivamente, em três situações distintas. Se os carros se movem, em relação ao solo, com velocidades $v_A = 80 \text{ km/h}$ e $v_B = 60 \text{ km/h}$, qual é a velocidade do carro A em relação ao B?

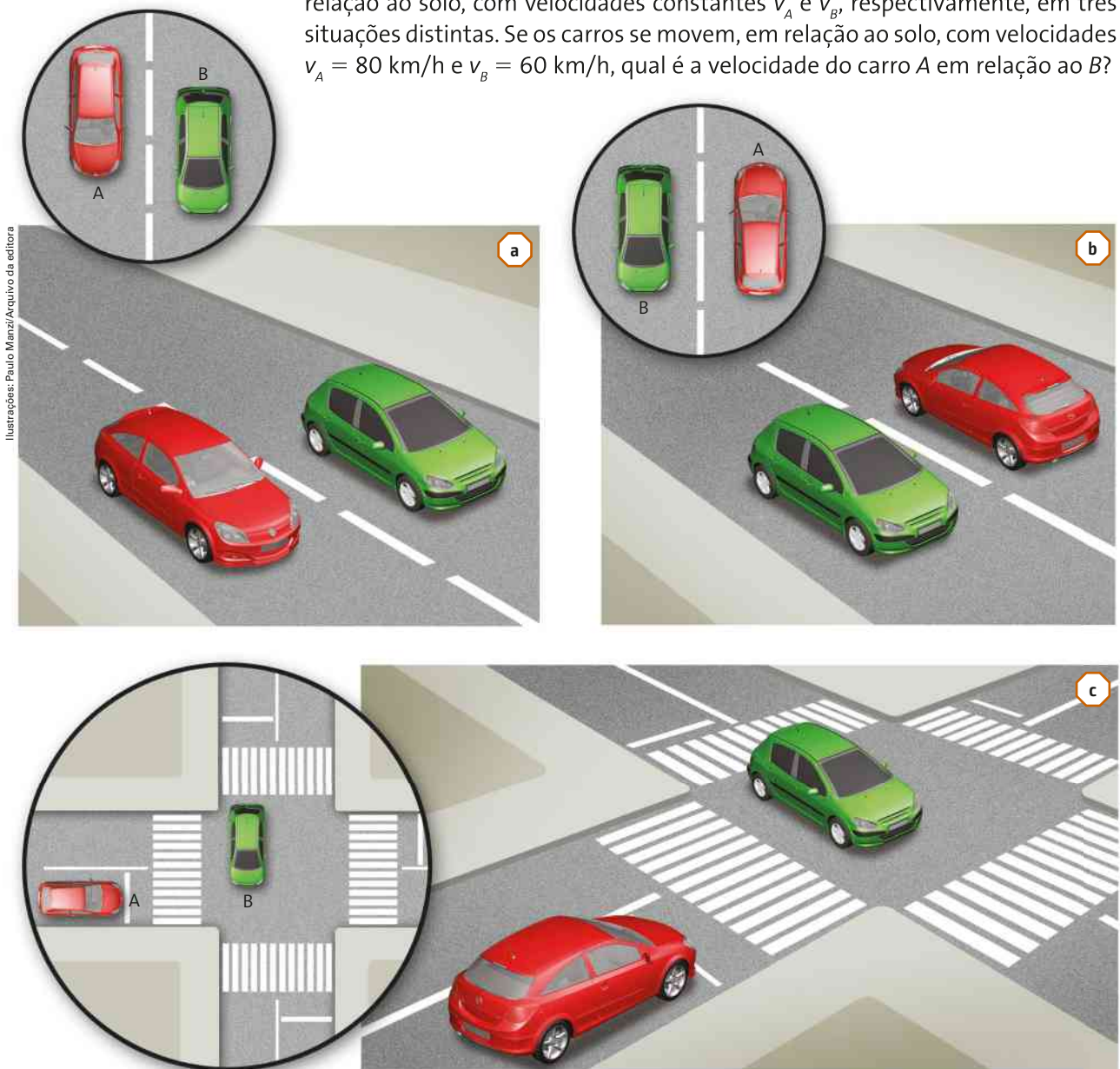


Figura 9.3 Representação, sem escala e em cores fantasia, de três situações de movimento de dois carros. Em **a**, eles se movem na mesma direção e no mesmo sentido; em **b**, se movem na mesma direção, mas em sentidos contrários; em **c**, se movem em direções perpendiculares entre si.

Na **figura 9.3.a**, na qual os carros se movem no mesmo sentido, a velocidade do carro A em relação ao B é de 20 km/h ($80 - 60$). Isso quer dizer que, para o motorista do carro B, ele está parado e o carro A se afasta dele com velocidade de 20 km/h.

Na **figura 9.3.b**, na qual os carros se movem em sentidos contrários, a velocidade do carro A em relação ao B é de 140 km/h ($80 + 60$). Isso quer dizer que, para o motorista do carro B, ele está parado e o carro A se aproxima dele com velocidade de 140 km/h.

Finalmente, na **figura 9.3.c**, na qual os carros se movem em direções perpendiculares entre si, a velocidade do carro A em relação ao B é de 100 km/h ($\sqrt{(80)^2 + (60)^2}$). Isso quer dizer que, para o motorista do carro B, ele está parado e o carro A se aproxima dele com velocidade de 100 km/h.

Einstein tentou aplicar os conceitos acima a uma experiência de pensamento que o preocupava desde os 16 anos de idade: “O que verei se correr atrás de um feixe de luz na velocidade da luz?”. De acordo com a relatividade de Galileu e a Física newtoniana, ele deveria ver a luz em repouso, pois, se ambos se movimentam com a mesma velocidade, a velocidade relativa entre eles é zero.

Em 1905, Einstein chegou à conclusão de que essa resposta não estava correta, e a Física newtoniana precisaria ser reformulada. Com o artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, que passaria para a História como a teoria da relatividade especial, alicerçada em dois postulados aparentemente simples, Einstein modificou o modo de pensar o tempo, o espaço, a matéria e a energia.

Os dois postulados da teoria da relatividade especial são:

- 1º) Da relatividade – As leis da Física são as mesmas para todos os observadores em sistemas de referência inerciais.
- 2º) Da velocidade da luz – A velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor em todas as direções e em todos os referenciais inerciais e não depende da velocidade da fonte nem do observador.

Com o primeiro postulado, Einstein ampliou o princípio da relatividade de Newton para toda a Física. Dois observadores em referenciais inerciais podem obter valores diferentes para um mesmo evento, mas as leis da Física são as mesmas para os dois.

Com o segundo postulado, Einstein estabeleceu que o valor da velocidade da luz no vácuo é sempre o mesmo, independentemente da velocidade da fonte ou do observador: a velocidade da luz é **absoluta**.

Além disso, como decorrência desses postulados, é possível mostrar que nenhum observador inercial pode se deslocar com a velocidade da luz. Somente anos mais tarde, Einstein percebeu a falha na sua pergunta aos 16 anos: ele não poderia estar viajando na velocidade da luz.

Um ponto importante na teoria da relatividade especial é que **a simultaneidade de um evento é um conceito relativo, que depende da velocidade relativa entre os observadores**.

Como essa conclusão parece contrariar o nosso senso comum, acompanhe o exemplo a seguir. Suponha que um trem em movimento, com uma velocidade extremamente alta, possua duas lâmpadas fixadas, uma na frente e a outra na traseira do trem. Considere, também, dois observadores, um dentro e outro fora do trem, conforme mostra a **figura 9.4**.

O comando para as lâmpadas acenderem é dado pelo observador que está dentro do trem. Para esse observador, os dois sinais (pulsos eletromagnéticos) emitidos pelo controle vão viajar à mesma distância e as lâmpadas vão acender simultaneamente.

Para o observador fora do trem, a lâmpada traseira vai ao encontro do pulso eletromagnético vindo do meio do trem, enquanto a dianteira foge desse pulso. Como os percursos efetuados pelos raios são diferentes e a velocidade da luz não depende do sistema de referência, para o observador fora do trem a lâmpada traseira acende antes da dianteira.

Vemos então que o mesmo evento (acendimento das lâmpadas) é simultâneo para o observador dentro do trem, mas não o é para o observador fora dele. Devemos ressaltar que, para que os efeitos dessa simultaneidade relativa sejam percebidos, é preciso que a velocidade relativa entre os observadores não seja desprezível quando comparada à velocidade da luz, ou seja, o trem deve estar se deslocando com velocidade próxima à da luz.



Figura 9.4 Representação, sem escala e em cores fantasia, da relatividade da simultaneidade de Einstein.

Exercícios



- De acordo com os postulados de Einstein da teoria da relatividade especial, julgue as afirmações seguintes.
 - Se uma pessoa obtém o valor de 10 cm para o comprimento de uma barra, todas as pessoas que medirem essa barra deverão encontrar o valor de 10 cm. **Errada.**
 - As leis da Física são as mesmas para todos os observadores. **Certa para referenciais inerciais.**
 - Se uma pessoa conseguir se movimentar com a velocidade da luz no mesmo sentido de um raio de luz, para ela, o raio de luz estará em repouso. **Errada.**
- Uma nave espacial hipotética, com velocidade de 150 000 km/s, aproxima-se de uma estação orbital. Num determinado instante, a estação emite um *flash* luminoso que se propaga com velocidade de 300 000 km/s ao encontro do foguete. Qual é a velocidade com que o *flash* luminoso aproxima-se do foguete? **$v = 300\,000\text{ km/s}$**
- Suponha que uma nave se afasta de um planeta com velocidade de 60 000 km/s. Em um determinado momento, a nave envia um sinal de rádio para comunicar-se com o planeta. Determine a velocidade do sinal medida por um observador na nave e a medida por um observador no planeta. Admita que as ondas de rádio se propaguem com velocidade igual à da luz, 300 000 km/s. **$v = 300\,000\text{ km/s}$**

3 Dilatação do tempo

Uma das consequências dos postulados da teoria da relatividade especial é que o **tempo é relativo**, ou seja, dois observadores, em movimento relativo, podem obter valores diferentes para a duração de um mesmo evento.

Para exemplificar como a medida de um intervalo de tempo de um evento é afetada pela velocidade relativa entre o observador e esse evento, vamos considerar a situação a seguir.

Uma fonte luminosa (lâmpada), colocada no piso de um carrinho que se movimenta com velocidade v em relação ao solo, emite um raio de luz que atinge um espelho plano colocado no teto do carrinho, reflete e retorna ao ponto de partida.

Uma pessoa (observador 1), dentro do carrinho, mede com um cronômetro o intervalo de tempo (Δt_1) entre a emissão do raio de luz (evento 1) e o retorno desse raio (evento 2) após a reflexão no espelho (figura 9.5).

Como a velocidade do raio de luz é constante e igual à da luz c , o intervalo de tempo Δt_1 é dado por:

$$\Delta t_1 = \frac{2 \cdot d}{c}$$

Nessa expressão, d é a distância entre a lâmpada e o espelho. Observe que os dois eventos (emissão e retorno do raio de luz) ocorrem no mesmo local e são medidos por um único relógio.

Suponha, agora, que o intervalo de tempo entre os dois eventos (emissão do raio e retorno após a reflexão no espelho) seja medido pelo observador 2, fora do carrinho. A figura 9.6 mostra o comportamento do raio de luz para esse observador.



Figura 9.5 Pulso luminoso indo ao espelho e voltando à lâmpada, visto pelo observador no carrinho.

As imagens destas páginas estão representadas sem escala e em cores fantasia.

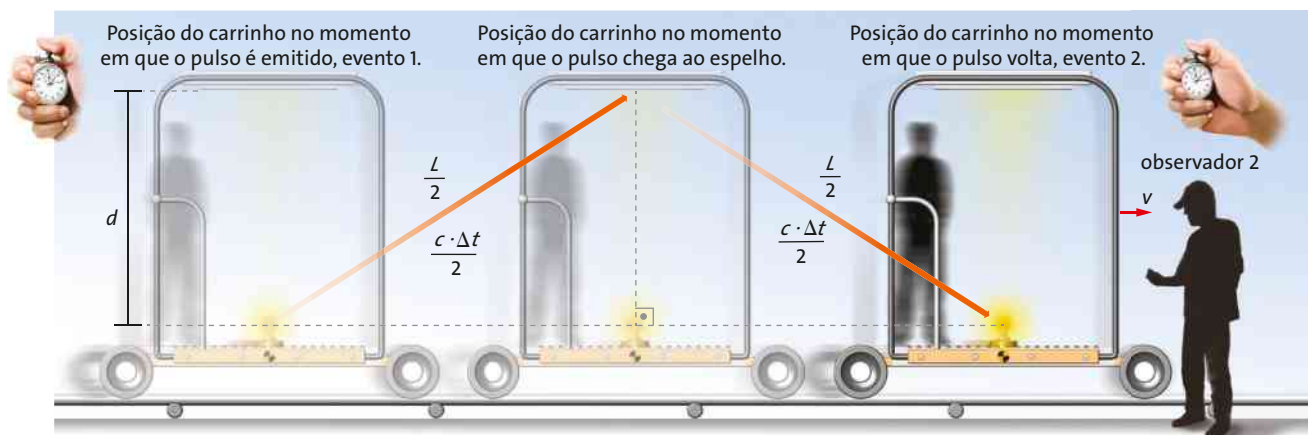


Figura 9.6 Pulso luminoso indo ao espelho e voltando à lâmpada, observado por uma pessoa parada no solo vendo o carrinho passar.

Para o observador 2, o raio de luz percorre a distância L para ir da lâmpada ao espelho e voltar a esta. Portanto, o intervalo de tempo entre os dois eventos, medido por ele, é dado por:

$$\Delta t_2 = \frac{L}{c}$$

Comparando as expressões para os dois intervalos de tempo, verificamos que o intervalo de tempo medido com a fonte em movimento em relação ao observador (Δt_2) é maior que o medido com a fonte em repouso em relação ao observador (Δt_1). Isso se justifica, pois, de acordo com as [figuras 9.5 e 9.6](#), $L > 2 \cdot d$. Assim, escrevemos:

$$\Delta t_2 > \Delta t_1$$

Esse resultado permite afirmar que **o tempo passa mais lentamente para um observador quando o objeto de medida está em movimento em relação a ele**.

A medida do intervalo de tempo feita por um observador em relação ao qual o objeto de medida está em repouso é chamada **medida própria** e normalmente é identificada pelo índice zero. Nesse caso, como se trata de uma medida de intervalo de tempo, temos o **intervalo de tempo próprio**:

$$\Delta t_1 = \Delta t_0$$

Observe que, para efetuar a medida do intervalo de tempo Δt_2 , o observador fora do carrinho, para o qual a fonte está em movimento, precisa de dois relógios: um no evento 1 e o outro no evento 2. Essa medida não é própria, mas sim **relativa**. Portanto:

$$\Delta t_2 = \Delta t$$

A relação entre esses dois intervalos de tempo, Δt (intervalo de tempo relativo) e Δt_0 (intervalo de tempo próprio), depende da velocidade v com que a fonte se movimenta e da velocidade da luz c , que é dada por:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

De acordo com essa expressão, concluímos que:

- como a velocidade v com que a fonte se movimenta é sempre menor que a da luz c , Δt é sempre maior que Δt_0 ;
- se a velocidade v com que a fonte se movimenta for muito menor do que a da luz c ($v \ll c$), os intervalos de tempo Δt e Δt_0 serão praticamente iguais ($\Delta t \cong \Delta t_0$). Isso significa dizer que no nosso cotidiano não percebemos os efeitos da dilatação do tempo, pois as velocidades com a qual convivemos são desprezíveis em relação à da luz (300 000 km/s);
- à medida que a velocidade v aumenta, os efeitos da dilatação do tempo se tornam mais acentuados. Em outras palavras, o intervalo de tempo Δt fica cada vez maior em relação a Δt_0 . No entanto, a velocidade v não pode ser igual à c .

Uma das primeiras comprovações experimentais da dilatação do tempo foi obtida com partículas subatômicas denominadas **múons**. Essas partículas são geradas nas camadas superiores da Terra a partir de raios cósmicos e se dirigem à superfície da Terra em alta velocidade. Em razão de serem instáveis, pois num tempo extremamente curto sofrem decaimento, ou seja, transformam-se em outras partículas, dificilmente seriam observadas no nível do mar. Como, então, explicar a quantidade de múons observados no nível do mar? A resposta encontra-se no exercício resolvido 1.

Comentário:

Vamos deduzir a expressão $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$.

Para isso, utilizamos o teorema de Pitágoras (figura 9.7). Temos:

$$\left(\frac{L}{2}\right)^2 = d^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t}{2}\right)^2 \Rightarrow \frac{L^2}{4} = d^2 + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L^2 = 4 \cdot \left(d^2 + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4}\right) \Rightarrow L = 2 \cdot \sqrt{d^2 + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4}} \quad (\text{I})$$

Dividindo as expressões de Δt e Δt_0 , obtemos:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \frac{\cancel{L}}{\frac{2 \cdot d}{\cancel{L}}} \Rightarrow \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \frac{L}{2 \cdot d} \Rightarrow L = \frac{\Delta t}{\Delta t_0} \cdot 2 \cdot d \quad (\text{II})$$

Substituindo (I) em (II) e lembrando que $d = \frac{c \cdot \Delta t_0}{2}$, temos:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_0} \cdot \cancel{L} \cdot \frac{c \cdot \Delta t_0}{2} = \cancel{L} \cdot \sqrt{\frac{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2}{4} + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4}} \Rightarrow \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \frac{2}{c \cdot \Delta t_0} \cdot \sqrt{\frac{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2}{4} + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \sqrt{\frac{\cancel{L}}{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2} \cdot \left(\frac{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2}{\cancel{L}} + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{\cancel{L}}\right)} \Rightarrow \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \sqrt{\left(\frac{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2}{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2} + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2}\right)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \sqrt{1 + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2}}$$

Elevando os dois lados ao quadrado, obtemos:

$$\frac{(\Delta t)^2}{(\Delta t_0)^2} = 1 + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2} \Rightarrow \frac{(\Delta t)^2}{(\Delta t_0)^2} - \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{c^2 \cdot (\Delta t_0)^2} = 1 \Rightarrow \frac{(\Delta t)^2}{(\Delta t_0)^2} \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{(\Delta t)^2}{(\Delta t_0)^2} = \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \Rightarrow (\Delta t)^2 = \frac{(\Delta t_0)^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

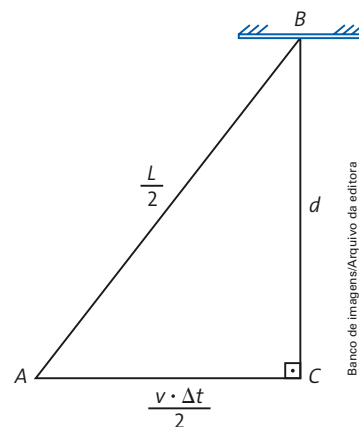


Figura 9.7 Caminho da luz para os dois observadores.

Exercício resolvido

1. Em repouso no laboratório, as partículas subatômicas denominadas múons sofrem decaimento em, aproximadamente, $2,2 \mu\text{s}$. Se os múons gerados nas camadas superiores se dirigem à superfície da Terra com velocidades da ordem de 99% da velocidade da luz, explique como eles conseguem atingir o nível do mar, antes de decair.



Resolução:

O intervalo de $2,2 \mu\text{s}$, medido com um único cronômetro, é o intervalo de tempo próprio Δt_0 . Nesse tempo, em movimento com a velocidade da ordem de 99% da velocidade da luz, os múons percorrem, antes do decaimento, uma distância igual a:

$$d = v \cdot \Delta t_0 \Rightarrow d = 0,99 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \Rightarrow d = 0,65 \text{ km} = 650 \text{ m}$$

Mas, de acordo com a dilatação do tempo, o intervalo medido por um observador na Terra para o tempo de vida dos múons é de:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \Rightarrow \Delta t = \frac{2,2}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,99 \cdot c}{c}\right)^2}} \Rightarrow \Delta t = 16,2 \mu s$$

E, nesse tempo, a distância percorrida pelos múons é:

$$d = v \cdot \Delta t_0 \Rightarrow d = 0,99 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 16,2 \cdot 10^{-6} \Rightarrow \\ \Rightarrow d = 4,81 \text{ km} = 4810 \text{ m}$$

Sem levar em conta a dilatação do tempo, os múons percorrem 650 m até o decaimento. Levando-se em conta as correções relativísticas, os múons percorrem 4810 m até o decaimento, o que justifica serem observados no nível do mar.

Paradoxo dos gêmeos

Um exemplo interessante para ilustrar a dilatação do tempo é denominado paradoxo dos gêmeos. Pedro e Mateus são gêmeos e estão com 20 anos de idade. Um dia, Pedro resolve fazer uma viagem interplanetária em uma nave espacial que se movimenta com uma velocidade v igual a 60% da velocidade da luz ($v = 0,6 \cdot c$), enquanto Mateus permanece na Terra (figura 9.8).

Ao retornar à Terra, Pedro está com 30 anos. Para ele, a viagem demorou 10 anos. Qual será a idade de Mateus?

Em princípio, deveríamos responder 30 anos, pois eles são gêmeos. Mas observe que, de acordo com a teoria da relatividade, para Mateus, que ficou na Terra, tudo o que

ocorre com Pedro é mais lento. Para Pedro, o tempo passa mais devagar, portanto, ele envelhece menos. Isso significa dizer que Mateus estará com mais de 30 anos. Para sermos exatos, 32,5 anos. Veja o cálculo a seguir. Para Pedro, a viagem demorou 10 anos. Então: $\Delta t_0 = 10$ anos (intervalo de tempo próprio). Para Mateus, que ficou na Terra, o intervalo de tempo da viagem de Pedro é Δt igual a:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \Rightarrow \Delta t = \frac{10}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,6 \cdot c}{c}\right)^2}} \Rightarrow \Delta t = 12,5 \text{ anos}$$

Como Mateus estava com 20 anos quando Pedro partiu e, para ele, a viagem demorou 12,5 anos, ele estará com 32,5 anos quando Pedro retornar.

Vejam, agora, a situação do ponto de vista de Pedro. No seu referencial, ele está parado na nave espacial e Mateus se movimenta junto com o planeta Terra. Portanto, o tempo passa mais lentamente para Mateus e, no reencontro, Pedro deveria estar mais velho.

Assim, estamos diante de um paradoxo: afinal, qual dos dois gêmeos está mais velho?



Figura 9.8 Enquanto Mateus fica na Terra, Pedro, seu irmão gêmeo, faz uma viagem com velocidade igual a 60% da velocidade da luz. Representação sem escala e em cores fantasia.

Na realidade, a suposta simetria entre as duas versões não existe. Somente a versão de Mateus está de acordo com a teoria da relatividade especial, pois ele se encontra em um **referencial inercial**. Devemos observar que o referencial de Pedro não é inercial. Para que Pedro possa retornar e encontrar o irmão, é preciso que a nave seja acelerada: no início da viagem, durante o retorno e na chegada à Terra.

Essa experiência hipotética com os gêmeos foi realizada com relógios atômicos a bordo de satélites artificiais em torno da Terra e ficou provado: o tempo passa mais lentamente para o relógio em movimento no satélite do que para um relógio na Terra.

Física explica



Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.



A dilatação do tempo e suas consequências

Vamos mostrar as consequências da dilatação do tempo na vida das pessoas por meio de dois artigos:

Artigo 1

Em outubro de 1971, os físicos americanos Joseph Hafele e Richard Keating realizaram uma experiência no sentido de verificar a teoria da relatividade especial de Einstein com relógios macroscópicos. Quatro relógios atômicos portáteis foram colocados em aviões comerciais que deram duas voltas em torno da Terra, uma vez em cada sentido.

As medições macroscópicas somente se tornaram possíveis graças à elevada precisão dos relógios atômicos modernos. As previsões da teoria da relatividade foram confirmadas pelos físicos com margem de erro de 10%.

Alguns anos mais tarde, físicos da Universidade de Maryland (USA) realizaram uma experiência semelhante com maior precisão. Eles colocaram relógios atômicos em aviões que deram várias voltas sobre a baía de Chesapeake durante 15 horas e conseguiram verificar a dilatação do tempo com erro menor que 1%.

Hoje em dia, quando se transportam relógios atômicos de um lugar para outro para calibração, ou para outros propósitos, o efeito da dilatação do tempo devido aos seus movimentos deve sempre ser levado em conta.

HALLIDAY; RENICK; WALKER. *Fundamentos de Física: Óptica e Física moderna*. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995. p. 130.

Artigo 2

Nos dias atuais, há um sistema de navegação de alta precisão que depende de satélites artificiais em órbita em torno da Terra. Para que não haja erros significativos nas posições fornecidas por esses satélites, é necessário corrigir relativisticamente o intervalo de tempo medido pelo relógio a bordo de cada um desses satélites.

A Teoria da Relatividade Especial prevê que, se não for feito esse tipo de correção, um relógio a bordo não marcará o mesmo intervalo de tempo que outro relógio em repouso na superfície da Terra, mesmo sabendo que ambos os relógios estão sempre em perfeitas condições de funcionamento e foram sincronizados antes de o satélite ser lançado.

Vestibular da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 1999.
Disponível em: <www.comperve.ufrn.br/conteudo/observatorio/uploads/publicacoes/documentos_antigos_09102012052159.pdf>. Acesso em: jan. 2016.

1. Por que é necessário fazer a correção relativística nas medidas de intervalo de tempo realizadas por um relógio em movimento?
2. Se não for feita a correção relativística para o tempo medido pelo relógio a bordo do satélite, ele ficará cada vez mais atrasado ou adiantado em relação ao relógio em terra?

Exercícios

4. Suponha que você esteja parado em uma esquina e um amigo passe de carro. Consultando os respectivos relógios, vocês anotam a hora em que o carro passou por dois cruzamentos diferentes e, com base nessas anotações, determinam o intervalo de tempo entre os dois eventos. Qual dos dois intervalos de tempo representa uma medida própria: o medido por você ou o medido pelo seu amigo? **O intervalo de tempo medido pelo seu amigo.**
5. Durante o período de treinamento, um astronauta recebe da Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica (Nasa) um salário mensal. Como parte desse treinamento, ele faz uma viagem pelo espaço com velocidade próxima à da luz, a qual, para ele, dura oito meses. Ao receber o pagamento, ele fica surpreso. A Nasa pagou mais ou menos do que ele esperava?
O astronauta recebeu mais do que esperava.
6. (UEMS) Em experimentos de laboratório, cientistas mediram o tempo de vida médio (τ) de partículas múons e constataram que, em repouso, o valor aproximado é $\tau \approx 2,2 \cdot 10^{-6}$ s e, quando a partícula se encontra em movimento com altas velocidades, τ sofre um aumento. Isso significa que essas partículas vivem mais quando estão se movendo do que quando em repouso. Indique a alternativa que explica esse fato.
 - a) Quando os múons estão em alta velocidade, há distorção no tempo, fazendo com que os cientistas tenham a impressão de que os múons vivem mais, não se constituindo como algo real.
 - b) Quando os múons estão em alta velocidade, há dilatação do espaço em seu entorno, portanto, o tempo de vida médio é maior.
 - c) Quando os múons estão em alta velocidade, o tempo se contrai, fazendo com que os cientistas tenham uma sensação distorcida do tempo.
 - d) O tempo de vida médio dos múons não depende de sua velocidade nem de quem a mede. Os cientistas, contudo, têm a impressão de que o tempo e o espaço são alterados.
 - x e) O tempo de vida médio dos múons depende de sua velocidade com relação aos cientistas, que fazem os experimentos e medem o tempo. O tempo de vida médio dos múons, medido pelos cientistas, é maior quanto maior for a velocidade relativa entre ambos.**
7. A duração de um evento a bordo de uma nave espacial em movimento foi de 12 minutos. Se a velocidade da nave em relação à Terra é de 80% da velocidade da luz ($v = 0,8 \cdot c$), quanto tempo durou o evento medido por um observador na Terra?
O evento durou 20 minutos.
8. Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado a uma estação espacial a uma velocidade constante $v = 0,8 \cdot c$, em que c é a velocidade da luz no vácuo. O tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada do astronauta à estação espacial, no referencial da Terra, foi de 20 meses.
 - a) Qual foi o tempo de viagem, em meses, medido no referencial da espaçonave? **$\Delta t = 12$ meses**
 - b) Qual das duas medidas é a medida própria?
A medida própria é aquela feita no referencial da espaçonave.
9. Uma partícula subatômica A é instável e, quando em repouso, após $2,4 \mu\text{s}$ transforma-se em outra partícula, B. Em uma experiência, a partícula A foi acelerada até atingir a velocidade de $0,80c$ (c é a velocidade da luz no vácuo). Nessa velocidade, o intervalo de tempo que a partícula A demorou para transformar-se na partícula B foi, em μs :
 - a) 4,0
 - b) 3,6
 - x c) 3,0**
 - d) 2,4
 - e) 1,44
10. (UFMG) Suponha que, no futuro, uma base avançada seja construída em Marte. Suponha, também, que uma nave espacial está viajando em direção à Terra, com velocidade constante igual à metade da velocidade da luz. Quando essa nave passa por Marte, dois sinais de rádio são emitidos em direção à Terra – um pela base e outro pela nave. Ambos são refletidos pela Terra e, posteriormente, detectados na base em Marte. Sejam t_B e t_N os intervalos de tempo total de viagem dos sinais emitidos, respectivamente, pela base e pela nave, desde a emissão até a detecção de cada um deles pela base em Marte. Considerando essas informações, é correto afirmar que:
 - a) $t_B = 2 \cdot t_N$
 - b) $t_B = \frac{3}{2} \cdot t_N$
 - c) $t_B = \frac{6}{5} \cdot t_N$
 - x d) $t_B = t_N$**



4 Contração da distância

Para verificar como o deslocamento, ou a distância, é afetado pela velocidade relativa entre o observador e o evento, vamos considerar a situação descrita no tópico 3.

Observe que, enquanto o raio de luz vai da lâmpada até o espelho e retorna à lâmpada, o carrinho se desloca entre os pontos P_1 e P_2 indicados na plataforma por onde ele passa, conforme mostra a **figura 9.9**.

Suponha que ambos os observadores (o primeiro colocado dentro do carrinho e, o segundo, em repouso na plataforma) meçam a distância entre os pontos P_1 e P_2 , nos quais ocorrem os eventos 1 e 2.

Começemos pelo observador 2 que se encontra parado na plataforma. A medida efetuada por ele da distância entre os pontos P_1 e P_2 é a **medida própria**, que representaremos por L_0 . Observe que esse observador somente precisa colocar a origem zero de uma trena no ponto P_1 e anotar o valor correspondente ao ponto P_2 .

Por outro lado, a medida efetuada pelo observador 1 é uma **medida relativa**, que representaremos por L , pois ele se encontra parado dentro do carrinho com velocidade v em relação ao solo, e a plataforma passa por ele com velocidade v (**figura 9.10**).

Para estabelecer a relação entre L e L_0 , devemos considerar que:

- para o observador dentro do carrinho em movimento, a plataforma se aproxima e depois se afasta, com velocidade v constante. Então, o comprimento L da plataforma, medido por ele, é dado pelo produto da velocidade v pelo intervalo de tempo próprio Δt_0 (medido com um único relógio):

$$L = v \cdot \Delta t_0 \text{ (I)}$$

- para o observador na plataforma, o comprimento L_0 da plataforma, medido por ele, pode ser entendido como o deslocamento de um ponto no carrinho, que se movimenta com velocidade v constante. Assim, esse comprimento é dado pelo produto da velocidade v do carrinho pelo intervalo de tempo relativo Δt (medido com dois relógios):

$$L_0 = v \cdot \Delta t \text{ (II)}$$

Dividindo a expressão (II) pela expressão (I), obtemos:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{\Delta t_0}{\Delta t}$$

De acordo com a expressão que relaciona os intervalos de tempo Δt e Δt_0 , obtemos:

$$L = L_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Nessa expressão, podemos concluir que o comprimento L da plataforma medida pelo observador em movimento é sempre menor do que o comprimento L_0 , medido pelo observador em repouso, pois a velocidade v (velocidade do carrinho) é sempre menor do que c (velocidade da luz). Assim, podemos enunciar que:

Corpos em movimento sofrem uma contração de tamanho na direção desse movimento em relação ao tamanho que têm quando medidos em repouso.

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

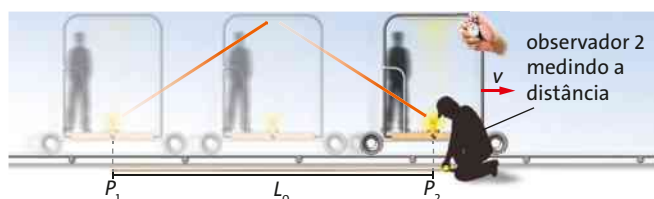


Figura 9.9 Para um observador em repouso na plataforma, a distância entre os pontos P_1 e P_2 é o comprimento próprio desse segmento de reta.

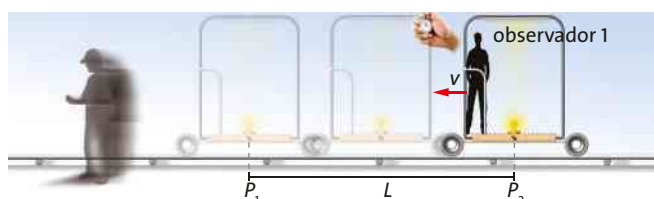


Figura 9.10 Para um observador dentro do carrinho, a plataforma se movimenta com velocidade v para a esquerda. A distância entre os pontos P_1 e P_2 é o comprimento relativo do segmento de reta.

Em relação à contração do comprimento, algumas observações são necessárias:

- Se a velocidade v é muito menor do que a da luz c ($v \ll c$), os comprimentos L e L_0 são praticamente iguais ($L \cong L_0$). Isso significa dizer que no nosso cotidiano não percebemos os efeitos da contração da distância, pois as velocidades com as quais convivemos são desprezíveis em relação à da luz (300 000 km/s).
- À medida que a velocidade v aumenta, os efeitos da contração da distância se tornam mais acentuados. Em outras palavras, o comprimento L fica cada vez menor em relação ao L_0 . No entanto, a velocidade v não pode ser igual à c .
- O efeito da relatividade só se verifica em relação à distância medida na direção do movimento. O comprimento perpendicular à direção do movimento não é afetado pelo movimento relativo.

Exercício resolvido

2. Uma nave espacial possui 10 m de comprimento quando ela está em repouso na Terra. Com a nave em movimento com velocidade v igual a 80% da velocidade da luz, um observador fixo na Terra, dispondo de aparelhagem adequada, efetua a medida do comprimento da nave.

- Qual é o resultado obtido pelo observador fixo na Terra?
- Qual é o comprimento da nave medido por um tripulante da nave?



Resolução:

- a) O comprimento L da nave medido pelo observador da Terra é:

$$L = L_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

$$L = 10 \cdot \sqrt{1 - \frac{(0,8 \cdot c)^2}{c^2}} \Rightarrow L = 6 \text{ m}$$

- b) Para um tripulante da nave, o comprimento dela é 10 m.

Exercícios

11. b) O comprimento da barra, medido pelo observador, será menor do que 2,0 m (medida do comprimento da barra em repouso).



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

11. Uma barra, em repouso, possui 2,0 m de comprimento. Se, em relação a um observador, essa barra entra em movimento com velocidade v na direção de seu comprimento, o que acontece com a medida de seu comprimento feita pelo observador:

- se a velocidade da barra é desprezível em relação à da luz? **O comprimento da barra não se altera.**
- se a velocidade da barra é comparável à da luz?

12. Uma pessoa viajando em uma nave espacial em alta velocidade utiliza uma régua de 30 cm (comprimento de repouso). Para essa pessoa, o comprimento da régua parece contraído? **Não.**

13. Uma barra, com um comprimento de repouso igual a 1,70 m, mantém-se paralela ao eixo x de um referencial S , movendo-se ao longo desse eixo

com velocidade $0,6 \cdot c$, em que c é a velocidade da luz. O comprimento da barra medido por um observador em S é maior, menor ou igual a 1,70 m? Justifique. **Menor que 1,70 m.**

14. Um painel de propaganda tem formato retangular com 5 m de comprimento e 3 m de altura. Para que o formato desse painel pareça quadrado para um viajante espacial, este deverá estar em movimento:

- em uma direção paralela ao lado mais curto do painel.
- X** b) em uma direção paralela ao lado mais comprido do painel.
- em uma direção perpendicular ao lado mais comprido do painel.
- em qualquer direção.



Dinâmica relativística

Não só o comprimento e o intervalo de tempo são afetados pelo movimento relativo entre o observador e o evento. A teoria da relatividade prevê que a inércia de um corpo não é invariável e sofre os efeitos relativísticos em razão do movimento relativo.

A inércia de um corpo aumenta com o aumento de sua velocidade.

Sendo a massa a medida da inércia de uma partícula ou um corpo, devemos observar que o aumento na inércia (aumento de massa) de uma partícula em virtude de sua velocidade não significa aumento de quantidade de matéria. Se tivermos, por exemplo, um elétron em alta velocidade, a quantidade de matéria continua sendo de um elétron, mas sua massa aumenta, em relação ao referencial ao qual ele está em movimento.

Com sua teoria, Einstein mostrou que, se a massa (inércia) de uma partícula em repouso é m_0 , a massa m dessa partícula em movimento com velocidade v é dada por:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

As mesmas observações feitas para a dilatação do tempo são válidas para a correção relativística dada pela expressão acima, ou seja:

- se a velocidade v com que a partícula se movimenta é muito menor que a da luz, ou seja, $v \ll c$, sua massa m em movimento é praticamente igual à sua massa em repouso, m_0 ;
- quanto maior for o valor da velocidade v da partícula, maior será o valor de sua massa m .

Energia relativística

Vejam, agora, o que diz a teoria da relatividade em relação à **energia**. Einstein estabeleceu que uma partícula em repouso possui uma energia de repouso E_0 dada por:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2$$

Do mesmo modo, uma partícula de massa m em movimento possui uma energia de movimento (energia total) E dada por:

$$E = m \cdot c^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \cdot c^2$$

Essa expressão representa a famosa equação de Einstein que relaciona as transformações entre matéria e energia. É usada para o cálculo de transformação de massa em energia, ou vice-versa, e constitui a chave para a compreensão da energia nuclear, que explica a origem do combustível nuclear das estrelas.

A diferença entre a energia total e a de repouso é a energia cinética do corpo. Assim:

$$E_c = E - E_0 = (m - m_0) \cdot c^2$$

Essa expressão deve ser usada para velocidades não desprezíveis em relação à da luz, ou seja, quando os efeitos relativísticos não podem ser desprezados. Para velocidades muito pequenas, quando comparadas à da luz, podemos usar a expressão da Física clássica: $E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$.

É importante observar que a teoria da relatividade não é uma negação da Física clássica, mas sim um refinamento tão aguçado que várias verificações experimentais mais precisas só foram possíveis muitos anos depois de Einstein ter elaborado a teoria.

Exercício resolvido

3. Em um acelerador de partículas, um elétron é acelerado até atingir 10% da velocidade da luz no vácuo.

- Calcule, pela expressão clássica $\left(E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}\right)$, a energia cinética de um corpo de 2 kg que atinge-se essa velocidade.
- Calcule o valor dessa energia cinética usando a expressão relativística.
- Qual é a diferença percentual entre os valores obtidos?
- A usina hidrelétrica de Itaipu pode produzir 12 GW, ou seja, $12 \cdot 10^9$ J/s. Nesse regime, quanto tempo ela levaria para produzir a energia necessária para acelerar esse corpo de 2 kg até a velocidade do acelerador?



Resolução:

a) Como $E_{\text{cinética}} = \frac{m \cdot v^2}{2}$ e $v = 0,1 \cdot c$, temos:

$$E_c = \frac{2 \cdot (0,1 \cdot 3 \cdot 10^8)^2}{2} \Rightarrow E_c = 9,0 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

b) Substituindo os valores na expressão:

$$E_c = E - E_0 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2, \text{ temos:}$$

$$E_{\text{cinética}} = 2 \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,1 \cdot c}{c}\right)^2}} - 1 \right)$$

$$E_{\text{cinética}} = 9,1 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

c) A diferença percentual ($\Delta\%$) é:

$$\Delta\% = \frac{|9,07 - 9|}{9,07} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta\% = 0,77\%, \text{ ou seja, menos que } 1\%.$$

d) Pela definição de potência, temos $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$;

$$\text{logo: } 12 \cdot 10^9 = \frac{9 \cdot 10^{14}}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = 75\,000 \text{ s} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t = 20 \text{ h } 50 \text{ min}$$

A relatividade mostra que acelerar corpos macroscópicos a velocidades próximas à da luz envolve quantidades de energia gigantescas.

15. Os efeitos relativísticos que afetam a massa e o tempo: aumento de massa e dilatação do tempo em virtude da velocidade, matematicamente expressa pela equação $E = mc^2$ e pela transformação de Lorentz relativa à dilatação do tempo.



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

Exercícios

15. As antigas noções de que a massa nunca se altera e de que o tempo flui à mesma velocidade para qualquer um faziam sentido quando as pessoas só percebiam os objetos comuns que se moviam lentamente ao seu redor. No verdadeiro Universo mais amplo, elas não são corretas, mas existem leis exatas que explicam como elas se alteram.

BODANIS, David. $E = mc^2$: uma biografia da equação que mudou o mundo e o que ela significa. Rio de Janeiro: Ediouro, 2001. p. 94.

Quais são as leis exatas a que o texto se refere?

16. De acordo com a Mecânica clássica, quando dobramos a velocidade de um corpo, sua energia cinética

quadruplica. Essa afirmação é válida também para a Mecânica relativística? **Não.**

17. Qual é a quantidade de energia, em joule, que se obtém quando uma massa de 1,0 kg é convertida em energia? Considere $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. **$E = 9,0 \cdot 10^{16}$ J**

18. A massa de repouso de um corpo é 0,20 kg. Determine as energias de repouso, total e cinética desse corpo quando ele se movimenta com velocidade igual a $\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c$. Considere $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

$$18. E_{\text{repouso}} = 1,8 \cdot 10^{16} \text{ J}; E_{\text{total}} = 3,6 \cdot 10^{16} \text{ J}; E_{\text{cinética}} = 1,8 \cdot 10^{16} \text{ J}.$$



Energia em pacotes

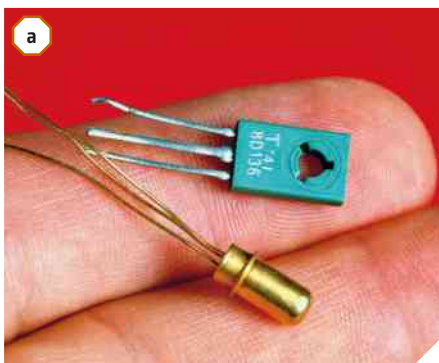
A teoria quântica, junto com a teoria da relatividade, forma os alicerces da Física moderna. No final do século XIX, um dos problemas que atraía a atenção dos físicos era a distribuição de energia na radiação emitida por um corpo aquecido. Para esse experimento utilizamos o chamado corpo negro, que será visto a seguir. Não conseguimos conciliar as teorias vigentes na época com os resultados experimentais (veja gráfico ao lado).

Em 14 de dezembro de 1900, Max Planck apresentou um trabalho à Sociedade Alemã de Física, no qual lançava um novo conceito que viria revolucionar o mundo da Física microscópica: o conceito de *quantum*.

De acordo com Planck, a absorção ou a emissão de energia pela matéria não é contínua, como previa a Física clássica, mas sim, descontínua. Ainda mais: a emissão ou a absorção de energia acontece de forma discreta, em pequenos pacotes. Planck denominou *quantum* a unidade de radiação de energia. No plural, temos a palavra *quanta*, termo que deu origem à Física quântica.

Em 1905, Einstein aplicou essa quantização de energia para explicar o efeito fotoelétrico. Ele utilizou o termo **fóton** para um *quantum* de energia. Assim, os *quanta* de radiações eletromagnéticas, inclusive a luz, são denominados fótons. Em 1913, o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) aplicou a teoria quântica para o átomo de hidrogênio.

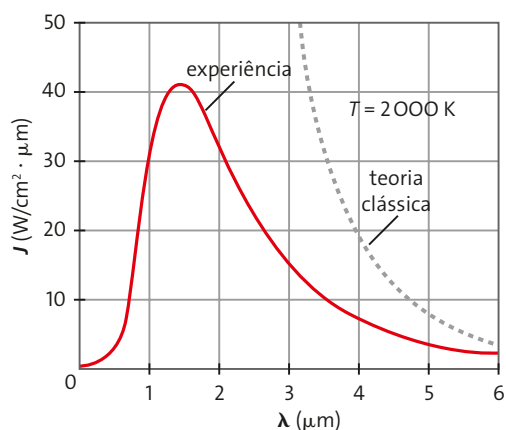
A Física quântica tem propiciado um desenvolvimento tecnológico sem precedentes. A aplicação dos transistores e dos *lasers* tem produzido profundas mudanças na Eletrônica, na Medicina, na Biotecnologia e, conseqüentemente, no nosso modo de vida.



O transistor revolucionou a Eletrônica (a), e o *laser* abriu novas perspectivas na Medicina (b).



Radiação emitida de um corpo negro à temperatura de 2000 K e previsão da teoria eletromagnética clássica



Fonte: Instituto de Física da UFRGS. Disponível em: http://lief.it.ufrgs.br/pub/cref/n25_Alvarenga/corpo_negro.htm. Acesso em: mar. 2016.

- Qual é a principal diferença entre a teoria eletromagnética clássica e a proposta por Planck?
- O que é um fóton?

A radiação do corpo negro

Em relação aos fenômenos atômicos, um dos conflitos entre as previsões da Física clássica e os resultados experimentais está relacionado à dependência entre a intensidade de energia e o comprimento de onda da radiação emitida por um corpo.

Para entender como esse conflito foi solucionado, vamos partir do fato comprovado de que cargas elétricas aceleradas produzem ondas eletromagnéticas. Por exemplo, na agitação molecular ocorrem oscilações dos portadores de carga elétrica e emissão de ondas eletromagnéticas. Um corpo irradia energia em qualquer temperatura, excluindo-se, naturalmente, o zero absoluto, 0 K (−273 °C).

A radiação emitida pelos corpos em razão da agitação térmica em geral denomina-se **radiação térmica**. Ela depende exclusivamente da natureza da fonte emissora e de sua temperatura. Até cerca de 900 K (627 °C), é desprezível a quantidade de radiação na faixa visível do espectro eletromagnético. Quando em brasa, tanto o carvão como o ferro apresentam temperaturas acima desse valor e são exemplos de corpos emissores de radiação visível. No filamento de uma lâmpada incandescente, a temperatura atinge cerca de 3 000 °C e a radiação emitida contém uma quantidade significativa de todos os comprimentos de onda na faixa do visível, fazendo com que a luz se torne branca.



Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Outro aspecto importante é que os corpos em geral também podem absorver energia, a qual provoca, normalmente, aumento na agitação molecular e, conseqüentemente, aumento de temperatura. Se um corpo está em equilíbrio térmico com o ambiente ao seu redor, sua taxa de emissão de energia é igual à sua taxa de absorção; caso contrário, haverá variação em sua temperatura, violando a hipótese de equilíbrio térmico. Vemos, então, que um bom absorvedor de energia é também um bom emissor. O absorvedor ideal, em equilíbrio térmico com o meio ambiente, é chamado de **corpo negro**; as cavidades dos corpos aquecidos se comportam como eles (figura 9.11).

Em 1879, o físico austríaco Josef Stefan (1835-1893), com base em resultados experimentais, sugeriu uma regra para relacionar a emissão de energia por unidade de área e por unidade de tempo (R) com a temperatura absoluta (T) de um corpo.

Em 1884, o físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), com base na Termodinâmica, sintetizou a regra de Stefan na expressão abaixo, a qual, por isso, é conhecida como a **lei de Stefan-Boltzmann**:

$$R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Nessa expressão:

- ε é a emissividade, um coeficiente que depende do material, do tipo de superfície e do comprimento de onda da radiação incidente, podendo assumir valores entre 0 e 1, conforme mostra a tabela 9.1;
- σ é uma constante universal, cujo valor, no Sistema Internacional de Unidades (SI), é $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Ela é denominada **constante de Stefan-Boltzmann**.

Observe na **tabela 9.1** valores de emissividade (ϵ) de alguns materiais à temperatura de 300 K (27°C). O valor de emissividade igual a 1 corresponde ao corpo negro: o melhor absorvedor e o melhor emissor, ou seja, possui refletividade nula. Na realidade, não existem corpos negros na natureza. Os corpos que podem ser considerados negros são aqueles que refletem somente uma pequena parcela da radiação incidente.

Tabela 9.1 Emissividade de alguns materiais

Material	Emissividade (ϵ)
Aço inoxidável – típico, polido	0,17
Alumínio – altamente polido, película	0,04
Água	0,96
Areia	0,90
Concreto	0,88 – 0,93
Asfalto	0,85 – 0,93
Vegetação	0,92 – 0,96

Fonte: Departamento de Engenharia Civil da UFSC. Disponível em: <www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_ic/IC_gabriela.pdf>. Acesso em: maio 2016.

Experimentos conduzidos na década de 1890 mostraram que a energia irradiada por um corpo varia com o comprimento de onda e com a temperatura. De acordo com o gráfico da **figura 9.12**, há um comprimento de onda no qual a intensidade de energia irradiada é máxima. À medida que a temperatura aumenta, esse máximo se desloca para valores menores de comprimento de onda.

Na tentativa de explicar a irradiação de energia em função do comprimento de onda por meio da Física clássica, dois trabalhos merecem destaque.

O primeiro, de 1893, ficou conhecido como a **lei de Wien**, em homenagem ao físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928), que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1911 por suas descobertas sobre as leis que governam a irradiação de calor. A expressão desenvolvida por Wien estava de acordo com as curvas experimentais para pequenos comprimentos de onda. Para comprimentos de onda maiores, no entanto, ela se afastava muito dos valores experimentais (**figura 9.13**).

O segundo trabalho, também com base na Física clássica, ficou conhecido como a **lei de Rayleigh-Jeans**, em homenagem a James Hopwood Jeans (1877-1946) e John William Strutt (1842-1919), o lorde Rayleigh. A fórmula funcionava bem para grandes comprimentos de onda, porém se afastava grosseiramente dos resultados experimentais a partir da radiação ultravioleta (**figura 9.13**).

Distribuição de energia irradiada em função do comprimento de onda de 1890

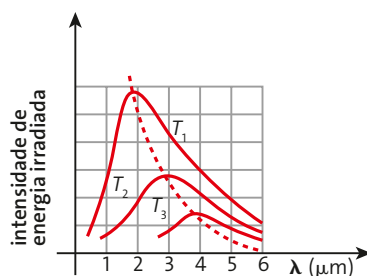


Figura 9.12

Fonte: Departamento de Física da UFPR. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>>. Acesso em: mar. 2016.

Distribuição de energia irradiada em função do comprimento de onda

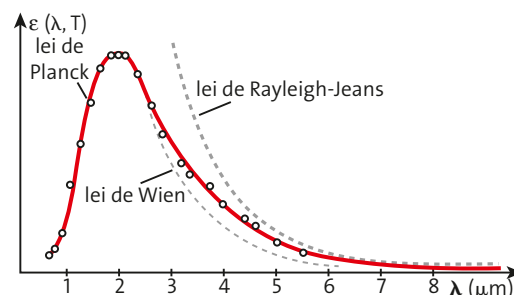


Figura 9.13

Fonte: Laboratório de Ensino Virtual da UnB. Disponível em: <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica-4/Aulas/Aula-18/aula-18.html>>. Acesso em: mar. 2016.

Exercício resolvido

4. O Sol, cuja temperatura na superfície é de aproximadamente 5800 K, pode ser considerado, com excelente aproximação, um corpo negro. Sabe-se que a energia irradiada pelo Sol não é uniforme quanto aos comprimentos de onda. O comprimento de onda, em metros, para o qual a distribuição apresenta um máximo ($\lambda_{\text{máx.}}$) é inversamente proporcional à temperatura absoluta (T), em kelvin, e é dado pela lei de Wien: $\lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T}$.

Determine:

- a) em qual comprimento de onda a distribuição da energia solar tem um máximo;

- b) em que faixa do espectro eletromagnético esse comprimento de onda máximo se encontra.



Resolução:

- a) Para $T = 5800$ K, obtemos, por meio da lei de Wien, o comprimento de onda máximo da emissão solar:

$$\lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T} \Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5800} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

- b) O comprimento de onda obtido pertence à região do espectro visível pelos humanos.

A teoria quântica

Em 1879, Max Planck apresentou em Munique, na Alemanha, sua tese de doutorado sobre Termodinâmica. Dez anos mais tarde, ele assumiu uma cátedra na Universidade de Berlim, Alemanha, e passou a se dedicar à radiação do corpo negro. Em 19 de outubro de 1900, Planck estabeleceu um marco na Física ao apresentar seu trabalho sobre radiação diante da Sociedade de Física de Berlim. Pelo seu trabalho, Planck recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1918.

Para explicar a distribuição espectral da radiação térmica, Planck introduziu hipóteses totalmente novas, revolucionárias, que o conduziram a uma equação que concordava com os dados experimentais da radiação do corpo negro em todos os comprimentos de onda.

Como na agitação molecular ocorrem oscilações dos portadores de carga elétrica e emissão de ondas eletromagnéticas, Planck associou osciladores harmônicos (sistemas que oscilam com frequências bem definidas) na superfície do corpo às cargas elétricas dentro das moléculas e estabeleceu as seguintes condições:

- a energia de um oscilador é **quantizada**, ou seja, não pode haver uma quantidade qualquer de energia, mas somente múltiplos de um valor fundamental;
- a energia irradiada por um oscilador não é contínua; ela se manifesta de forma discreta, por meio de pulsos, ou **quanta**. A energia é emitida quando um oscilador passa de um estado quantizado para outro;
- a menor quantidade de radiação de energia é o **quantum**. Um *quantum* de energia E é diretamente proporcional à frequência f da radiação, ou seja:

$$E = h \cdot f$$

Nessa expressão, h é denominada constante de Planck e, no SI, o seu valor é:

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Portanto, a emissão ou absorção de energia por um oscilador só pode ter valores múltiplos de $h \cdot f$, sendo dada por:

$$E = n \cdot h \cdot f$$

em que n é um número inteiro (1, 2, 3, ...), chamado de **número quântico**.

Quando o oscilador sofre uma transição de um estado quântico para outro, há uma emissão ou absorção de energia, dada pela diferença entre as energias dos estados inicial e final. Por exemplo, se o oscilador sofrer uma transição do estado quântico $n = 3$ para o $n = 2$, a diferença de energia entre esses dois estados é emitida como um único *quantum* de radiação. Se o oscilador permanecer em um único estado quântico, não há emissão ou absorção de energia.

Na **figura 9.14**, temos a representação dos níveis de energia para um oscilador com frequência f . As setas indicam as transições entre os estados quânticos. Se o oscilador passa para um estado quântico mais baixo, temos **emissão** de energia; quando ele passa para um estado quântico mais alto, temos **absorção** de energia.

As hipóteses formuladas por Planck abriram caminho para um novo campo: a **Mecânica quântica**. Como veremos no tópico seguinte, Einstein utilizou o modelo quântico para explicar o efeito fotoelétrico.

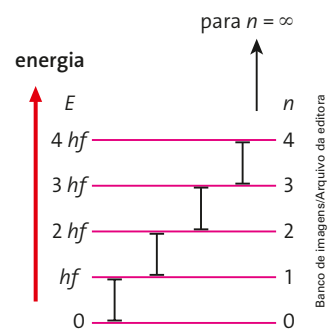


Figura 9.14 Níveis de energia para um oscilador com frequência f .

Exercícios

23. a) $f = 5,2 \cdot 10^{14}$ Hz

b) A cor da luz correspondente à radiação emitida é amarela.

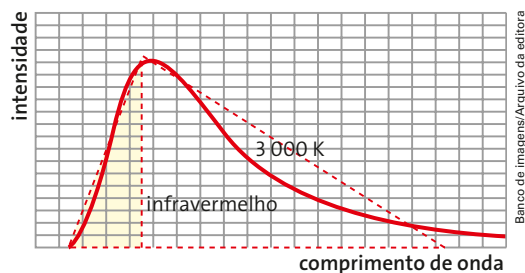


19. Partindo do fato de que todos os corpos irradiam energia, explique por que normalmente não conseguimos enxergar pessoas e alguns corpos no escuro. [Veja resposta no Manual do Professor.](#)

20. A temperatura da pele do corpo humano é aproximadamente 35°C . Admitindo que o corpo humano possua uma área superficial total de $2,0\text{ m}^2$, a quantidade de energia irradiada é equivalente a 10 lâmpadas de 100 W cada. Nessas condições:

- determine o pico do comprimento de onda da radiação que a pele emite, de acordo com a lei de Wien. $\lambda = 9,4 \cdot 10^{-6}\text{ m}$
- localize essa radiação no espectro eletromagnético.
- explique por que as pessoas não brilham tanto quanto as 10 lâmpadas de 100 W citadas no texto.

21. A curva de distribuição de energia irradiada mostrada no gráfico da figura é a de um corpo negro a 3000 K .



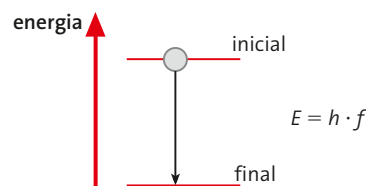
21. a) $\lambda = 9,7 \cdot 10^{-7}\text{ m}$

Podemos estimar que essa temperatura seja a de um filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente.

- De acordo com a lei de Wien, em qual comprimento de onda a emissão é máxima?
- Pela relação entre as áreas dos triângulos auxiliares destacados no gráfico, determine, do total irradiado pela lâmpada, a porcentagem aproximada de energia luminosa que é aproveitada. 19%

22. O que significa dizer que determinada grandeza é quantizada? Explique se as grandezas “intervalo de tempo” e “quantidade de carga elétrica” são, ou não, quantizadas. [Veja resposta no Manual do Professor.](#)

23. Na figura abaixo estão representados dois níveis de energia de determinado átomo.



A diferença de energia entre os níveis inicial e final é $3,4 \cdot 10^{-19}\text{ J}$.

- Determine a frequência da radiação emitida da transição do nível inicial para o nível final.
- Sabendo-se que a relação entre a frequência e o comprimento de onda é $\lambda \cdot f = c$, em que c é a velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8\text{ m/s}$), e com base na tabela seguinte, determine a cor da luz correspondente à radiação emitida.

Relação entre cor da luz e o comprimento de onda da radiação emitida

Cor	λ (10^{-10} m)
violeta	4000 – 4400
anil	4400 – 4600
azul	4600 – 5000
verde	5000 – 5700
amarelo	5700 – 5900
laranja	5900 – 6200
vermelho	6200 – 7000

20. b) Essa radiação encontra-se na faixa do infravermelho do espectro.

c) As pessoas não brilham tanto porque a radiação emitida está na faixa do infravermelho e nossos olhos não são sensíveis a essa radiação.



Figura 9.15 Representação (sem escala e em cores fantasia) do experimento do efeito fotoelétrico.

A luz emitida por uma lanterna incide sobre uma superfície metálica, arrancando elétrons. Esses elétrons – fotoelétrons –, atraídos por uma placa carregada positivamente, formam uma corrente elétrica que é indicada pelo medidor.

Antonio Robson/Arquivo da editora

7 Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons por uma superfície metálica quando iluminada por luz de frequência adequada. Na **figura 9.15**, temos uma representação desse efeito.

A Física clássica esbarrava em alguns pontos na tentativa de explicar o efeito fotoelétrico utilizando o caráter ondulatório da luz. Albert Einstein teorizou que a energia chega aos elétrons do metal em “pacotes” e não continuamente, ao contrário do que se pensava na visão ondulatória clássica.

Cada “pacote” é um *quantum* de energia, ou seja, carrega uma quantidade bem definida de energia. O modelo elaborado por Einstein passou a ser conhecido como **teoria dos quanta**. O trabalho de Einstein mostrou que o efeito fotoelétrico não pode ser interpretado com base no modelo ondulatório da luz. Para a luz, deve ser utilizado um modelo corpuscular, pois ela é constituída de fótons e obedece aos postulados da teoria quântica.

No efeito fotoelétrico, os fótons interagem com a matéria como se fossem partículas, mas a sua propagação no espaço tem um comportamento ondulatório. A energia de um fóton de luz é transferida, numa única colisão, para um elétron da placa metálica. Como cada elétron ligado a um metal interage com o núcleo por meio de uma força atrativa, precisa receber uma quantidade mínima de energia para ser arrancado. Se a energia do fóton (E) não supera essa quantidade mínima, o elétron não é arrancado e o efeito fotoelétrico não acontece. Mas, se a energia de cada fóton superar o valor mínimo exigido, o elétron é arrancado. Sendo a energia do fóton diretamente proporcional à frequência da radiação incidente ($E = h \cdot f$), o efeito fotoelétrico depende somente da frequência (ou comprimento de onda) da radiação incidente.

A energia mínima para extrair (arrancar) um elétron de uma placa metálica é chamada de **função trabalho** (W) do material dessa placa. Cada tipo de metal utilizado possui uma função trabalho específica.

No SI, a unidade utilizada para a função trabalho (W) é o **joule (J)**, pois se trata de uma energia. Mas, na Física moderna, uma unidade de energia muito utilizada é **elétron-volt (eV)**, definida do seguinte modo:

1 eV é a energia adquirida por um elétron ao ser acelerado por uma diferença de potencial igual a 1 V.

Sendo a carga elétrica de um elétron igual a $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, a relação entre o elétron-volt (eV) e o joule (J) é:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Se a energia do fóton for superior a essa energia mínima (função trabalho), a diferença entre elas é a energia cinética máxima ($E_{c(\text{máx.})}$) do elétron ejetado (fotoelêtron):

$$E_{c(\text{máx.})} = E - W$$

Lembrando que a energia E do fóton é dada por $E = h \cdot f$, a expressão acima pode ser escrita como:

$$E_{c(\text{máx.})} = h \cdot f - W$$

A representação gráfica dessa expressão está mostrada na **figura 9.16**.

Observe no gráfico que existe uma frequência mínima (f_0) da luz que corresponde a uma energia cinética do elétron igual a zero. O efeito fotoelétrico ocorre somente quando usamos luz de frequência igual ou maior que f_0 . Abaixo dessa frequência mínima, o efeito fotoelétrico não acontece.

Outro ponto a ser considerado diz respeito à intensidade da luz incidente sobre a placa metálica. Quanto maior a intensidade da luz sobre a placa, maior a quantidade de elétrons arrancados. Contudo, a energia dos fotoelétrons não aumenta; portanto, a energia cinética dos elétrons ejetados não se altera. Isso significa dizer que, se a luz incidente não possuir a frequência mínima necessária, mesmo aumentando sua intensidade o efeito fotoelétrico não ocorrerá.

 **Gráfico da energia cinética em função da frequência, para o efeito fotoelétrico**

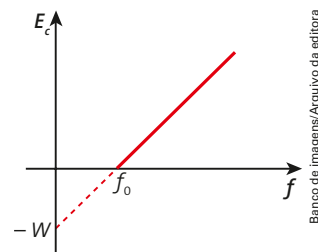


Figura 9.16

Banco de imagens/Arquivo da editora

Física explica



Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.

Células fotoelétricas

Embora o efeito fotoelétrico pareça algo que diz respeito somente aos físicos nos laboratórios, o nosso cotidiano está impregnado de dispositivos que utilizam **células fotoelétricas**. Basta observarmos, por exemplo, o funcionamento automático de determinadas portas em lojas, hotéis, *shoppings*, etc., o acendimento automático de lâmpadas em postes de iluminação nas ruas e o controle automático de água em torneiras (**figura a**).

Para ilustrar, vamos mostrar como funciona um dispositivo que controla o acendimento automático de uma lâmpada em um poste de iluminação. Observe a **figura b**.

Durante o dia, a luz do Sol incide sobre o dispositivo fotoelétrico, arrancando elétrons e fazendo com que uma corrente circule pela bobina, ativando-a. Com isso, a chave do relé fica na posição 2 e não passa corrente pelo filamento da lâmpada do poste. A lâmpada permanece apagada.

Durante a noite, sem a luz do Sol, a bobina não é ativada. Com isso, a chave do relé vai para a posição 1, fazendo com que uma corrente elétrica passe pelo filamento da lâmpada, acendendo-a.

1. Cite uma vantagem da instalação de célula fotoelétrica no controle automático de água na torneira.

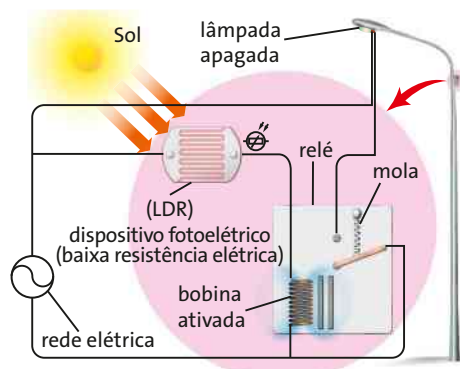
2. Qual é o princípio básico de funcionamento de uma célula fotoelétrica?

Figura b Representação esquemática do princípio de funcionamento de um dispositivo fotoelétrico que controla o acendimento automático de uma lâmpada, utilizando a luz do Sol.



Dario Diamant/Shutterstock/Glow Images

Figura a As portas automáticas utilizam células fotoelétricas. Elas são responsáveis por indicar a presença de um usuário.



Antonio Robson/Arquivo da editora

24. Por que Einstein precisou lançar mão do modelo corpuscular para a luz para explicar o efeito fotoelétrico?
[Veja resposta no Manual do Professor.](#)
25. Dois feixes de luz, de mesma frequência, mas de intensidades diferentes, incidem sobre duas placas metálicas de mesmo material. Qual delas poderá ejetar mais elétrons da placa?
[O de maior intensidade conseguirá arrancar mais elétrons da placa.](#)
26. Dois feixes de luz, de mesma intensidade, mas de frequências diferentes, incidem sobre duas placas metálicas de mesmo material. Um deles consegue arrancar elétrons da placa, mas o outro não. Qual a explicação para esse fato?
[Veja resposta no Manual do Professor.](#)
27. Para um determinado metal, o efeito fotoelétrico ocorre somente para radiação luminosa com frequência superior a $5,0 \cdot 10^{14}$ Hz. Calcule a função trabalho desse metal, em elétrons-volt (eV). Considere $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J · s. $W = 2,1$ eV

8 Modelos atômicos

Para que possamos entender o que levou Niels Bohr a aplicar a teoria quântica para a estrutura atômica, com base no átomo de hidrogênio, vamos apresentar alguns dados históricos a respeito dos modelos atômicos.

Física tem História



[Veja comentários e respostas desta seção no Manual do Professor.](#)

A história do átomo

A história do átomo começa em Abdera, porto marítimo que foi desenvolvido por refugiados provenientes da invasão persa da Lídia. Geograficamente, Abdera está situada na costa norte do mar Egeu. Nesta pequena cidade da região da Trácia, o legendário filósofo grego Leucipo, nascido em 500 a.C., em Eleia ou Mileto, foi morar por volta de 478 a.C. Muitos acreditam que Leucipo era um pseudônimo do grande filósofo grego Demócrito. A maioria dos autores considera, todavia, que Leucipo foi discípulo de Zenon e mestre de Demócrito, tendo sido o fundador da Escola de Abdera, onde se originou a teoria atomística grega. A Escola de Abdera se notabilizou por estudar um dos problemas maiores da Filosofia e da Ciência: a constituição da matéria que compõe o Universo.

A escola atomística

Entre as várias teorias sobre a constituição da matéria que compõe o Universo, a mais lógica na Antiguidade grega foi a hipótese atomística. Esta teoria possibilitou aos seus autores, Leucipo e Demócrito, dar uma explicação para a estrutura da matéria do nosso Universo sem recorrer a entidades divinas ou misteriosas.

[...] A teoria fundamental de Leucipo e Demócrito é a de que o Universo é constituído de duas coisas: os átomos e o vácuo; isto é, composto de agregados de matéria e de um vazio total. Demócrito acreditava que as diversas espécies de matéria poderiam ser subdivididas em pedaços cada vez menores até atingir um limite, além do qual nenhuma divisão seria possível.

A denominação **átomo** dada a estas partículas indivisíveis foi, na realidade, de Epicuro, quase um século mais tarde.

As substâncias são diferentes porque os seus átomos diferem quanto à forma ou pela maneira como estão agregados. As diversas substâncias são diferentes entre si quanto à dureza, porque os átomos podem estar bastante próximos ou afastados. Quando estão muito próximos, o corpo é sólido; e, quando mais afastados, o material é mais maleável. Os átomos explicam também todas as nossas sensações: paladar, olfato, tato, visão e audição.

MARTINS, Jader B. *A história do átomo*: de Demócrito aos quarks. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2001. p. 1-2.

Na época de Newton, no século XVII, o átomo era idealizado como uma pequena esfera, dura e indestrutível. Até hoje, a palavra “átomo” permanece, mesmo sabendo-se que essa visão de um átomo indivisível não é correta.

Em 1803, o químico e físico britânico John Dalton (1766-1844) estabeleceu as primeiras bases científicas da teoria atômica, sendo considerado por isso um dos “pais da Física moderna”. Dalton percebeu que a combinação de elementos era feita de acordo com proporções bem definidas de números inteiros e reforçou a ideia do átomo como uma partícula que não podia ser dividida por nenhum processo químico conhecido na época.

No final do século XIX, mais precisamente em 1897, na Universidade de Cambridge, Inglaterra, o físico britânico Joseph John Thomson (1856-1940) constatou a existência do elétron como parte constituinte do átomo. Thomson utilizou, em seus experimentos, um tubo de raios catódicos semelhante aos tubos utilizados nos televisores antigos (figura 9.17).

Nos tubos de raios catódicos, um filamento aquecido (F) emite partículas que são aceleradas por uma diferença de potencial (V), atravessam uma região onde existe um campo elétrico (E) e um campo magnético (B), perpendiculares entre si, e atingem a tela fluorescente (S) em um ponto que se torna visível. O trabalho de Thomson consistiu em medir a razão entre a carga elétrica e a massa dessas partículas, que foram chamadas inicialmente de corpúsculos e, posteriormente, de **elétrons**.

Como resultado de suas pesquisas experimentais, Thomson lançou a hipótese de que os seus corpúsculos eram, de fato, constituintes da matéria. Thomson estabeleceu um modelo físico para o átomo, que ficou conhecido como **pudim de passas**, pois, para ele, o átomo era um pudim positivo no qual estavam incrustadas passas negativas distribuídas de tal forma que o conjunto era eletricamente neutro. Em 1906, Thomson recebeu o Prêmio Nobel de Física pelo estudo da descarga elétrica em gases e pela descoberta do elétron.

Em 1911, o físico neozelandês Ernest Rutherford, que havia recebido o Prêmio Nobel de Química em 1908 pelo estudo da radioatividade e pela descoberta da desintegração dos átomos pelos raios alfa, realizou experimentos sobre a dispersão de **partículas alfa** quando lançadas ao encontro de uma película metálica delgada (figura 9.18).

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir

A teoria de Leucipo e Demócrito está de acordo com os conhecimentos que temos hoje a respeito dos átomos?

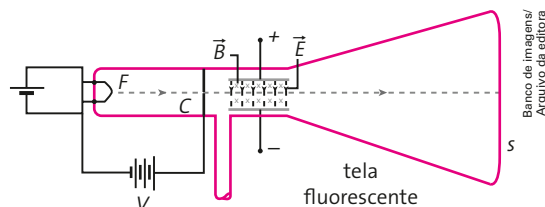


Figura 9.17 Representação de um tubo de raios catódicos.

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

Partícula alfa –

Partícula constituída por dois prótons e dois nêutrons.

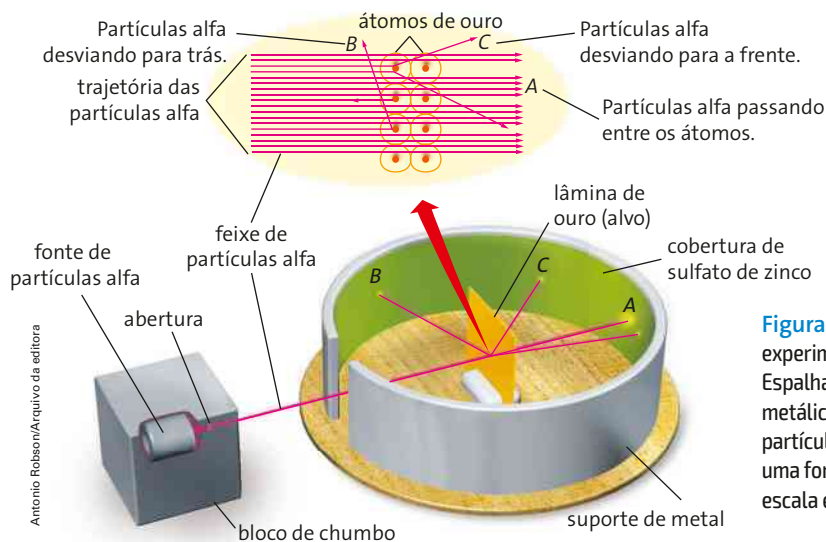
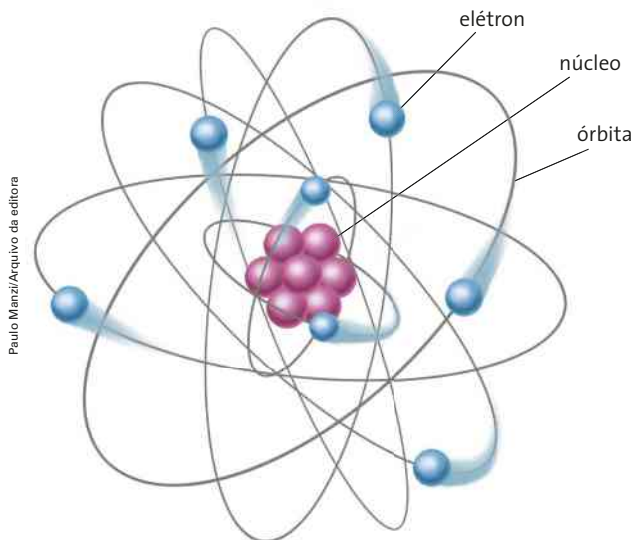


Figura 9.18 Representação do experimento de Rutherford. Espalhamento em uma película metálica e delgada (alvo) de partículas alfa emitidas por uma fonte. Representação sem escala e em cores fantasia.



Paulo Manz/Arquivo da editora

Figura 9.19 Modelo do átomo de Rutherford. Representação sem escala e em cores fantasia.

Os resultados desse experimento apontaram para um modelo no qual o átomo é formado por uma região central muito pequena, denominada **núcleo**. Neste se concentra toda a carga positiva do átomo e a maior parte de sua massa. Em torno do núcleo há uma nuvem de elétrons em órbita cujos diâmetros são da ordem de 10^{-10} m.

Esse modelo de Rutherford, que descartou a ideia do pudim de passas de Thomson, foi denominado **modelo planetário do átomo**, em razão de sua semelhança com o Sistema Solar: um núcleo denso (Sol) circundado pelos elétrons (planetas) e com grandes espaços vazios (**figura 9.19**).

O modelo planetário de Rutherford não resistiu a alguns questionamentos. Dois aspectos, em especial, encontravam contradições com a Física clássica.

O primeiro deles estava relacionado ao fato de os elétrons girarem em torno do núcleo e, portanto, estarem acelerados. Como os elétrons já se constituem em cargas elétricas aceleradas, devendo irradiar energia continuamente na forma de ondas eletromagnéticas, ao girarem ao redor do núcleo seriam absorvidos por ele. Os cálculos mais otimistas demonstravam que, com isso, o átomo entraria em colapso em menos de um milionésimo de segundo. No entanto, isso não ocorria.

O segundo aspecto estava relacionado ao raio da órbita do elétron. Variando esse raio, seria possível obter uma infinidade de frequências. No entanto, os experimentos realizados exaustivamente com o átomo de hidrogênio apresentavam um espectro de emissão com somente algumas linhas bem definidas.

Em 1912, Niels Bohr transferiu-se para Manchester, na Inglaterra, e iniciou um trabalho com Rutherford sobre a hipótese quântica na descrição do átomo. Em 1913, Bohr, que simbolizou uma época e é considerado por muitos como o “arquiteto da Mecânica quântica”, aplicou a quantização de energia ao átomo e, com isso, revelou uma nova visão do interior da matéria. Essa nova visão permitiu o esclarecimento das propriedades dos átomos. Bohr recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1922 pela investigação da estrutura do átomo e da radiação emitida por ele.

28. Hoje, o átomo perdeu o *status* de partícula indivisível devido às descobertas do elétron, do próton e do nêutron, que são os constituintes básicos do átomo e, também, pelo conhecimento das reações, tanto as atômicas quanto as nucleares.



Exercícios

- 28.** A palavra “átomo” significa ‘o que não pode ser dividido’. Explique por que nos dias atuais essa visão de indivisível não é mais correta.
- 29.** Faça uma comparação entre os modelos atômicos propostos por Joseph John Thomson e Ernest Rutherford e responda: o que eles têm em comum? Quais as diferenças entre eles? [Veja resposta no Manual do Professor.](#)
- 30.** Em 1909, o físico norte-americano Robert A. Millikan (1868-1953), Prêmio Nobel de Física de 1923, idealizou um experimento e determinou o valor numérico de uma unidade de carga elétrica. Faça uma pesquisa sobre esse experimento. [Veja comentário no Manual do Professor.](#)

9 Bohr e o átomo de hidrogênio

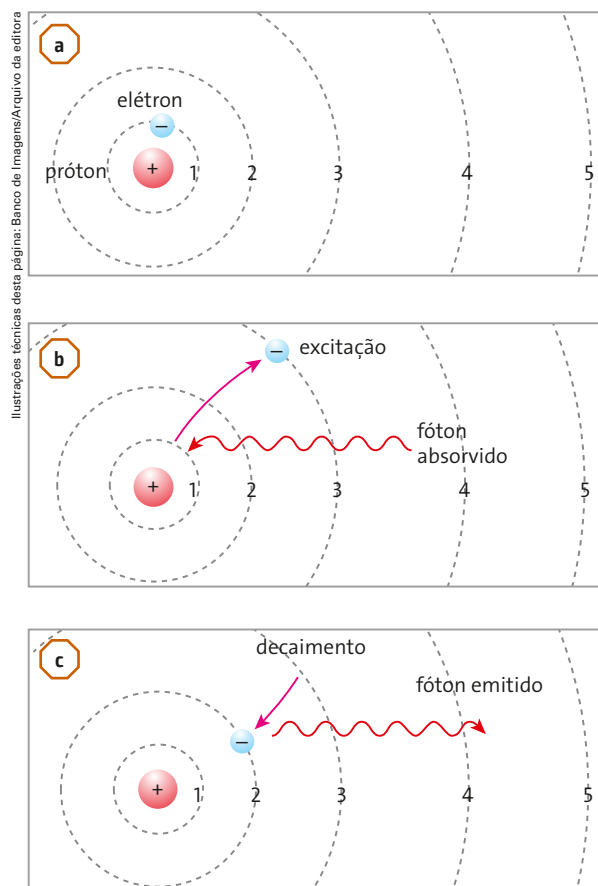
É importante observar que Niels Bohr não descartou o modelo planetário do átomo com os elétrons girando em torno de um núcleo carregado positivamente, estabelecido por Rutherford. No seu trabalho, para explicar a pseudoinstabilidade do átomo, Bohr aplicou a quantização de energia. De acordo com a teoria de Bohr:

- o elétron pode ocupar determinadas órbitas circulares sem irradiar energia; essas órbitas correspondem a situações estáveis, chamadas de estados estacionários;
- todas as órbitas estacionárias possíveis são tais que o momento angular do elétron é um múltiplo de um valor fundamental;
- quando o elétron muda de um estado estacionário para outro, de energia diferente, há em correspondência a emissão (ou absorção) de um fóton, cuja frequência é obtida pela expressão:

$$f = \frac{E_{\text{inicial}} - E_{\text{final}}}{h}$$

Nessa expressão, h é a constante de Planck.

- o fóton é emitido quando a energia inicial (E_{inicial}) é maior do que a energia final (E_{final}); em caso contrário, ele é absorvido. Essa hipótese explica tanto o espectro de **emissão** quanto o de **absorção**, pois ambos são descontínuos (figura 9.20).



Níveis de energia do átomo de hidrogênio

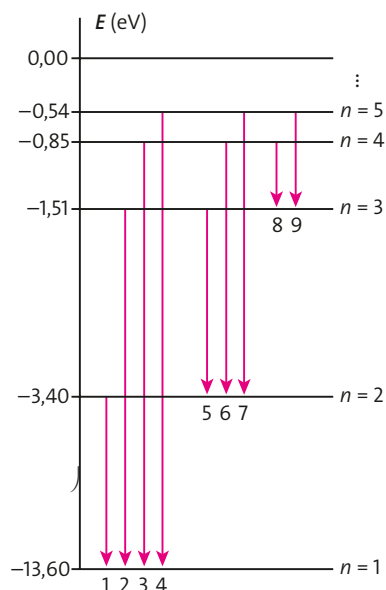


Figura 9.20 Representação (sem escala e em cores fantasia) da transição entre os níveis de energia no átomo de hidrogênio, e suas energias (medidas em eV).

No modelo clássico do átomo de hidrogênio, um único elétron gira em órbita circular em torno de um único próton localizado no núcleo. O modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio permite mostrar que a energia (E_n) referente ao nível energético (n) é dada por:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}$$

Nessa expressão, a energia E_n é calculada em elétrons-volt (eV) e n , denominado **número quântico principal**, pode assumir valores inteiros: 1, 2, 3, ...

Para o estado fundamental, o número quântico principal é $n = 1$. Nesse caso, obtemos, de acordo com a expressão acima, $E_1 = -13,6$ eV. Observe que, quando n tende para o infinito, o átomo de hidrogênio está ionizado, o que significa dizer que a energia de ligação do elétron com o núcleo é zero: $E' = 0$.

A **figura 9.21** mostra os valores da energia para o estado fundamental ($n = 1$) e para os estados $n = 2, 3, 4$.

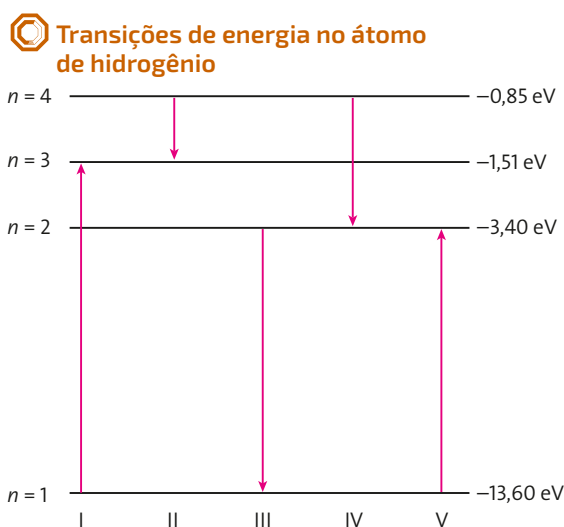
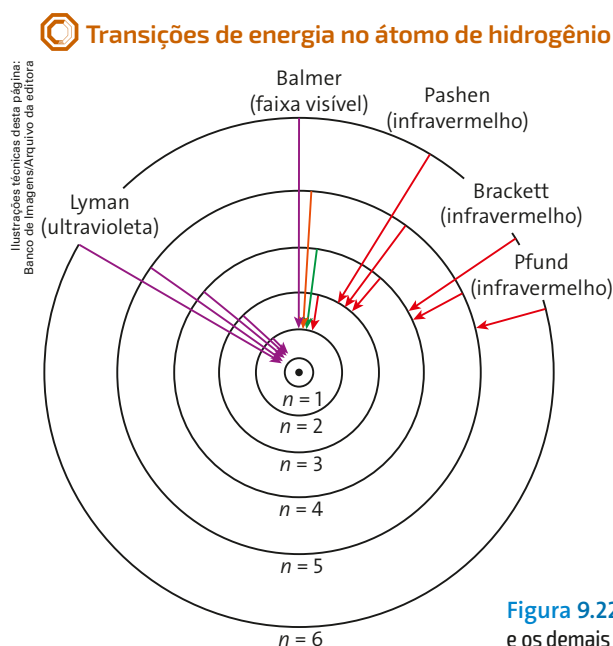


Figura 9.21 Valores em eV, desde $n = 1$ até $n = 4$.



Quando o elétron muda de órbita, por absorção ou emissão de um fóton, a energia referente a essa transição é expressa por:

$$\Delta E_{1,2} = -13,6 \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Nessa expressão, n_1 e n_2 referem-se a dois níveis genéricos quaisquer. Se $n_2 > n_1$, obtemos $\Delta E_{1,2} < 0$. Isso corresponde à absorção de energia pelo átomo. Em caso contrário, temos a emissão de energia. Em qualquer caso, a energia é dada por:

$$\Delta E = h \cdot f$$

A **figura 9.22** mostra as possíveis transições do elétron quando há mudança em seu nível de energia, desde $n = 1$ até $n = 6$.

Figura 9.22 Transições para o estado fundamental ($n = 1$) e os demais estados ($n = 2, 3, 4, 5, 6$).

Cada família de transição é uma série. A série de Balmer, por exemplo, representa transições cujas frequências estão na região visível do espectro eletromagnético. As demais séries mostradas na figura representam transições cujas frequências estão na faixa do ultravioleta (série de Lyman) e do infravermelho (séries de Paschen, Brackett e Pfund).

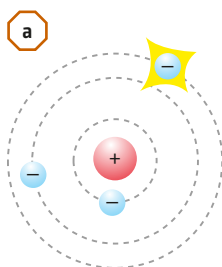
Em 1926, o físico austríaco Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961) publicou alguns artigos nos quais desenvolveu as bases da Mecânica ondulatória. No primeiro deles, ele introduziu a função de onda que aplicou ao caso do átomo de hidrogênio, aperfeiçoando o modelo de Bohr. Com isso, deixou de lado as órbitas para introduzir o conceito de **orbital**, região de máxima probabilidade para a localização dos elétrons. Para Schrödinger, o elétron não gira em torno do núcleo como os planetas em torno do Sol, mas deve ser pensado como uma onda que se curva em volta de todo o núcleo.

Em 1933, Schrödinger e Paul A. M. Dirac (1902-1984) receberam o Prêmio Nobel de Física por suas contribuições à teoria (Mecânica) quântica.

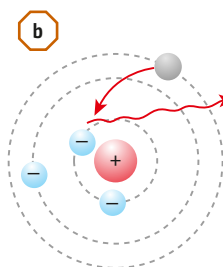


Exercícios

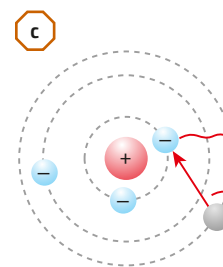
31. De acordo com a teoria de Bohr, explique por que nos átomos os elétrons não perdem energia continuamente e terminam absorvidos pelo núcleo. [Veja resposta no Manual do Professor.](#)
32. Na figura seguinte, temos a representação (sem escala e em cores fantasia) de um átomo, no qual um dos elétrons está, inicialmente, em um estado excitado (figura a). A seguir, as figuras b e c mostram duas possibilidades para o elétron voltar ao estado estacionário: em um único salto (figura b), com a emissão de um único fóton; em duas etapas (figura c), com a emissão de dois fótons.



antes do salto quântico

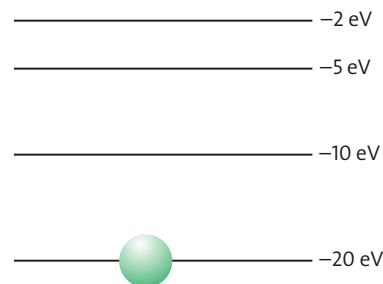


salto quântico diretamente para o estado fundamental



salto quântico para o estado fundamental em duas etapas

- a) As energias dos fótons emitidos em duas etapas (figura c) podem ser diferentes ou elas devem ser exatamente iguais? [Podem ser diferentes.](#)
- b) O que podemos dizer da soma das energias dos fótons emitidos em duas etapas quando comparada com a energia do fóton emitido em um único salto (figura b)?
[A soma das energias dos fótons emitidos em duas etapas é igual à energia do fóton emitido em um único salto.](#)
33. O diagrama de níveis de energia para um elemento hipotético X está mostrado na figura ao lado.
- A energia é zero quando a distância entre o elétron e o núcleo é infinita.
- a) Qual é a energia necessária, em eV, para ionizar o elétron a partir do nível fundamental? $E = 20 \text{ eV}$
- b) Suponha que um fóton de 18 eV seja absorvido por um átomo do elemento X em seu nível fundamental. Quando o átomo retornar ao nível fundamental, quais são as energias possíveis para os fótons emitidos?



Energias possíveis: 3 eV; 5 eV; 8 eV; 10 eV; 15 eV; 18 eV.



A dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza

Quando afirmamos que a luz é uma radiação eletromagnética, imediatamente associamos a luz a uma **onda** que se propaga tanto no vácuo como nos meios materiais. Nesse caso, falamos de um fenômeno puramente ondulatório no qual a energia é distribuída continuamente. É o caso de uma onda se propagando ao

longo de uma corda, ao longo de uma superfície, ou mesmo ao longo de determinada região do espaço tridimensional.

As experiências sobre interferência, realizadas por Thomas Young (1773-1829) em 1801, e as experiências com difração demonstraram o **caráter ondulatório da luz**, ou seja, a luz se comporta como uma onda (figura 9.23).

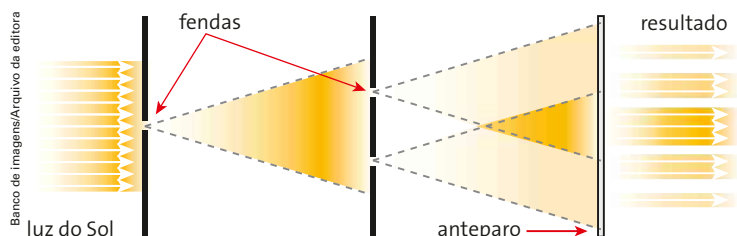


Figura 9.23 Representação esquemática do experimento de Young sobre difração da luz.

Mas o que dizer da absorção e emissão de fótons que vimos no efeito fotoelétrico e na explicação da estrutura atômica? Como a energia é quantizada, em muitas interações da radiação com as partículas elementares, observamos o comportamento corpuscular da luz, ou seja, a energia não está distribuída, mas concentrada em pacotes de energia: os **fótons**.

Experiências como o efeito fotoelétrico e o efeito Compton, esta idealizada pelo físico estadunidense Arthur H. Compton (1892-1962) em 1923 e que lhe proporcionou o Prêmio Nobel de Física em 1927, demonstraram que a luz pode também se comportar como partícula. Aqui, temos o **caráter corpuscular da luz**.

Mas, afinal, a luz é uma onda ou uma partícula? Em determinados fenômenos, a luz se comporta como uma onda. Em outros fenômenos, seu comportamento é de partícula. Esse comportamento da luz, ora onda ora partícula, foi denominado **dualidade onda-partícula**.

Dependendo do experimento, a matéria pode apresentar comportamento corpuscular ou ondulatório. Segundo o **princípio da complementaridade de Bohr**, esses comportamentos não podem ser observados simultaneamente; eles são complementares.

A teoria quântica colocou em xeque a precisão rigorosa e o determinismo que caracterizam a Física clássica de Newton: se você conhecer as forças que agem em uma partícula e as condições iniciais às quais ela está submetida, poderá prever, com certeza, as condições em que ela se encontrará em qualquer instante posterior.

Para a teoria quântica, a incerteza é algo inerente às próprias condições iniciais. Se quisermos medir a localização e a velocidade de uma partícula, devemos nos contentar com probabilidades. Em 1927, o físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976), Prêmio Nobel de Física em 1932, estabeleceu o **princípio da incerteza**, o qual afirma ser impossível medir com precisão, no mesmo instante, a posição e a velocidade de uma partícula.

Suponha que um físico deseja medir a posição e a velocidade de um elétron em movimento. Se ele projetar um experimento para medir, com grande precisão, a posição do elétron, verificará que não poderá medir com a mesma precisão, simultaneamente, a velocidade desse elétron.

De modo semelhante, se ele projetar outro experimento para medir com precisão a velocidade do elétron, não conseguirá medir, com a mesma precisão, simultaneamente, a posição desse elétron.

O princípio da incerteza somente é levado em conta quando se trata de fenômenos quânticos. Assim, no mundo quântico, um elétron **não** pode ser tratado como uma bolinha. Segundo as palavras do físico estadunidense Richard P. Feynmann (1918-1988):

Pense em termos de ondas de matéria. Abandone a ideia de o elétron ser uma pequenina esfera. Quando quiser pensar em elétrons, faça-o estatisticamente, guiado pela densidade de probabilidade associada à onda de matéria.

O princípio da incerteza de Heisenberg e o princípio da complementaridade de Bohr, que ficaram conhecidos como a interpretação de Copenhague, causaram incômodo a muitos físicos da época, entre eles Albert Einstein e Erwin Schrödinger. Em 1935, o paradoxo EPR (Einstein-Podolsky-Rosen), estabelecido por Einstein e seus assistentes Podolsky e Rosen, propôs que o princípio da incerteza traz uma contradição na afirmação de que, no mundo quântico, duas partículas poderiam se comunicar de forma instantânea, independentemente de suas posições. Além disso, contraria um dos princípios da relatividade restrita que estabelece que a informação não pode ser transmitida mais rapidamente que a velocidade da luz.

Também em 1935, o experimento conhecido como “o gato de Schrödinger”, proposto por Erwin Schrödinger, procurou mostrar que a teoria quântica é limitada ao mundo do infinitamente pequeno e que, sob o ponto de vista da quântica, um gato colocado em uma caixa poderia estar vivo e morto, ao mesmo tempo.



Exercícios

34. Analise as afirmativas seguintes e indique se estão certas ou erradas.

- I. A dualidade onda-partícula significa que pode existir determinado fenômeno no qual a luz se comporta, simultaneamente, como onda e como partícula. **Errada.**
- II. O princípio da incerteza é relevante quando pretendemos determinar a posição e a quantidade de movimento linear de uma partícula como o elétron, mas não é relevante se a partícula for uma bola de tênis. **Certa.**

35. Leia o texto seguinte.

[...] Se desejarmos observar um elétron e determinar seu paradeiro por meio de luz, o comprimento de onda da radiação luminosa teria que ser muito pequeno. Nós caímos, então, em um dilema. Com um comprimento de onda mais curto nós podemos “enxergar” melhor o minúsculo elétron, mas tal comprimento de onda corresponde a uma grande quantidade de energia, que produz uma alteração maior no estado de movimento do elétron. Se, por outro lado, usamos um comprimento de onda mais longo, que corresponde a uma menor quantidade de energia, é menor a alteração induzida no estado de movimento eletrônico, mas será menos precisa a determinação de sua posição através dessa radiação mais “grosseira”.

HEWITT, Paul G. *Física conceitual*. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. p. 537.

De acordo com o texto, analise as alternativas a seguir e indique a correta.

- a) Não é possível observar um elétron utilizando-se uma radiação luminosa.
- ☒ b) O ato de observar algo tão minúsculo quanto um elétron produz uma considerável incerteza sobre sua posição ou sobre sua quantidade de movimento linear.
- c) Quando a radiação luminosa utilizada na observação de um elétron possui um grande comprimento de onda, obtém-se grande precisão na determinação da posição desse elétron.
- d) O texto se refere ao princípio da incerteza de Heisenberg e destaca que não podemos afirmar, com certeza, que o elétron existe.



Albert Einstein

Albert Einstein nasceu em 14 de março de 1879 em Ulm, na Alemanha, e faleceu em 18 de abril de 1955, no Hospital Princeton, nos Estados Unidos.

No período de 1885 a 1894, Einstein realizou seus estudos primário e secundário em Munique, na Alemanha. Sem concluir o ensino secundário, tentou ingressar no Instituto Politécnico de Zurique, na Suíça, sem sucesso. Após frequentar uma escola suíça em Aarau, foi aprovado no Instituto Politécnico em 1896, ano em que renunciou à cidadania alemã. Ele sempre se destacou como aluno, mas, para muitos professores, apresentava um grande defeito: só estudava o que lhe interessava.

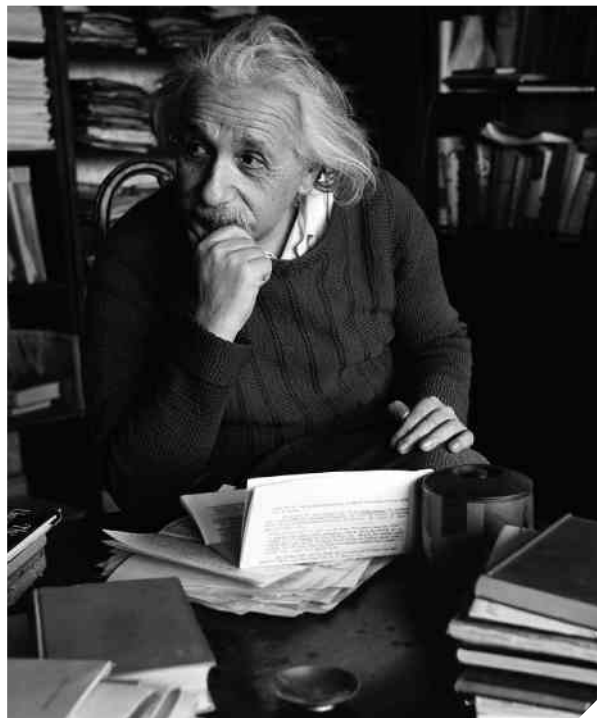
Em 1900, Einstein formou-se na Escola Politécnica. Em seguida, trabalhou como professor substituto numa escola técnica. Em 1902, iniciou seu trabalho como "perito técnico de terceira classe" do Departamento de Patentes da Suíça, em Berna. Esse emprego deu a Einstein a tranquilidade de que ele precisava para se manter em dia com os avanços das ciências, em particular da Física.

Influenciado principalmente pelos trabalhos de Faraday, Maxwell, Hertz e Lorentz, Einstein pôde se dedicar com afinco à questão que o preocupava desde a adolescência: "O que verei se correr atrás de um feixe de luz na velocidade da luz?".

O ano de 1905 é considerado o "ano miraculoso de Einstein", pois, nesse único ano, ele provocou uma verdadeira revolução na Física. Após concluir a tese de doutorado – *Uma nova determinação das dimensões moleculares* –, com a publicação do artigo "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento", ele mostrou ao mundo uma nova maneira de pensar o espaço e o tempo, dando origem ao que passaria a ser conhecido como a "teoria da relatividade restrita (especial)". Segundo nos relata o físico brasileiro Marcelo Gleiser, em outro artigo Einstein desenvolveu a teoria sobre o movimento browniano: "a existência de um mundo invisível repleto de moléculas e átomos em colisão constante, conforme confirmado pelo físico francês Jean Perrin (1870-1942) em 1908". Em um terceiro artigo, que viria a coroar seu trabalho com o Prêmio Nobel de Física de 1921, Einstein explicou o efeito fotoelétrico: a interação da luz com a matéria.

Em 1909, Einstein deixou o emprego no Departamento de Patentes e se tornou professor de Física teórica na Universidade de Zurique, de onde saiu em 1911 e assumiu o cargo de diretor do Instituto de Física Teórica da Universidade Alemã de Praga. No ano seguinte, retornou a Zurique, onde assumiu o cargo de professor do Instituto Politécnico. Em 1913, foi eleito para a Academia Prussiana de Ciências.

Em 1915, Einstein completou o trabalho iniciado em 1905 sobre a relatividade e, no ano seguinte, publicou suas conclusões sobre a "teoria da relatividade geral". Conforme nos relata o físico brasileiro Nelson Studart, da Universidade Federal de São Carlos (São Paulo), em seu artigo "Einstein: uma breve cronologia": "em 29 de maio de 1919, durante o eclipse solar, em Sobral e na ilha Príncipe, expedições britânicas confirmam a deflexão da luz pelo Sol conforme previsto pela teoria da relatividade geral. Em 6 de novembro, os resultados são apresentados por Arthur Eddington na reunião conjunta da Royal Society e Royal Astronomical Society. A notícia corre o mundo e Einstein torna-se uma figura pública".



Popperfoto/Getty Images

Retrato de Albert Einstein.



Em 1917, Einstein publicou dois importantes artigos. O primeiro deles referente à emissão estimulada de luz que serviria de base para a construção do *laser* e o segundo sobre a estrutura do Universo, base da cosmologia moderna.

Einstein proferiu palestras praticamente em todos os centros de ciências e, em 1925, visitou Brasil, Argentina e Uruguai. Em vida, recebeu diversas honrarias, como a Medalha de ouro da Royal Astronomical Society da Grã-Bretanha e a Medalha Planck, além de títulos honoríficos. Abraçou a causa do desarmamento mundial e envolveu-se com questões políticas.

Em 1939, Einstein assinou a carta ao presidente dos Estados Unidos Franklin Delano Roosevelt (1882-1945), redigida pelo físico húngaro Leo Szilard (1898-1964), sobre as implicações militares da energia nuclear.

Juntamente com o físico polonês Leopold Infeld (1898-1968), Einstein publicou em 1938 o livro *A evolução da Física*, que se tornou mundialmente conhecido.

Após tornar-se cidadão estadunidense em 1940, Einstein viveu nos Estados Unidos até sua morte. Praticamente em toda a sua vida, dedicou-se integralmente às causas pacifistas, tendo erguido sua voz contra o nazismo, o racismo e todas as formas de intolerância.

Fontes dos dados: BRENNAN, R. *Gigantes da Física*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998; EINSTEIN está vivo. *Folha de S. Paulo*. São Paulo, 5 jun. 2005. Especial 1; STUART, N. Einstein: uma breve cronologia. *Física na escola*, v. 6, n. 1, 2005.

Trabalho em equipe

Leiam o livro *Nas fronteiras da intolerância: Einstein, Hitler, a bomba e o FBI* (São Paulo: A Girafa, 2007), de Ronaldo R. de Freitas Mourão, que fala da intolerância que marcou a vida de Albert Einstein, bem como de sua capacidade de se contrapor a esse desígnio ao se afirmar como cientista brilhante, pacifista destemido, defensor intransigente das liberdades individuais, nunca abandonando suas convicções.

Após a leitura, discutam os rumos que a humanidade poderia tomar se, por exemplo, vários países construíssem bombas atômicas.

Retomando



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

- 36.** (UFRN) No final do século XIX, vários pesquisadores perceberam que a luz era capaz de ejetar elétrons quando incidia em superfícies metálicas. Esse fenômeno, que ocorre sob certas condições, foi chamado de efeito fotoelétrico.

A **figura 1.a** mostra luz policromática de intensidade I_0 , cujos fótons possuem energia entre 2,0 eV e 6,0 eV, incidindo sobre uma superfície metálica. Observa-se que, dessa superfície, são ejetados elétrons com energia cinética máxima, $E_{c(máx.)}$.

A **figura 1.b** mostra, também, luz policromática de intensidade $2 \cdot I_0$, cujos fótons possuem ener-

gia entre 2,0 eV e 6,0 eV, incidindo sobre a mesma superfície metálica. Observa-se, ainda, que também são ejetados elétrons com energia cinética máxima, $E_{c(máx.)}$. A **figura 2.a**, por sua vez, mostra luz monocromática de intensidade I_0 , cujos fótons possuem energia de 3,0 eV, incidindo sobre a mesma superfície metálica. Nesse caso, não se observam elétrons ejetados da superfície. Por outro lado, a **figura 2.b** mostra luz monocromática de intensidade I_0 , cujos fótons possuem energia de 6,0 eV, incidindo sobre a mesma superfície metálica. Nesse caso, observam-se elétrons sendo ejetados da superfície.



36. a) A energia cinética máxima $E_{c(\text{máx.})}$ que o elétron ejetado (fotoelétron) pode ter é dada por: $E_{c(\text{máx.})} = E - W$, onde E é a energia do fóton incidente e W é a função trabalho do material da placa metálica, que depende do tipo de metal utilizado. Assim, a energia cinética máxima não depende da intensidade da luz policromática incidente.

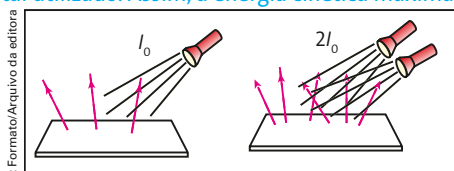


figura 1.a

figura 1.b

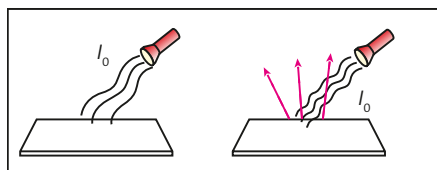


figura 2.a

figura 2.b

Com base na teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico:

- explique por que a energia cinética máxima dos elétrons, $E_{c(\text{máx.})}$, independe da intensidade da luz policromática incidente;
- explique por que, para essa superfície metálica, o efeito fotoelétrico ocorre apenas quando incide luz cujos fótons possuem energia de 6,0 eV.

37. (UEMS) Indique a alternativa falsa:

- As leis da Física clássica (ou newtoniana) se aplicam ao movimento de corpos mensuráveis ("grandes") e com pequenas velocidades.
- A física moderna surgiu no final do século XIX e início do século XX, principalmente com os trabalhos de Max Planck e Albert Einstein, que explicavam fenômenos que não podiam ser entendidos com as leis da Física clássica.
- A teoria da relatividade descreve com maior precisão o movimento de corpos em altas velocidades, próximos à velocidade da luz.
- ☒ Fazendo uma aproximação para velocidades pequenas na teoria da relatividade não é possível retornar às leis da Física clássica.
- Parar explicar o efeito fotoelétrico, Albert Einstein utilizou o conceito de quantização da energia luminosa ("quantum de luz") apresentada por Max Planck.

38. (UFRN) Raios cósmicos são partículas que bombardeiam continuamente a Terra. Eles são compostos, principalmente, de partículas alfa, prótons e neutrinos.

Um neutrino vindo do espaço se desloca em relação à Terra com velocidade da luz igual a c .

Para um foguete que se desloca com velocidade v em relação à Terra, em direção ao neutrino, esta partícula terá velocidade igual a:

- $v - c$.
- $v + c$.
- ☒ c .
- v .

39. (UFT-TO) Em um átomo, o primeiro nível, ocupado por um elétron, tem energia $E_1 = -2,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ e o segundo, desocupado, tem energia $E_2 = -1,3 \times 10^{-19} \text{ J}$. Ao ser iluminado com a luz monocromática, de determinada frequência, esse átomo absorve um fóton e, com isso, o elétron passa do primeiro nível para o segundo. Sabe-se que o valor da constante de Planck é de $6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s}$.

Considerando-se essas informações, é correto afirmar que, na situação descrita, a frequência da luz incidente no átomo é de, aproximadamente:

- $1 \times 10^{14} \text{ Hz}$.
- ☒ $2 \times 10^{14} \text{ Hz}$.
- $3 \times 10^{14} \text{ Hz}$.
- $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

40. (Unicamp-SP) Com um pouco de capacidade de interpretação do enunciado, é possível entender um problema de Física moderna, como o exposto abaixo com base nos conhecimentos de Ensino Médio.

O positrônio é um átomo formado por um elétron e sua antipartícula, o pósitron, que possui carga oposta e massa igual à do elétron. Ele é semelhante ao átomo de Hidrogênio, que possui um elétron e um próton. A energia do nível fundamental desses átomos é dada

$$\text{por } E_1 = \frac{-13,6}{1 + \frac{m_e}{m_p}} \text{ eV, onde } m_e \text{ é a massa do elétron}$$

e m_p é a massa do pósitron, no caso do positrônio, ou a massa do próton, no caso do átomo de Hidrogênio. Para o átomo de Hidrogênio, como a massa do próton é muito maior que a massa do elétron, $E_1 = -13,6 \text{ eV}$.

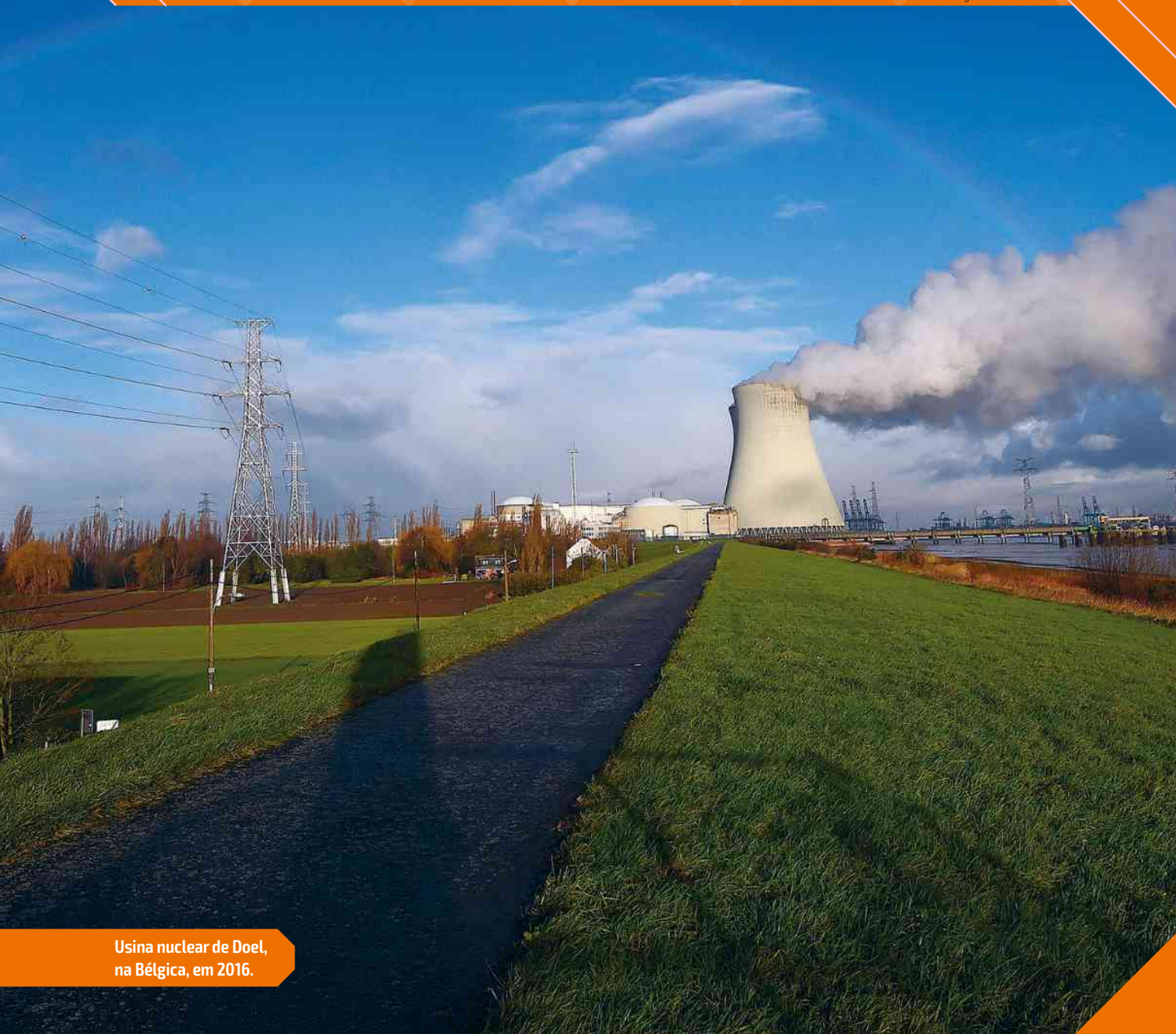
- Calcule a energia do nível fundamental do positrônio. $E_0 = -6,8 \text{ eV}$
- Ao contrário do átomo de Hidrogênio, o positrônio é muito instável, pois o elétron pode se aniquilar rapidamente com a sua antipartícula, produzindo fótons de alta energia, chamados raios gama. Considerando que as massas do elétron e do pósitron são $m_e = m_p = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$, e que, ao se aniquilarem, toda a sua energia, dada pela relação de Einstein $E_p + E_e = m_e c^2 + m_p c^2$, é convertida na energia de dois fótons gama, calcule a energia de cada fóton produzido. A velocidade da luz é $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$. $E_f = 8,1 \cdot 10^{-14} \text{ J}$

36. b) Cada elétron necessita receber uma quantidade mínima de energia para ser arrancado. Se a energia do fóton não superar essa quantidade mínima, o elétron não é arrancado e o efeito fotoelétrico não acontece. No experimento mostrado na questão, isso só acontece com fótons que possuem energia mínima de 6,0 eV.

○ Física nuclear

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

Emmanuel Dunand/Agência France-Press



Usina nuclear de Doel, na Bélgica, em 2016.

A construção de usinas nucleares com o objetivo de produzir energia elétrica tem gerado, em todo o mundo, protestos e ações judiciais. Você considera viável, em seus vários aspectos, a construção de usinas nucleares?

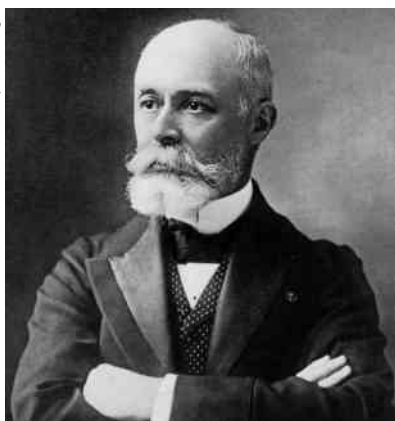


Figura 10.1 Retrato de Antoine Henri Becquerel (1852-1908).

Nuclídeo – Denominação do núcleo de um átomo (formado por prótons e nêutrons – núcleons) que tenha existência longa o suficiente para a sua identificação.

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

1 Radioatividade

Ao observar que o urânio impressionava uma chapa fotográfica, o físico francês Antoine Henri Becquerel (**figura 10.1**) iniciou uma revolução no conhecimento científico, abrindo caminho para a área da Física nuclear. Essa descoberta colaborou para a hipótese de que os átomos não eram os últimos constituintes da matéria. Ele identificou três partes de radiações diferentes nos chamados “raios urânicos”, denominados, atualmente, de radiação α (núcleo do átomo de hélio), radiação β (elétrons altamente energéticos) e radiação γ (de natureza eletromagnética) (**figura 10.2**).

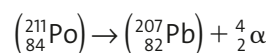
Incentivados por Becquerel, em 1898 o casal Marie Curie e Pierre Curie verificaram esse mesmo fenômeno em minério de pechblenda. Após vários anos de trabalho, eles isolaram dois novos elementos, o rádio e o polônio, que também emitiam radiação.

Mas por que ocorre a emissão de radiação?

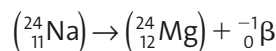
A maioria dos elementos químicos é considerada estável. No entanto, alguns têm a propriedade de se decompor, emitindo radiação espontaneamente e, na maioria dos casos, transformando-se em outros elementos ou reduzindo sua massa atômica. Essa propriedade é a radioatividade e esses elementos são chamados de **radioativos**. Todos os elementos com número atômico maior que 82 são radioativos. A mudança na composição de um **nuclídeo** é chamada de **reação nuclear**.

Quando o núcleo do átomo de um determinado elemento radioativo emite uma partícula alfa (2 prótons e 2 nêutrons), representada por ${}^4_2\alpha$, o número atômico do átomo (Z) reduz 2 unidades e o número de massa (A) reduz 4 unidades. Como há alteração no número atômico, o resultado é um átomo diferente do original.

Como exemplo, podemos citar o polônio-211 (${}^{211}_{84}\text{Po}$). Ao emitir uma partícula α , o polônio-211 transforma-se em outro elemento: o chumbo-207 (${}^{207}_{82}\text{Pb}$). Essa reação nuclear é representada por:



Quando o núcleo do átomo de um determinado elemento emite uma partícula β (elêtron), representada por ${}^0_{-1}\beta$, o número atômico do átomo aumenta 1 unidade e o número de massa não se altera (a massa do elêtron é desprezível quando comparada à do próton ou do nêutron). Como há alteração no número atômico, o resultado é um novo elemento, diferente do original. Como exemplo, podemos citar o sódio-24 (${}^{24}_{11}\text{Na}$), que, ao emitir um elêtron, transforma-se no magnésio-24 (${}^{24}_{12}\text{Mg}$). A reação nuclear correspondente é:



A emissão γ é uma radiação eletromagnética emitida pelo núcleo em razão de um estado de alta energia. Nesta emissão, não há alteração no número atômico nem no número de massa. O resultado é um átomo do mesmo elemento, mas em um estado de energia mais baixa. Normalmente, as emissões alfa e beta são acompanhadas por uma emissão gama.

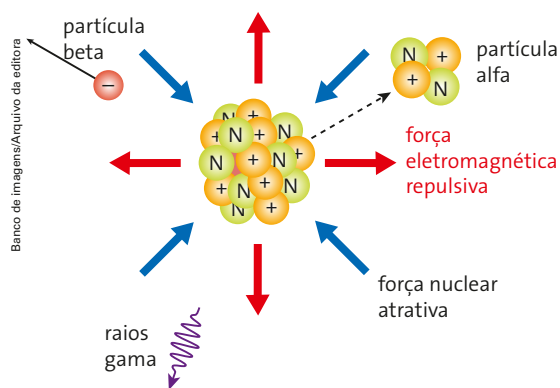
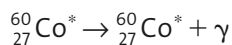


Figura 10.2 Representação, sem escala e em cores fantasia, das radiações α , β e γ .

Como exemplo, temos a reação nuclear de um nuclídeo de cobalto-60 em um estado excitado de energia, representado por ${}^{60}_{27}\text{Co}^*$, que emite uma radiação gama e decai para um estado de energia mais baixa.



Quando um nuclídeo radioativo sofre um decaimento, o resultado pode ser outro nuclídeo radioativo, que, por sua vez, também sofrerá decaimento. Esse processo constitui uma série radioativa que termina quando o nuclídeo resultante for estável.

Na Terra, o nuclídeo radioativo mais abundante é o urânio-238, que sofre uma série de decaimentos, transformando-se em outros elementos até atingir o nuclídeo estável do chumbo-206 (figura 10.3).

Série de decaimentos do urânio-238

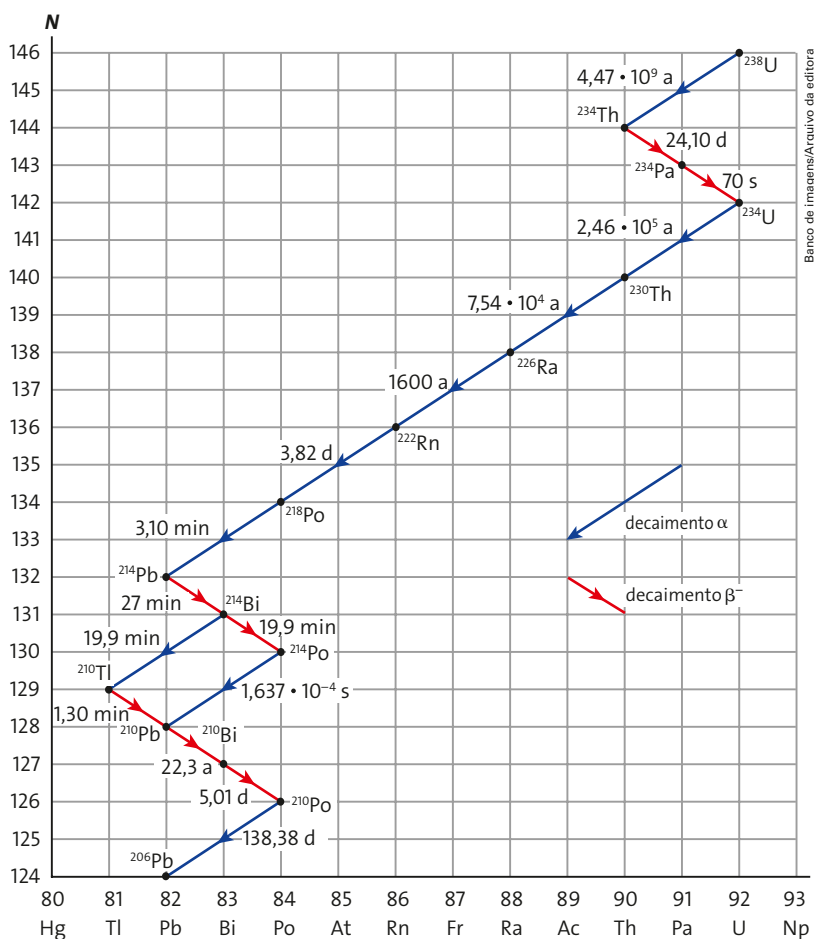


Figura 10.3 Os tempos indicados em anos (a), dias (d), horas (h), minutos (min) ou segundos (s) se referem às meias-vidas.

Fonte: Beiser, Arthur. *Concepts of Modern Physics*. 6. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2003. p. 430.

Além da série do urânio-238, temos na natureza as séries do urânio-235, que termina com o chumbo-207 (estável), e a do tório-232, que termina com o chumbo-208 (estável).

Um mesmo elemento químico pode existir com diferentes números de massa: são os **isótopos** do elemento. Veja, por exemplo, o urânio-235 e o urânio-238. Ambos possuem número atômico igual a 92 (92 prótons), o que caracteriza o elemento urânio. No entanto, o número de massa do primeiro é 235 (92 prótons e 143 nêutrons), enquanto o do segundo é 238 (92 prótons e 146 nêutrons). O urânio encontrado na natureza é uma mistura de isótopos radioativos. Os três principais são: urânio-238 com 99,274%; urânio-235 com 0,720%; e urânio-234 com 0,006%.

Veja resposta no Manual do Professor.

Para refletir

Qual é a diferença entre chumbo-206, chumbo-207 e chumbo-208?

Decaimento radioativo

Como na radioatividade elementos vão se transformando em outros elementos, ou simplesmente decaindo para um estado de energia mais baixa, a quantidade de radioatividade original de uma amostra diminui com o passar do tempo. O intervalo de tempo necessário para que a radioatividade da amostra se reduza à metade, por desintegração, é chamado de **meia-vida física** ($t_{1/2}$).

A meia-vida física do cobalto-60 é 5,27 anos. Isso significa dizer que a cada 5,27 anos, a radioatividade de qualquer amostra de cobalto-60 se reduz à metade. Por exemplo, se hoje temos uma amostra de 100 g de cobalto-60, daqui a 5,27 anos teremos somente 50 g. Mais 5,27 anos e teremos somente 25 g, e assim sucessivamente. A **figura 10.4** mostra a curva de decaimento de uma amostra de césio-137, cuja meia-vida física é 30 anos, inicialmente com massa de 1,0 kg. Esse modelo pode ser utilizado para o decaimento de qualquer material radioativo.

Curva de decaimento radioativo do césio-137

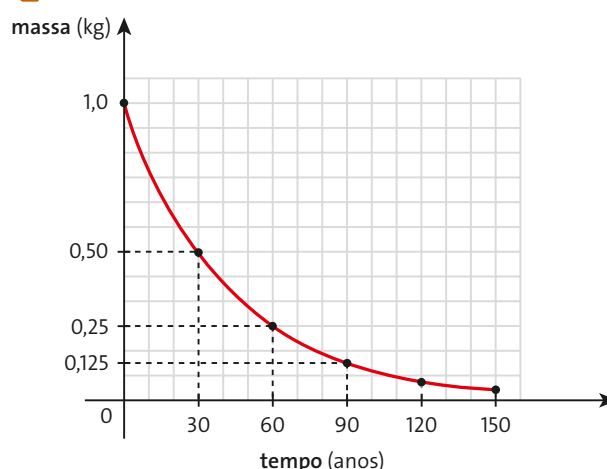


Figura 10.4 A cada 30 anos, a quantidade de césio-137 se reduz à metade.

Fonte: Krane K. S. *Introductory Nuclear Physics*. 2. Ed. Nova Jersey: John Wilwy & Sons, Inc., 1988. Appendix C: Table of Nuclear Properties.

Alguns elementos radioativos possuem meia-vida de milésimos de segundos; outros possuem meia-vida de bilhões de anos. A **tabela 10.1** apresenta a meia-vida e o tipo de radiação emitida por alguns isótopos radioativos.

Tabela 10.1 Meia-vida física de alguns isótopos radioativos e o tipo de emissão

Isótopo	Meia-vida	Tipo de emissão
urânio-238	$4,5 \cdot 10^9$ anos	alfa
rádio-226	1622 anos	alfa
césio-137	30 anos	beta e gama
radônio-220	54 segundos	alfa

Fonte: Krane K. S. *Introductory Nuclear Physics*. 2. Ed. Nova Jersey: John Wilwy & Sons, Inc., 1988. Appendix C: Table of Nuclear Properties.

O decaimento radioativo, ou emissão radioativa, é um processo estatístico, ou seja, não há meios de prever com exatidão qual será o próximo nuclídeo a sofrer desintegração. A probabilidade de decaimento é igual para todos os nuclídeos.

No estudo da radioatividade, além da meia-vida física, há outra grandeza de fundamental importância. É a **atividade (A)** de uma amostra radioativa, que representa o número de desintegrações nucleares por unidade de tempo. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade da atividade é o **becquerel (Bq)**: 1 Bq corresponde a uma desintegração por segundo. Uma outra unidade muito utilizada é o **curie (Ci)**, que corresponde à atividade inicial de 1 g do elemento rádio purificado: $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegrações por segundo. Portanto:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

A atividade (A) é proporcional à quantidade de núcleos radioativos (N). Assim, se a atividade cair à metade, é porque metade dos núcleos radioativos sofreu decaimento. Supondo que, em $t = 0$, a quantidade de núcleos radioativos é N_0 , temos:

- após uma meia-vida física, teremos $\frac{N_0}{2}$ núcleos radioativos;
- após duas meias-vidas, teremos $\frac{N_0}{4}$ núcleos radioativos;
- após três meias-vidas, teremos $\frac{N_0}{8}$ núcleos radioativos, e assim por diante.

Podemos, então, escrever que a quantidade N de núcleos radioativos remanescentes, após n meias-vidas, é:

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

Exercício resolvido

1. Os dados da tabela representam medidas da atividade de uma amostra radioativa de ouro-198, feitas com um detector de radiação, em função do tempo.

Atividade (Ci)	Tempo (dias)
400	0
308	1
240	2
184	3
144	4
112	5
84	6

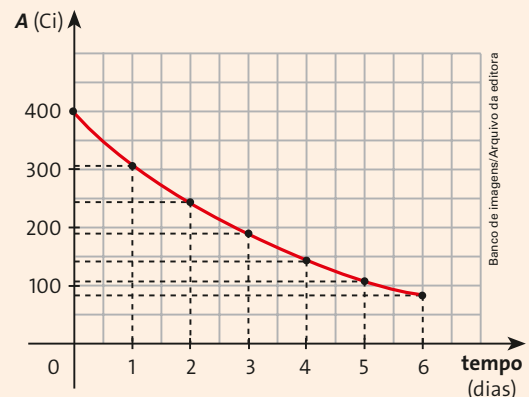
Fonte: Krane K. S. *Introductory Nuclear Physics*. 2. Ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1988. Appendix C: Table of Nuclear Properties.

- Trace o gráfico da atividade (eixo y) em função do tempo (eixo x) de acordo com a tabela.
- Determine a meia-vida física do ouro-198.
- Após quanto tempo a atividade da amostra é 100 Ci?



Resolução:

- a) O gráfico a seguir apresenta a atividade em função do tempo, de acordo com os dados da tabela.



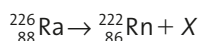
- b) Como a atividade inicial da amostra de ouro-198 é 400 Ci, então o tempo, em dias, para que a atividade dessa amostra se reduza a 200 Ci, é a meia-vida física do ouro-198.

No gráfico, para $A = 200$ Ci, obtemos 2,7 dias. Portanto, a meia-vida física é: $t_{1/2} = 2,7$ dias.

- c) Para a atividade da amostra se reduzir a 100 Ci é necessário um intervalo de tempo igual a duas meias-vidas, ou seja, 5,4 dias.

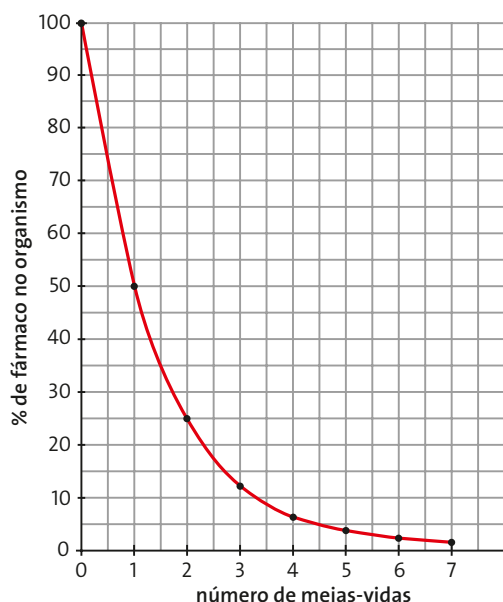
Exercícios

- Se uma partícula β (elêtron) é emitida pelo núcleo de um átomo, podemos afirmar que existem elétrons no núcleo dos átomos? Justifique. **Não.**
- A seguir, apresentamos a reação nuclear de transmutação do rádio-226 em radônio-222, com a emissão de uma radiação X.



A radiação X corresponde a uma partícula alfa, beta ou uma radiação gama? Justifique. **Uma partícula α .**

- O iodo-123, usado na forma de iodeto de sódio, é um isótopo radioativo muito utilizado na Medicina nuclear para mapeamento da tireoide. Sua meia-vida física é de 13 h. Considere uma amostra de 2,0 g desse isótopo. **a) Resposta no Manual do Professor.**
 - Em seu caderno, faça uma tabela da quantidade, em gramas, de iodo radioativo em função do tempo, em horas. Utilize valores do tempo que sejam múltiplos da meia-vida do iodo.
 - De acordo com a tabela obtida no item a, quanto tempo é necessário para que a amostra de iodo-123 seja reduzida a um quarto do seu valor inicial?
 $\Delta t = 26 \text{ h}$
- (Enem) A duração do efeito de alguns fármacos está relacionada à sua meia-vida, tempo necessário para que a quantidade original do fármaco no organismo se reduza à metade. A cada intervalo de tempo correspondente a uma meia-vida, a quantidade de fármaco existente no organismo no final do intervalo é igual a 50% da quantidade no início desse intervalo.

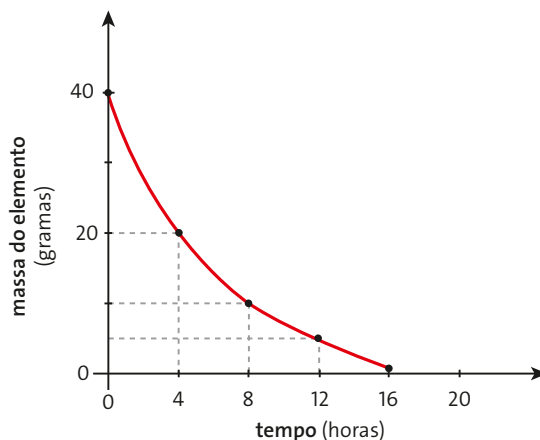


F. D. Fuchs e Cher I. Wannma. *Farmacologia clínica*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992, p. 40.

O gráfico representa, de forma genérica, o que acontece com a quantidade de fármaco no organismo humano ao longo do tempo.

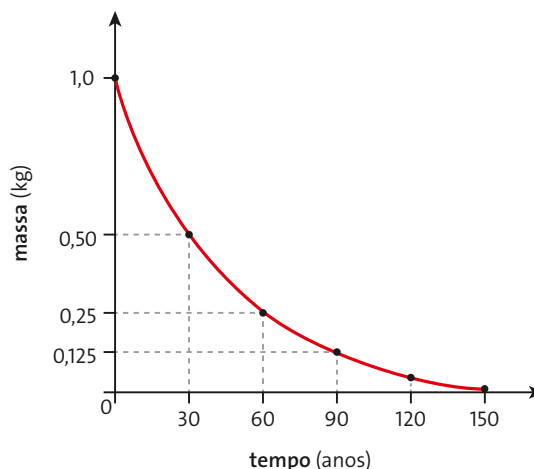
A meia-vida do antibiótico amoxicilina é de 1 hora. Assim, se uma dose desse antibiótico for injetada às 12h00 em um paciente, o percentual dessa dose que restará em seu organismo às 13h30min será aproximadamente de:

- 10%.
 - 15%.
 - 25%.
 - 35%.**
 - 50%.
- A curva de decaimento de um elemento químico radioativo está mostrada no gráfico.



De acordo com o gráfico, qual é a meia-vida física desse elemento? **$t_{1/2} = 4 \text{ h}$**

- A figura a seguir mostra o decaimento do célio-137.



$t_{1/2}$ (célio-137) é de aproximadamente 30 anos.

Calcule o tempo de meia-vida do célio-137 e pesquise as aplicações desse elemento.

2 Radiações: interações e aplicações

As partículas alfa (α) e beta (β), bem como a radiação gama (γ), podem interagir com a matéria. Os efeitos dessas interações dependem, principalmente, da energia das radiações e do meio com o qual elas interagem.

Dentro da escala atômica, as partículas α são consideradas pesadas e, quando se movimentam em um meio, suas trajetórias são praticamente retilíneas. Normalmente, essas partículas provocam ionizações no meio com o qual interagem e apresentam um pequeno poder de penetração, sendo facilmente blindadas. Por exemplo, uma folha de papel é suficiente para blindá-las (**figura 10.5**). Em relação ao tecido humano, sua penetração é de décimos de centímetros, não constituindo riscos para a saúde. No entanto, a ingestão ou a inalação de partículas α podem acarretar sérios problemas à saúde.

As partículas β possuem uma massa extremamente pequena em relação às partículas α . Na interação com um meio, as partículas β apresentam trajetórias curvas e produzem ionizações em número menor do que as partículas α . Contudo, apresentam um poder de penetração muito maior. Na blindagem de partículas β se utiliza plástico ou alumínio (**figura 10.5**). Em relação ao tecido humano, os efeitos das partículas β se limitam à pele. Como as partículas α , quando ingeridas, as partículas β são extremamente perigosas.

A radiação γ é a mais energética do espectro eletromagnético. Tem frequências da ordem de 10^{24} Hz e comprimento de onda da ordem de 10^{-14} m, com um poder muito grande de penetração na matéria. Observe, na **figura 10.5**, que a blindagem da radiação gama é feita com blocos de chumbo. Na interação da radiação γ com os tecidos humanos, o grande perigo está relacionado às modificações que podem ser produzidas nas células. Em contrapartida, os raios gama são muito utilizados no combate ao câncer, pois podem destruir células com má-formação.

As emissões dos núcleos radioativos normalmente têm energia muito superior às das radiações comuns, como as ondas de rádio, luz ou infravermelho; por isso têm alto poder de ionização. Assim, são chamadas de **radiações ionizantes**.

No começo do século XX – primórdios da radioatividade – os riscos das radiações ionizantes não eram conhecidos. Prova desse desconhecimento é que Marie Curie morreu de leucemia, em decorrência da longa exposição a elementos radioativos.

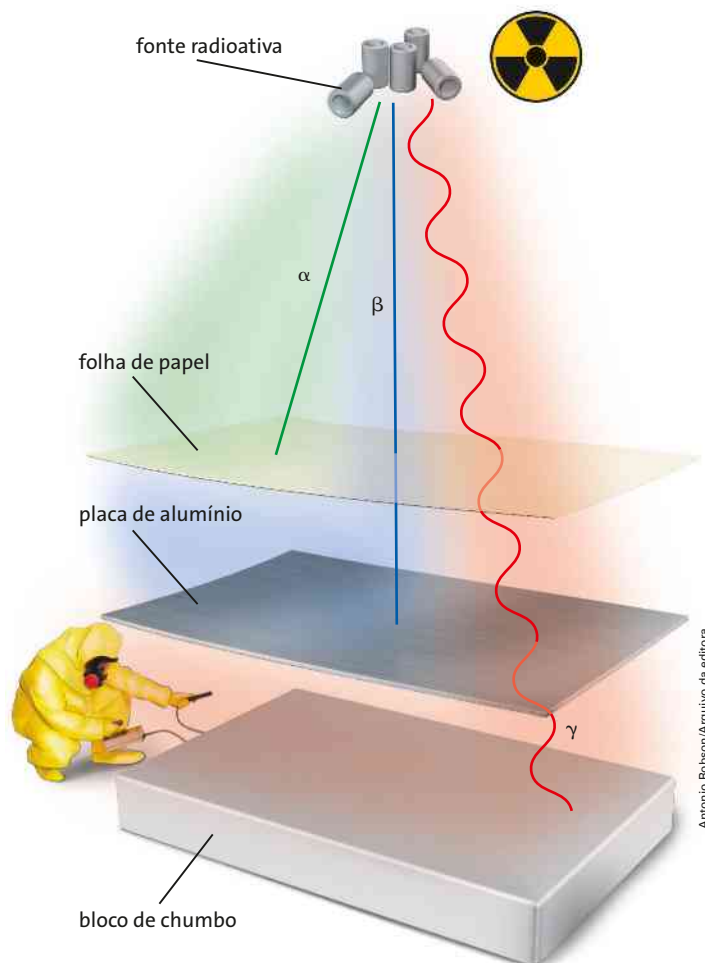


Figura 10.5 Representação (sem escala e em cores fantasia) da blindagem das partículas alfa, beta e gama.



Vivemos em um mundo radioativo

Estamos continuamente expostos às radiações provenientes de fontes naturais, como o cosmo (radiações cósmicas), o solo, os materiais usados em construções e o próprio ar, entre outras. Essas fontes existem desde o início dos tempos e seus níveis de radiação não representam riscos. Existem, também, fontes de radiação que foram desenvolvidas na busca de uma melhor qualidade de vida: as utilizadas em diagnósticos, em terapias, na indústria, nos laboratórios de pesquisas, nos tubos de televisão, nos relógios luminosos, etc. O excesso de exposição a essas fontes é muito prejudicial à saúde humana.

O próprio corpo humano é uma fonte de radiação. Além do carbono-14 (carbono radioativo) que existe em nosso corpo, no consumo alimentar de batata ingerimos certa quantidade de potássio-40, um isótopo radioativo.

Água mineral radioativa

Quem já teve a curiosidade de olhar o rótulo de algumas marcas de água mineral se depa-rou com a inscrição "água fracamente radioativa na fonte". Trata-se de água proveniente de fontes em que ocorre a presença dos elementos radioativos rádio e radônio. O Departamento de Radiometria Ambiental do Ipen [Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares] desenvolveu pesquisas para determinar o nível de radioatividade natural presente em águas de abastecimento público, fontes de águas minerais e águas engarrafadas.

A linha de pesquisa se iniciou na década de 1990. Durante oito anos foram analisadas amostras de 35 marcas de águas minerais consumidas nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Chegou-se à dose de radiação coletiva dos consumidores do produto. A conclusão dos pesquisadores é de que todas são adequadas para o consumo. Não trazem danos para o homem. Da água mineral consumida no país, 65% é proveniente de fontes localizadas na região Sudeste.

Existem dois tipos de radioatividade presentes nas águas minerais: a temporária e a permanente. Permanente porque o elemento químico rádio-226 tem 1600 anos de meia-vida, tempo em que sua radioatividade decai pela metade. Por sua vez, o radônio-222 (elemento obtido a partir do decaimento do rádio-226) permanece com sua radioatividade inalterada por 3,8 dias. Por esse tempo curto é que se fala na radioatividade temporária.

Setenta por cento do que o ser humano recebe em termos de dose correspondem à chamada radiação natural. De acordo com o estudo, a ingestão de água mineral representaria menos de 2,3% da dose atribuída a essa radiação natural.

[...]

INSTITUTO de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen). Água mineral é tema de pesquisa em radiometria. *Jornal Órbita*, ano IV, n. 16, maio/jun. 2003.

Análise nº 353/LAMIN/CPRM-SP, de 07/11/2012
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (mg/L)

Estrôncio	0,039
Cálcio	0,159
Cálcio	3,850
Magnésio	120
Potássio	2,672
Sódio	14,600
Bicarbonato	6,92
Clorato	22,24
Sulfato	2,02
Fluoretos	0,03
Nitrato	17,62
Brometo	0,02

Características Físico-Químicas: pH a 25°C: 5,33 Condutividade Elétrica a 25°C: 123,9 µS/cm Temperatura da água na fonte: 22,7°C Resíduo de Evaporação à 180°C, calculado: 80,54 mg/L Radioatividade na fonte a 20°C e 760 mm de Hg 6,09 Maches. Classificação: Água Mineral Fluoretada, Fracamente Radioativa na Fonte

NÃO CONTÉM GLÚTEN
DATA DE ENVASE NA GARRAFA
VALIDADE 6 MESES
DA DATA DE ENVASE

LIGAÇÃO GRATUITA: 0800-0000002

A água pode apresentar rádio e radônio na sua composição.

Carlos Luvizani/Acervo do fotógrafo

1. No rótulo de uma garrafa de água mineral, encontramos a seguinte informação:

Radioatividade na fonte a 20 °C e 760 mm de Hg: 24,72 maches.

- a) Sabendo que 1 mache equivale a 12,802 becquerel/litro, explique o significado da unidade **mache**.
- b) Expresse a radioatividade dessa água mineral em Bq/litro.

2. Com base no texto, o que podemos concluir sobre as implicações da ingestão de água mineral radioativa para a saúde das pessoas?

Aplicações das radiações

No Brasil, existem vários centros de referência de pesquisas científicas na área nuclear. De modo geral, o compromisso desses centros é a melhoria da qualidade de vida da população brasileira por meio do uso seguro da tecnologia nuclear e da utilização da energia nuclear como fonte de desenvolvimento. Seus campos de pesquisa incluem desde a fabricação de combustíveis nucleares para reatores de pesquisa, a produção de radioisótopos (isótopos radioativos) que permitam um diagnóstico médico mais preciso e terapias mais eficazes, a esterilização de produtos farmacêuticos, a irradiação de alimentos, o controle de pragas, até os estudos dos efeitos da poluição sobre o solo, as águas e a atmosfera.

Vejam os seguintes exemplos de aplicações das radiações em algumas áreas de interesse.

- **Medicina** – A primeira aplicação das radiações na Medicina foram os raios X. Eles propiciaram um grande avanço nos diagnósticos por imagem e iniciaram um grande campo na área médica, conhecida como **radiologia**, que compreende a radiologia diagnóstica, a radioterapia (figura 10.6) e a Medicina nuclear (figura 10.7).

Figura 10.6 A radioterapia utiliza radiações (raios X, raios gama, elétrons, etc.) para tratamento de tumores, normalmente malignos, com a finalidade de destruir suas células.

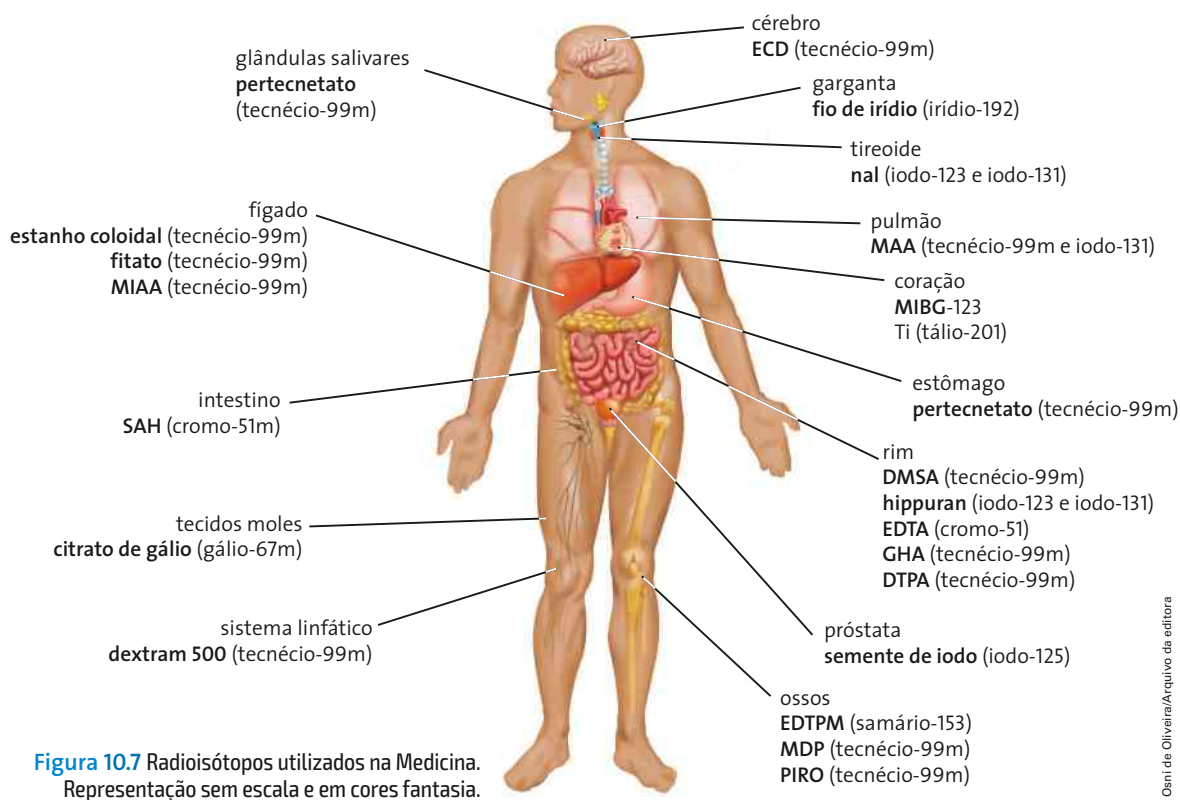


Figura 10.7 Radioisótopos utilizados na Medicina. Representação sem escala e em cores fantasia.

Radiologia – Estudo das radiações e do seu emprego para diagnóstico ou tratamento médico.

- **Agricultura** – As aplicações das radiações na agricultura constituem um campo muito vasto, que inclui, entre outros, a irradiação de alimentos (**figura 10.8**), o controle de pragas, o estudo de fatores relacionados à nutrição animal, as aplicações de radioisótopos em estudos ambientais e agropecuários. Faz parte também a física do solo que, com técnicas nucleares, estuda os efeitos da poluição sobre as águas e sobre o sistema solo/planta/atmosfera, possibilitando ao homem a preservação e conservação da água e do solo em sistemas agrícolas.



Figura 10.8 Comparação entre produtos irradiados e não irradiados.

- **Indústria** – Os radioisótopos cobalto-60, cério-137 e irídio-192 (emissores gama) são muito empregados em ensaios não destrutivos. São usados para verificação de falhas em tubulações de gás ou de água e em estruturas de concreto, rachaduras e desgastes em peças metálicas e soldas. Constituem uma ferramenta importante para o controle de qualidade e a otimização de processos. As radiações podem ser usadas para detectar vazamento de líquidos ou gases e também na avaliação de desgaste de motores. Na indústria farmacêutica e nos hospitais, as radiações podem ser usadas na esterilização de luvas cirúrgicas, cateteres e seringas (**figura 10.9**).



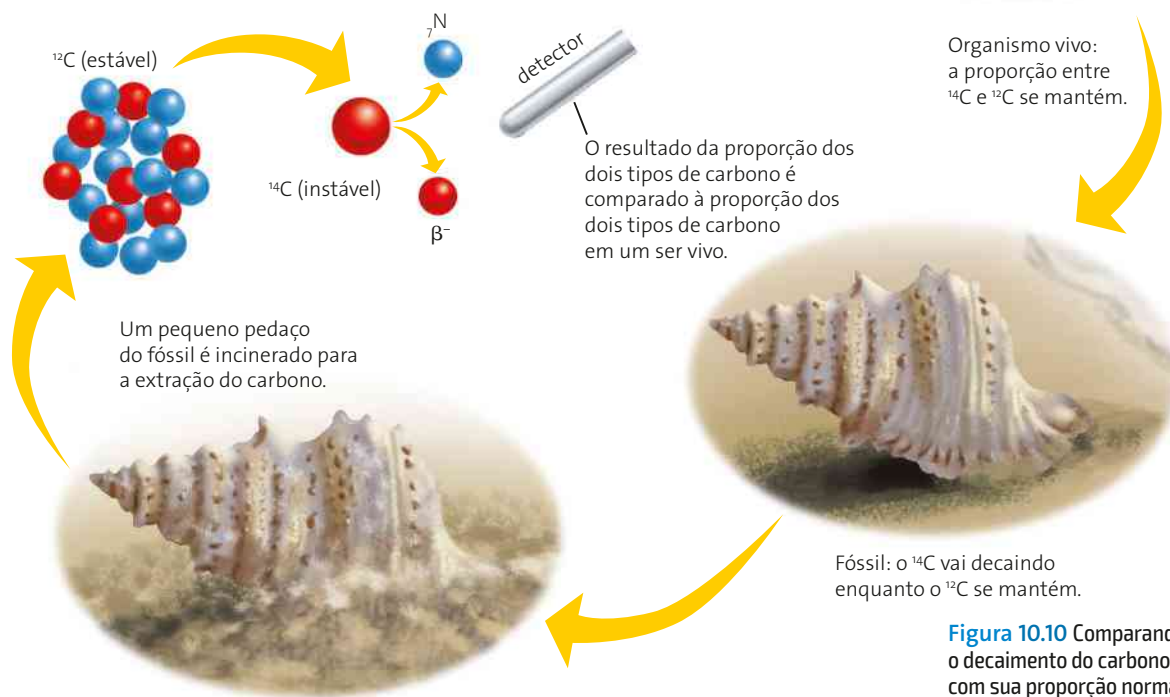
Figura 10.9 Carregamento de instrumentos médicos usados em cirurgia sendo levados para esterilização.

● **Arqueologia** – Uma das grandes aplicações da radioatividade na Arqueologia é a datação de rochas, fósseis e peças antigas. No caso específico de materiais orgânicos, o método mais utilizado é a datação pelo carbono-14. Esse método, adequado para medir a idade de materiais orgânicos de até dezenas de milhares de anos, foi desenvolvido pelo químico norte-americano Willard F. Libby (1908-1980) que, por esse trabalho, recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1960.

A técnica consiste em comparar a quantidade de carbono-14 presente no organismo atual com a existente antes de o organismo morrer. Para entender como o processo funciona, devemos lembrar que todos os organismos vivos (animais e plantas) absorvem o carbono do ar, na forma de gás carbônico (CO_2). O carbono existente na natureza é constituído por três isótopos, carbono-12 (98,9%), carbono-13 (1,1%) e carbono-14 (0,000 001%). A percentagem indicada entre parênteses se refere à abundância relativa de cada um.

Dos três isótopos, somente o carbono-14 é radioativo e tem uma meia-vida física de aproximadamente 5 730 anos. Portanto, a quantidade de carbono-14 no ar deveria diminuir com o passar do tempo. Isso só não acontece porque, nas altas camadas da atmosfera, raios cósmicos colidem com átomos de nitrogênio mantendo uma produção praticamente constante de carbono-14.

Assim, enquanto o organismo estiver vivo, a proporção entre carbono-14 e carbono-12 presentes nele se mantém constante. Quando o organismo morre, cessa a absorção de carbono do ar por ele. Então, com a emissão de radioatividade pelo carbono-14, a proporção entre o carbono-14 e o carbono-12 vai diminuindo com o tempo, pois a quantidade deste último se mantém constante. Comparando a proporção atual com a de antes da morte do organismo e conhecendo a meia-vida do carbono, podemos determinar a idade do material (figura 10.10).



Como a percentagem de carbono-14 é muito pequena, a datação por esse método nos fornece bons resultados quando a idade do material orgânico encontra-se na faixa entre 500 anos e 50 000 anos. Abaixo de 500 anos, a proporção de carbono-14 é muito próxima da original e acima de 50 000 anos ela é praticamente desprezível.

Figura 10.10 Comparando o decaimento do carbono-14 com sua proporção normal nos seres vivos, é possível estimar a idade de um fóssil. Representação sem escala e em cores fantasia.

Exercício resolvido

2. Para determinar a idade de fósseis recorre-se às propriedades radioativas do carbono-14. Sabendo-se que a meia-vida desse elemento é, aproximadamente, 5 600 anos e que em um esqueleto encontrado por arqueólogos a taxa de carbono-14 é de 12,5% da normal, determine há quanto tempo ocorreu a morte desse ser.



Resolução:

Para responder à questão, basta construirmos uma tabela com o percentual do elemento radioativo em função do tempo. Para $t = 0$, a taxa de carbono-14 é de 100% e, a cada 5 600 anos (meia-vida), essa taxa decai para a metade. Assim, temos:

Tempo (anos)	Quantidade percentual
0	100%
5 600	50%
11 200	25%
16 800	12,5%

Como o esqueleto apresenta uma taxa de 12,5% da normal, então, de acordo com a tabela, o ser morreu há, aproximadamente, 16 800 anos.



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

Exercícios

7. Normalmente, as pessoas que trabalham com materiais radioativos usam um crachá contendo um pedaço de um filme fotográfico, fechado em um invólucro à prova de luz, para monitorar suas exposições à radiação. Qual(is) radiação(ões) pode(m) ser monitorada(s) com esse dispositivo? Justifique sua resposta.

As emissões β e γ .



Public Health England/SPL/Latinstock

Foto de um dosímetro descartável.

8. Em um exame de densitometria óssea – medição da densidade óssea examinada radiologicamente – um técnico usou uma amostra de tecnécio-99 que havia sido preparada uma semana antes, e não obteve resultado algum. Sabendo-se que a meia-vida física do tecnécio é aproximadamente 6 h, explique por que isso aconteceu. Como a meia-vida do tecnécio é de 6 h, em uma semana terão se passado 28 meias-vidas. Dessa forma, a atividade terá decaído 2^{28} vezes, ou seja, bilionésimos do valor inicial e será praticamente indetectável.
9. A idade de um esqueleto animal foi datada pelo carbono-14 (C-14). Por meio de um detector, obteve-se que a taxa de C-14 era de 6,25% da taxa normal. Considerando que a meia-vida do carbono-14 é aproximadamente 5 700 anos, determine há quanto tempo ocorreu a morte desse animal. $t = 22800$ anos

3 Reações nucleares

Diariamente, convivemos com as mais diversas reações químicas. Quando produzimos a queima do gás em um fogão para fazer o café (**figura 10.11**) ou para aquecer a comida, estamos produzindo uma reação química. A queima da gasolina no interior do motor de um automóvel constitui uma reação química.

Mas e as reações nucleares, elas também fazem parte do nosso dia a dia? Para responder a essa questão, vamos observar alguns aspectos importantes relacionados a essas duas reações: a química e a nuclear.

O primeiro aspecto diz respeito às partículas que constituem os átomos. Enquanto as reações químicas envolvem os elétrons da eletrosfera dos átomos, as reações nucleares envolvem os núcleons (prótons e nêutrons) do núcleo dos átomos. Nas reações químicas, temos a força eletromagnética e, nas reações nucleares, a força nuclear forte, cuja intensidade é muito maior do que a da força eletromagnética.

Um segundo aspecto está relacionado aos isótopos de um dado elemento químico. Enquanto os isótopos sofrem as mesmas reações químicas, seus núcleos sofrem reações nucleares diferentes.

Um terceiro aspecto está relacionado à energia envolvida nos processos. Nas reações químicas, a energia envolvida por átomo reagente é da ordem de 10 eV (elétrons-volt) e, nas reações nucleares (**figura 10.12**), essa energia é da ordem de dezenas de MeV (milhões de elétrons-volt), ou seja, milhões de vezes maior.

A descoberta da desintegração nuclear espontânea, que também é conhecida como decaimento radioativo, fez com que buscássemos a desintegração nuclear artificial. Para isso, foi preciso aprender a bombardear os núcleos de átomos com partículas energéticas.



Figura 10.11 Nos botijões utilizamos o GLP (gás liquefeito de petróleo – basicamente uma mistura de propano e metano), que, ao entrar em combustão, se transforma em outros gases.

Para refletir

As reações nucleares fazem parte do nosso dia a dia?



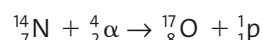
Figura 10.12 As reações nucleares em reatores (câmaras de resfriamento herméticas, com blindagem contra radiações) são desenvolvidas para a produção de energia.



Transmutação artificial

A primeira desintegração artificial foi realizada pelo físico neozelandês Ernest Rutherford, em 1919. Estava lançada a semente que levaria a humanidade ao conhecimento de uma das formas mais concentradas de energia – a nuclear.

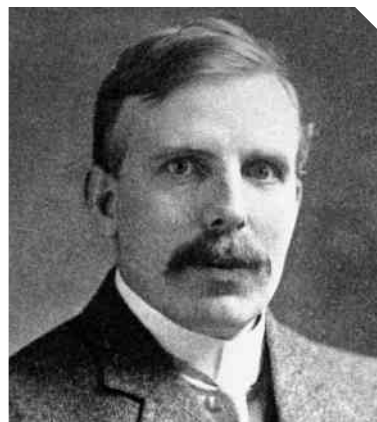
Na reação nuclear produzida por Rutherford, átomos de nitrogênio-14 foram bombardeados com partículas α , altamente velozes. Nessa reação, obtém-se oxigênio-17 e um próton:



Rutherford foi o responsável pela primeira **transmutação** artificial – mudança de um elemento químico em outro –, realizando o sonho dos alquimistas: a transformação de chumbo em ouro. Hoje, a transmutação artificial é realizada nos principais centros de pesquisa do mundo.

A partir dessa primeira reação nuclear artificial, uma “espécie de febre” assolou a maioria dos cientistas da época. Reações nucleares eram produzidas com os mais diferentes elementos.

As pesquisas de bombardeamento de boro, alumínio e magnésio com partículas alfa realizadas pelo casal Joliot-Curie, em 1934, mostraram que os produtos de algumas reações nucleares eram radioativos. Isso conduziu para a criação da radioatividade artificial. Pela síntese dos novos isótopos radioativos, o casal recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1935. Esse trabalho foi fundamental para se produzir a fissão nuclear.



Prof. Peter Fowler/Science Photo Library/Latinstock

Retrato de Ernest Rutherford (1871-1937).



Hulton-Deutsche Collection/Corbis/Latinstock



David Seymour/Magnum Photos/Latinstock

Retratos de Irène Joliot-Curie (1897-1956), filha de Marie Curie e Pierre Curie, e Jean-Frédéric Joliot-Curie (1900-1958).

Em 1932, em uma dessas reações nucleares induzidas, o físico britânico James Chadwick reconheceu a existência e a natureza do nêutron. Por essa descoberta, Chadwick recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1935.

- Explique o balanceamento da equação relativa à reação nuclear produzida por Rutherford.



Bettmann/CORBIS/Latinstock

Retrato de James Chadwick (1891-1974).

Aceleradores de partículas

Durante os anos 1920, geralmente a fonte de partículas α utilizadas pelos cientistas era um pedaço de minério radioativo natural. Isso impunha restrições às pesquisas. Devido ao baixo valor energético da partícula, as pesquisas eram restritas aos elementos mais leves. No final dessa década, com a construção dos aceleradores de partículas, as reações nucleares passaram para um estágio superior. Prótons, dêutrons (partículas constituídas por um próton e um nêutron) e partículas α puderam ser aceleradas e adquirir energia da ordem de vários MeV.

Segundo o físico Ignacio Bediaga, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas: um acelerador de partículas e seus detectores estão para os físicos de partículas assim como o telescópio está para o astrônomo, o microscópio para o biólogo ou o olho para o ser humano. A função é praticamente a mesma: observar a natureza em dimensões ínfimas.

No Acelerador Linear de Stanford (Slac) (figura 10.13), que está localizado próximo da cidade de São Francisco, nos Estados Unidos, e que é considerado o maior acelerador linear do mundo, elétrons e pósitrons (partícula com a mesma massa do elétron, mas com carga elétrica positiva) são acelerados em um tubo com 3,0 km de comprimento e atingem energias da ordem de 50 GeV (1 GeV = um trilhão de elétrons-volt).

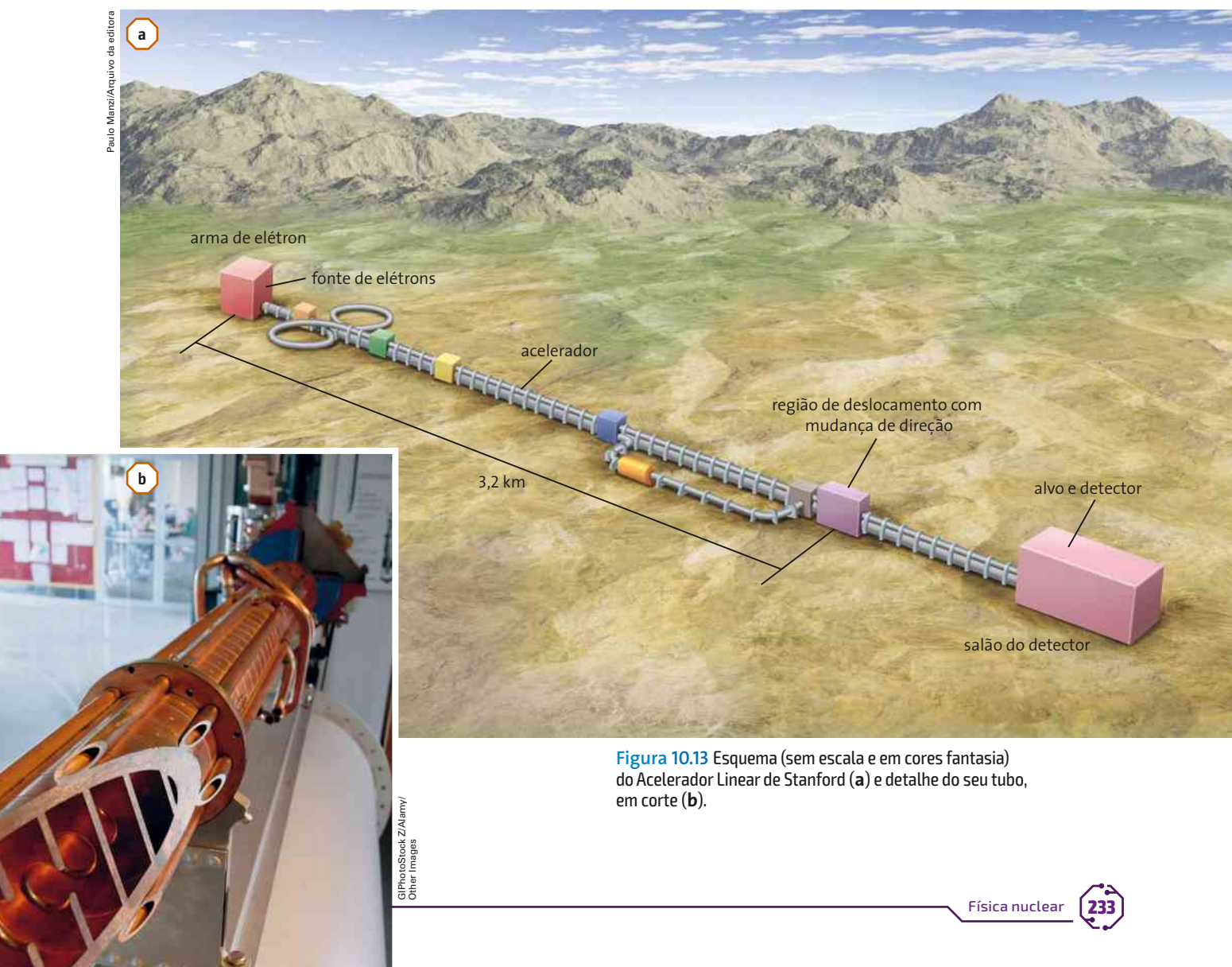


Figura 10.13 Esquema (sem escala e em cores fantasia) do Acelerador Linear de Stanford (a) e detalhe do seu tubo, em corte (b).

12. Nos aceleradores circulares (Fermilab) as partículas são aceleradas a cada volta, em determinada região, enquanto nos aceleradores lineares (Slac) elas são aceleradas ao longo de todo o percurso. Outra diferença de grande importância é que nos aceleradores circulares pode-se efetuar a colisão de partículas que se movimentam em sentidos contrários, aumentando significativamente a energia dos elementos envolvidos na colisão, mas no acelerador linear a colisão é contra um alvo fixo.

Para refletir

Qual é a velocidade dos prótons no LHC?

Veja resposta no Manual do Professor.

No final de 2008 entrou em funcionamento o Grande Colisor de Hádrons (LHC) (figura 10.14), um acelerador localizado na Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (Cern), na fronteira da Suíça com a França. O LHC tem condições de acelerar prótons até energias da ordem de 10 TeV (1 TeV = 1 000 GeV). Nessa energia, cada próton realiza 11 000 voltas por segundo em um anel de 27 km de circunferência.

As imagens desta página não estão representadas em proporção.



Figura 10.14 Com 4,3 km de raio, o anel maior do LHC, que fica a 100 m de profundidade, se estende por parte da Suíça e da França.

Exercícios

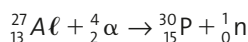
10. Uma das diferenças é que as reações químicas envolvem as eletrosferas dos átomos e ocorrem devido às forças de origem eletromagnética. Já as reações nucleares ocorrem nos núcleos, sob a influência da interação forte. Além disso, outra diferença é que as energias envolvidas nas reações nucleares são milhões de vezes maiores que as das reações químicas.



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

10. Quais as diferenças básicas entre as reações químicas e as reações nucleares?

11. Uma das reações nucleares realizadas pelo casal Joliot-Curie está esquematizada a seguir:



Identifique quais são os reagentes e quais são os produtos dessa reação nuclear.

Reagentes: alumínio (Al) e a partícula α ; produtos: fósforo (P) e um nêutron.

12. Dentre os aceleradores de partículas em funcionamento no mundo, destacam-se o Fermilab, localizado na periferia de Chicago, nos Estados Unidos, no qual partículas são aceleradas em um anel de 1 609 m de diâmetro e levadas a colidir umas com as outras, e o Slac, que é constituído por um tubo de aproximadamente 3,0 km de comprimento, no qual elétrons “montam numa onda eletromagnética como se fossem surfistas no mar”. Qual é a principal diferença entre esses dois aceleradores?



Fissão nuclear e fusão nuclear

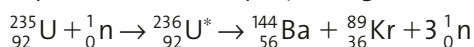
Nos reatores nucleares, como os utilizados para a geração de eletricidade, a energia é proveniente de uma reação nuclear artificial denominada **fissão nuclear**.

A descoberta da fissão nuclear no final de 1938 é atribuída aos físico-químicos alemães Otto Hahn (figura 10.15), Prêmio Nobel de Química de 1944, e Fritz Strassmann (1902-1980). Para a explicação desse fenômeno, eles contaram com a colaboração da física austríaca Lise Meitner (figura 10.15) e de seu sobrinho, o físico austríaco Otto R. Frisch (1904-1979).

As experiências de Hahn e Strassmann consistiam em bombardear uma amostra de urânio com nêutrons para obter elementos químicos mais pesados que o urânio. Para surpresa dos dois, a reação produzia elementos mais leves que o urânio. Um desses elementos é o bário, que possui um pouco mais que a metade da massa do urânio.

Nas fissão nuclear, o núcleo de um dado elemento químico, ao ser atingido por um nêutron, fragmenta-se, produzindo dois novos elementos e liberando uma grande quantidade de energia. Normalmente, nas reações de fissão, são liberados de dois a três nêutrons, que vão provocar a fissão de outros núcleos do elemento original, estabelecendo, assim, uma reação em cadeia.

Um exemplo típico de fissão nuclear está representado na equação seguinte:



Vejamos o que acontece nessa reação de fissão. Um núcleo de urânio-235 (${}_{92}^{235}\text{U}$), ao absorver um nêutron (${}_0^1\text{n}$), passa para um estado excitado que corresponde ao urânio-236 (${}_{92}^{236}\text{U}^*$). Após um curto intervalo de tempo, esse núcleo excitado sofre uma ruptura, dividindo-se em dois novos elementos, chamados produtos ou fragmentos da fissão. Na reação, esses produtos são o bário-144 (${}_{56}^{144}\text{Ba}$) e o criptônio-89 (${}_{36}^{89}\text{Kr}$). Temos, ainda, a liberação de três nêutrons e grande quantidade de energia. Esses três nêutrons liberados vão provocar novas fissões, como ilustrado na figura 10.16.

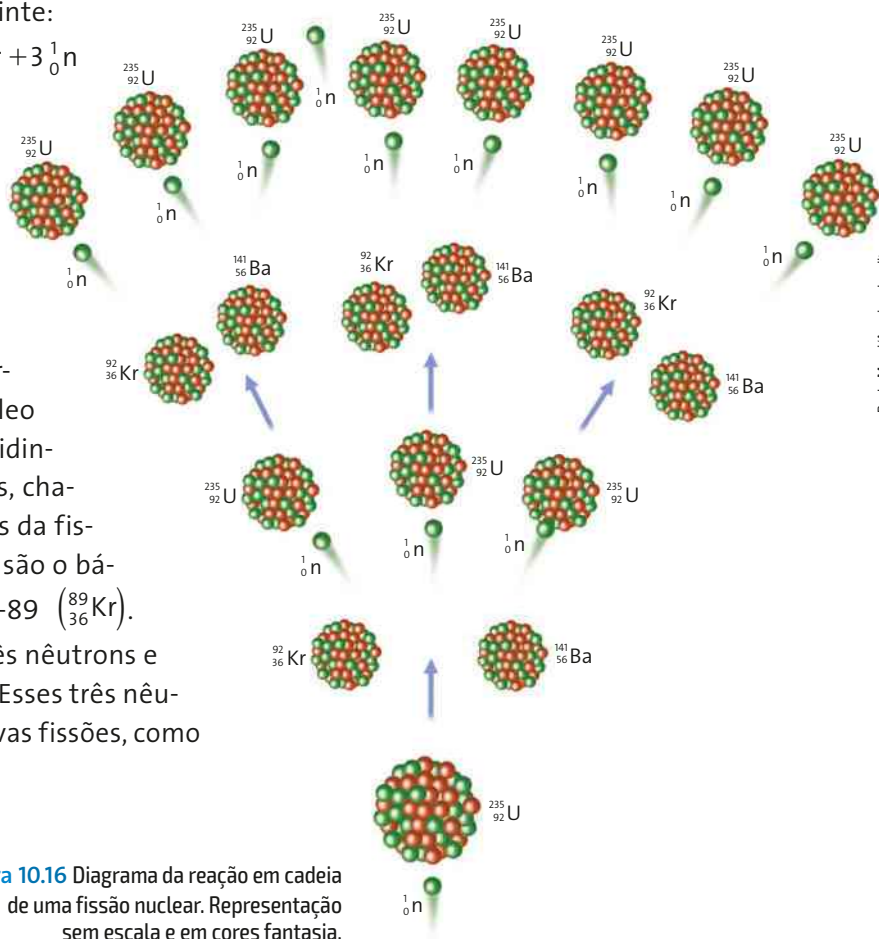


Figura 10.16 Diagrama da reação em cadeia de uma fissão nuclear. Representação sem escala e em cores fantasias.



Figura 10.15 Retrato de Otto Hahn (1879-1968) e Lise Meitner (1878-1968).

Emilio Segre Visual Archives/American Institute of Physics/Science Photo Library/Latinstock

Paulo Manz/Arquivo da editora

Probabilidade de ocorrência na fissão do urânio

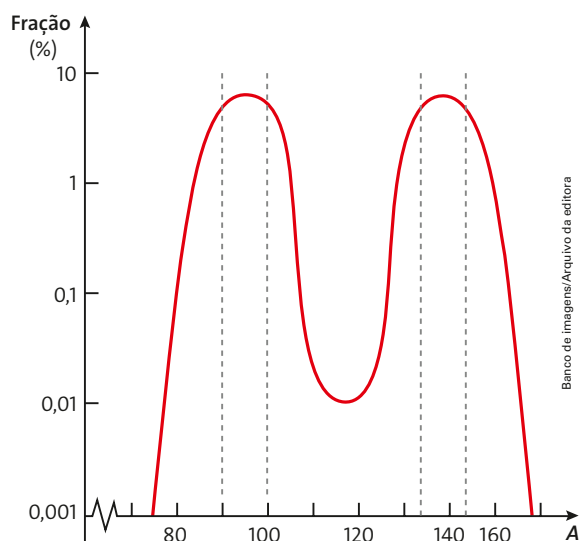


Figura 10.17 Observe que a escala vertical é logarítmica.

Observe que os produtos da fissão não são sempre os mesmos (bário e criptônio); podem ser formados o cério-144 e o rubídio-90, ou, ainda, o xenônio-143 e o estrôncio-90. Entre os fragmentos da fissão nuclear do urânio-235 já foram constatados cerca de cem nuclídeos diferentes de vinte elementos químicos. Na realidade, a fissão não ocorre com o urânio-235, mas sim com o urânio-236.

A figura 10.17 ilustra a fração percentual do número de massa (A) dos fragmentos da fissão produzidos na reação nuclear do urânio. A fração percentual é maior para os fragmentos com números de massa entre 90 e 100 e entre 135 e 145.

A fissão nuclear produziu grande impacto na comunidade científica em virtude da grande quantidade de energia que é liberada na reação. Em média, temos a liberação de 200 MeV (duzentos milhões de elétrons-volt) em cada fissão. Essa energia é cerca de 10 milhões de vezes maior que a obtida com as reações de combustão para cada grama de reagente.

Nas reações nucleares, as transformações de massa em energia e vice-versa estão sempre presentes. Assim, nessas reações, é fundamental a equação de Einstein:

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

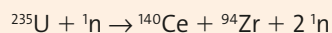
Se considerarmos que uma unidade de massa atômica (1 u) se transforma totalmente em energia, usando a unidade MeV, temos:

$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}$$

Acompanhe o exercício resolvido 3, que ilustra o cálculo da energia liberada em uma fissão.

Exercício resolvido

3. Eliminando-se alguns processos intermediários, uma reação de fissão do urânio pode ser resumida por:



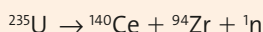
Em unidades de massa atômica (u), considere os seguintes dados:

$^{235}\text{U} = 235,0439 \text{ u}$; $^{140}\text{Ce} = 139,9054 \text{ u}$; $^{94}\text{Zr} = 93,9063 \text{ u}$ e $^1_0\text{n} = 1,00867 \text{ u}$.

Calcule a energia (E) dessa reação nuclear.

Resolução:

A reação dada pode ser simplificada eliminando-se um nêutron da cada lado da expressão. Assim, temos:



Nessa expressão, a diferença de massa (Δm) é dada por:

$$\Delta m = m_{\text{U}} - (m_{\text{Ce}} + m_{\text{Zr}} + m_{\text{n}})$$

Substituindo os valores dados para as massas, obtemos, em unidade de massa atômica:

$$\Delta m = 235,0439 - (139,9054 + 93,9063 + 1,00867) \Rightarrow \Delta m = 0,224 \text{ u}$$

Sabendo que 1 u corresponde a 931,5 MeV, uma massa de 0,224 u corresponde a uma energia (E), em MeV, igual a:

$$E = 0,224 \cdot 931,5 \Rightarrow E = 208 \text{ MeV}$$

Como a energia da reação (208 MeV) é positiva, a reação é **exoenergética**, ou seja, essa energia é liberada na reação.

Fusão nuclear

A **fusão nuclear** é uma reação nuclear em cadeia em que núcleos leves se fundem para formar núcleos mais pesados, ocorrendo grande liberação de energia.

Em 1938, o físico Hans Albrecht Bethe (1906-2005), Prêmio Nobel de Física de 1967 pelas contribuições à teoria das reações nucleares, desenvolveu uma teoria mostrando que a energia liberada pelas estrelas provém de reações de fusões nucleares.

Vejamos o que ocorre com a estrela do nosso sistema planetário. No Sol, as reações de fusão ocorrem em várias etapas, nas quais o hidrogênio se transforma em hélio, com liberação de energia.

A **figura 10.18** nos dá ideia das reações que ocorrem no interior do Sol.

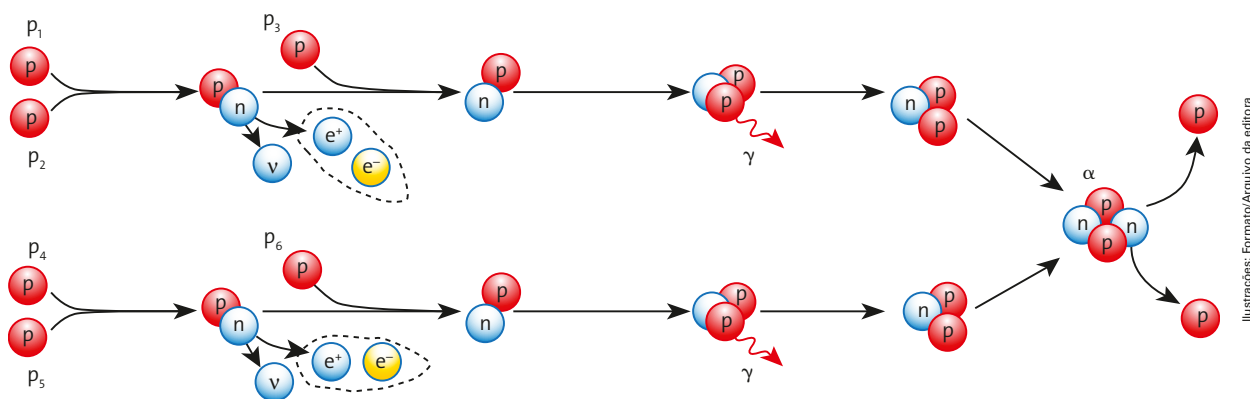


Figura 10.18 Ciclo próton-próton.

São duas reações próton-próton, que culminam com a formação de uma partícula alfa e liberam dois prótons que irão participar de uma nova reação, constituindo a reação em cadeia. O símbolo v se refere a uma partícula subatômica de massa de repouso praticamente nula denominada **neutrino**.

É comum, em Física nuclear, descrever as reações considerando somente o conteúdo dos núcleos. Assim o próton é o núcleo do hidrogênio, ^1H ; o par próton-nêutron é o núcleo do deutério, ^2H ; e a partícula alfa é o núcleo do hélio, ^4He .

Na **figura 10.19**, temos uma representação da fusão nuclear do hidrogênio, utilizando a nomenclatura dos elementos químicos.

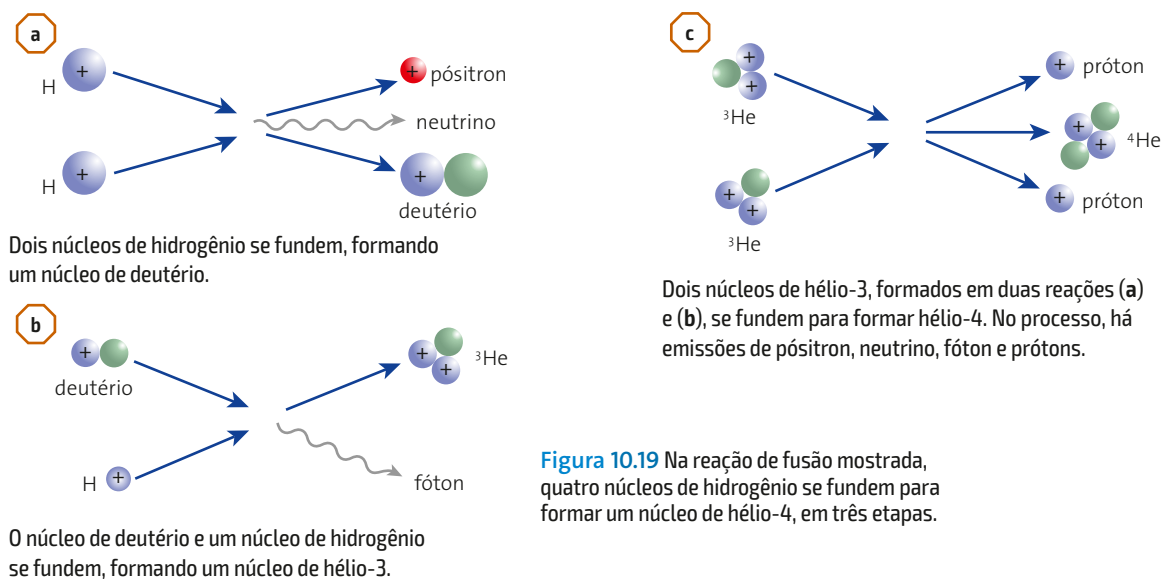


Figura 10.19 Na reação de fusão mostrada, quatro núcleos de hidrogênio se fundem para formar um núcleo de hélio-4, em três etapas.

Em resumo, podemos pensar na fusão de quatro núcleos de hidrogênio produzindo um núcleo de hélio. Nessa reação, observamos que a massa dos quatro prótons é maior que a massa do hélio-4. Assim, temos uma diferença de massa que, transformada em energia, nos fornece 27,8 MeV.

Comparando-se a energia liberada na fusão (27,8 MeV) com a liberada na fissão (200 MeV), vemos que $E_{\text{fusão}} < E_{\text{fissão}}$. No entanto, se consideramos a energia liberada por núcleon referente às duas reações, obtemos que a de fusão é mais eficiente do que a de fissão.

Em cada reação de fissão, temos 236 núcleons envolvidos (urânio-235 e 1 próton), enquanto, na fusão, temos somente quatro núcleons. Assim:

- na reação de fissão: $\frac{208 \text{ MeV}}{236 \text{ núcleons}} = 0,88 \text{ MeV/núcleon}$;
- na reação de fusão: $\frac{27,8 \text{ MeV}}{4 \text{ núcleons}} = 6,96 \text{ MeV/núcleon}$.

Comparando os dois resultados, obtemos: $\frac{E_{\text{fusão}}}{E_{\text{fissão}}} = 7,9$. Isso significa dizer que a reação de fusão é cerca de oito vezes mais energética que a de fissão, quando fazemos a comparação por núcleon, ou por grama de combustível gasto.

15. As reações apresentadas no texto são:



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

Exercícios

Em um reator de fissão, há grande quantidade de urânio-238 e nêutrons. Dessa forma, o plutônio é um dos subprodutos desse tipo de usina.

13. Na fissão nuclear, nêutrons penetram em núcleos de urânio-235, provocando seu rompimento. Explique se é possível a fissão do urânio-235 com prótons no lugar de nêutrons. **Não.**

14. Uma reação que pode ocorrer na fissão de um átomo de urânio é: **Como a massa dos produtos é menor do que a dos reagentes, a reação nuclear libera energia. Veja complemento da resposta no Manual do Professor.**
- $${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U}^* \rightarrow {}_{56}^{144}\text{Ba} + {}_{36}^{89}\text{Kr} + 3 {}_0^1\text{n}$$

Se essa reação libera energia, compare a soma das massas dos reagentes com a soma das massas dos produtos da reação, e calcule a energia liberada.

15. Embora o urânio-238 não seja físsil, ele pode ser utilizado para a produção do plutônio-239, um elemento químico inexistente na natureza, mas que pode ser obtido bombardeando-se átomos de urânio-238 com nêutrons. A sequência de reações é a seguinte: após o núcleo do átomo de urânio-238 capturar um nêutron, seguido de dois decaimentos β , dá origem ao plutônio-239.

Como o urânio-235, o plutônio é um elemento físsil e foi usado em uma das bombas lançadas sobre o Japão.

De acordo com o texto e utilizando uma tabela periódica, escreva as reações nucleares desde o urânio-238 até o plutônio-239.

16. No interior do Sol, a cada segundo, aproximadamente 650 milhões de toneladas de hidrogênio são transformadas em hélio, pelo processo da fusão nuclear. A quantidade de hélio obtida é pouco menor, pois aproximadamente 5 milhões de toneladas de hidrogênio são transformadas em energia.

a) Faça uma estimativa (ordem de grandeza) da quantidade de energia, em joule, produzida no Sol em 1 s. Utilize a relação $E = m \cdot c^2$ e $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. **$E = 4,5 \cdot 10^{26} \text{ J}$**

b) De acordo com o Balanço Energético Nacional – BEN (Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: fev. 2016.), a oferta interna de energia elétrica no Brasil, em 2014, foi aproximadamente 590,5 TWh. Supondo que toda a energia produzida no Sol em 1 s estivesse disponível para uso no Brasil, determine a ordem de grandeza do número de anos que ela supriria. **$t = 2 \cdot 10^8 \text{ anos}$**

17. Por que, mesmo liberando uma menor quantidade de energia, a reação de fusão é mais energética que a de fissão?

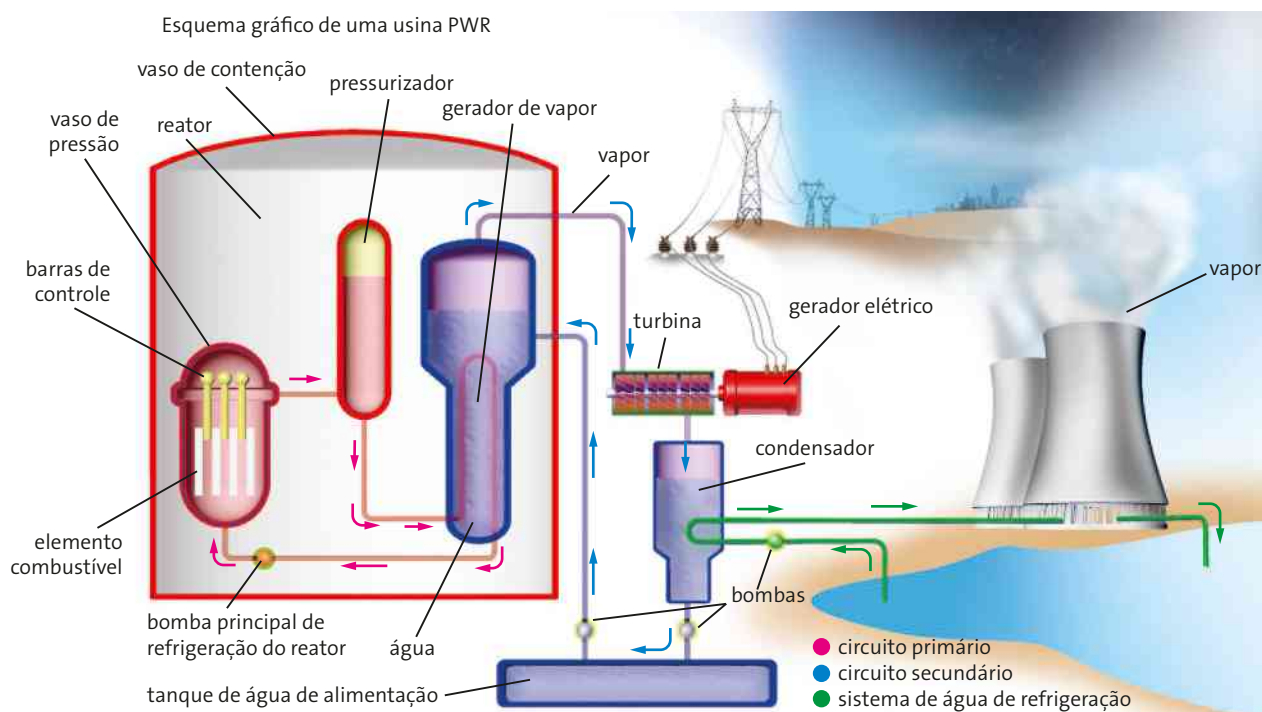
Porque quando consideramos a energia liberada por núcleon (ou por grama de reagente), a energia obtida na fusão é praticamente 8 vezes maior que a energia liberada na fissão.



Reatores nucleares

A principal finalidade de uma usina que funciona com reatores de fissão nuclear é a utilização, de uma forma segura e controlada, da energia liberada nas fissões para a produção de eletricidade. Nos reatores nucleares, o combustível é o urânio-235 que, ao sofrer fissões, libera uma grande quantidade de energia. Essa energia aquece a água transformando-a em vapor e, este, por sua vez, movimenta as turbinas do gerador elétrico.

Podemos descrever o funcionamento de um reator nuclear da seguinte forma: os elementos combustíveis – pastilhas de urânio empilhadas em varetas metálicas – são colocados no núcleo do reator e em presença de um moderador – normalmente a água – cuja finalidade é reduzir a velocidade dos nêutrons emitidos na fissão para que a reação em cadeia seja possível. Embora não apareça na figura, no núcleo do reator existem barras de controle, que contêm elementos que absorvem nêutrons e são usadas para controlar o nível de potência do reator. Observe a [figura 10.20](#).



Antonio Robson/Arquivo da editora

Por causa da energia liberada nas fissões, os elementos combustíveis e a água (moderador) se aquecem. Essa água, mantida líquida em virtude da alta pressão a que é submetida, é bombeada para um segundo recipiente (gerador de vapor), onde existe água, à pressão normal, que é transformada em vapor. Esse vapor aciona um gerador que produz eletricidade. O que diferencia os vários tipos de usinas elétricas é o combustível utilizado para colocar o gerador em funcionamento. Após o acionamento do gerador, o vapor é condensado, em razão da troca de calor com a água de um lago, de um rio ou do mar, e retorna para o recipiente gerador de vapor.

Para a segurança dos reatores, a água pressurizada que está em contato com os produtos da fissão – elementos químicos radioativos – não entra em contato direto com a água contida no gerador de vapor.

Figura 10.20 Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) de um reator nuclear do tipo PWR (água pressurizada). Em Angra dos Reis, a 130 km da cidade do Rio de Janeiro, RJ, é usado um reator desse tipo.

Os reatores utilizam um urânio denominado “urânio enriquecido”. Isto porque, no urânio natural, a proporção de urânio-235 (urânio físsil) é de apenas 0,7%. Para manter a reação em cadeia, é preciso aumentar a concentração de urânio físsil. Os reatores do tipo usado em Angra dos Reis utilizam um urânio com uma concentração de 3% de urânio-235.

Vimos que, em cada fissão, a energia liberada é da ordem de 200 MeV. Isso equivale a $3,2 \cdot 10^{-11}$ J. Mas como o número de fissões é extremamente grande, cada grama de urânio-235 produz o equivalente a 7 MWh. Segundo David Simon, em seu artigo “Como funciona o reator de Angra”, publicado na revista *Ciência Hoje* (Rio de Janeiro: SBPC, v. 2, n. 8, set./out. 1983):

[...] em Angra 1, o núcleo do reator tem 51 toneladas de urânio, contendo cerca de 1 300 kg de urânio-235. Destes, 430 kg são consumidos em um ano, gerando aproximadamente três bilhões de quilowatts-hora.

Usinas nucleares no mundo

A polêmica sobre a construção de usinas nucleares está longe de uma solução. A posição dos ambientalistas é muito clara: a energia nuclear expõe a sociedade a riscos desnecessários – que, portanto, podem ser evitados –, além de exigir um alto investimento.

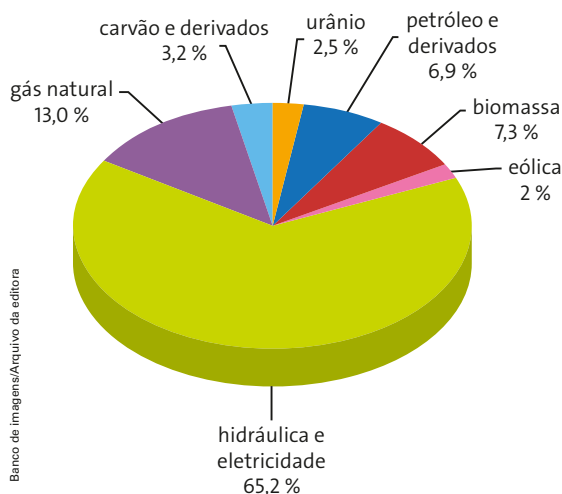
No entanto, vários países do mundo estão voltando suas atenções para a utilização de energia nuclear na produção de eletricidade, por dois motivos: a saúde do planeta – na usina nuclear não há emissão de gases que afetam o efeito estufa – e os altos preços do petróleo e do gás usado nas usinas termoeletricas.

De acordo com a Associação Mundial Nuclear (WNA), em novembro de 2012 existiam 436 usinas nucleares ativas no mundo, distribuídas em trinta países e com capacidade total de 2 518 TWh. Esse montante corresponde a

13,5% da geração de energia elétrica global. Existem, ainda, 62 usinas nucleares em construção, que representarão um aumento de 62,785 MWe (megawatt elétrico) na capacidade instalada. O Brasil possuía duas usinas nucleares ativas, Angra 1 e Angra 2, na cidade de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro, que correspondiam a 3,2% da produção energética (figura 10.21).

Embora a participação da energia nuclear na oferta mundial de energia seja ainda relativamente pequena, as projeções feitas por diferentes organizações internacionais indicam um significativo aumento no uso dessa energia. As projeções da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) indicam uma capacidade de eletricidade gerada por energia nuclear entre 437 GW e 542 GW até 2020, e entre 473 GW e 748 GW até 2030. A agência prevê também para o futuro um aumento no uso de energia nuclear para outros fins, como dessalinização da água do mar, processos de aquecimento em aplicações industriais, liquefação de carvão e produção de hidrogênio.

 **Composição da matriz elétrica brasileira por fonte**



Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN) – 2015.
Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: fev. 2016.

Figura 10.21

Rejeitos radioativos e acidentes nucleares

As discussões sobre os problemas decorrentes de um reator nuclear giram em torno de dois pontos básicos.

O primeiro ponto diz respeito aos produtos da fissão: resíduos radioativos inerentes ao processo de fusão que também são conhecidos como lixo atômico. Além de alguns serem altamente tóxicos, são responsáveis por uma atividade radioativa que pode chegar a milhares de anos, em alguns casos. A **tabela 10.2** apresenta alguns produtos de fissão e a sua meia-vida em anos.

Levando-se em conta que a radioatividade de um isótopo necessita de um tempo aproximado de 20 vezes a sua meia-vida para se tornar inofensiva, vemos na tabela que tanto o estrôncio-90 como o cézio-137, que apresentam meias-vidas em torno de trinta anos, necessitam de seiscentos anos para que sua radioatividade seja reduzida a níveis desprezíveis.

Já que os resíduos não podem ser evitados, a pergunta é: o que fazer? Será que enterrá-los ou colocá-los em órbita, como já foi sugerido, não colocará em risco as futuras gerações?

O segundo ponto diz respeito aos riscos de vazamento de radiação das usinas nucleares, que pode colocar em perigo a vida das pessoas em geral, principalmente daquelas que moram próximas ao reator.

Três grandes acidentes com reatores nucleares, os quais provocaram a liberação de substâncias radioativas para a atmosfera, chamaram a atenção do mundo para esse ponto: em 1979, na usina de Three Mile Island, nos Estados Unidos, decorrente de problemas em seu núcleo; em 1986, na usina de Chernobyl (**figura 10.22**), na Ucrânia, em razão de uma explosão; e, em 2011, na usina de Fukushima, no Japão.

Os especialistas afirmam que esse tipo de problema pode ser resolvido com uma tecnologia mais aprimorada e normas de segurança mais rígidas.

A possibilidade de usar a energia nuclear como forma alternativa de produção de eletricidade pode ser descartada? Não podemos esquecer que as reservas de combustíveis fósseis estão se esgotando e nem todos os países dispõem de potencial hídrico como alternativa.

Tabela 10.2 Produtos de fissão e meia-vida correspondente

Nuclídeo	Meia-vida (anos)
estrôncio-90	29
rutênio-106	1
césio-134	2
césio-137	30
promécio-147	2,6

Fonte: Krame K. S. *Introductory Nuclear Physics*. 2. Ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1988. Appendix C: Table of Nuclear Properties.

Oliver Sved/Shutterstock/Glow Images



Figura 10.22 Usina nuclear de Chernobyl, na Ucrânia.



Risco de acidente nuclear sempre vai existir

[...] Considerada “energia limpa” e segura, a agência [Agência Internacional de Energia Atômica] estima a ampliação da utilização da energia nuclear nos próximos anos, mas especialistas afirmam que o fantasma de Chernobyl não deve se afastar completamente.

“O risco de um acidente sempre existirá”, explica Luiz Pinguelli Rosa, diretor da Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe/UFRJ), em entrevista ao UOL Notícias.

“Como em qualquer tecnologia, existe sempre o risco. Um avião sempre pode cair. Mas existe uma diferença: um acidente nuclear tem capacidade para atingir uma população, pode ter consequências sérias”, acrescenta o pesquisador.

Prova disso é o acidente da usina nuclear de Chernobyl, acontecido na Ucrânia no início da madrugada do dia 26 de abril de 1986. Além dos trabalhadores que morreram por intensa exposição à radiação depois de trabalhar no local nos dias seguintes ao acidente, a região registra até hoje um aumento na incidência de câncer.

Seis dias depois da explosão, helicópteros militares lançaram no local toneladas de areia, chumbo, boro e outros materiais, para apagar o incêndio. Em seguida, foi construída uma cobertura de concreto sobre a usina para tentar limitar a contínua emissão radioativa. Apesar disso, a AIEA estima que 4 000 pessoas morreram em decorrência do acidente – para o Greenpeace, o número pode chegar a 9 000, se forem consideradas as mortes por câncer no longo prazo.

A magnitude do acidente impôs mudanças na supervisão das atividades nucleares. Seis meses depois do caso, foram implantadas a Convenção de Rápida Notificação de Acidente Nuclear e a Convenção de Assistência diante de Acidente Nuclear, vinculadas à AIEA.

Apesar dos riscos, a geração de energia elétrica por usinas nucleares no mundo aumentou 75% entre 1986 e 2007, alcançando cerca de 2 600 bilhões de kW/h. Até 2030, a AIEA estima que esse valor pode triplicar, uma vez que outros 43 países manifestaram interesse recentemente em iniciar geração de energia por essa fonte.

“Energia limpa” e os dejetos nucleares

A agência aponta que esse aumento se deve principalmente a três fatores: o aumento da demanda global por energia, a volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis e o interesse em fontes de energia “limpa”. A usina nuclear se enquadra nessa classificação porque não altera a qualidade do ar, não influencia na acidez da chuva e não emite dióxido de carbono.

Ao lado dessa expansão, crescem as dúvidas sobre o futuro dos chamados dejetos nucleares, ou seja, componentes de usinas nucleares que não possuem mais condição de uso, mas ainda assim apresentam radioatividade.

“Hoje não há uma solução definitiva para a questão dos rejeitos nucleares. Cogita-se a utilização de reservatórios profundos, mas não existe uma proposta internacionalmente aceita”, afirma o especialista Pinguelli Rosa.

SCARELLI, Thiago. UOL Notícias. São Paulo, 25 mar. 2009. Disponível em: <<http://noticias.uol.com.br/ultnot/internacional/2009/03/25/ult1859u813.jhtm>>. Acesso em: fev. 2016.

Trabalho em equipe

Organizem uma **hemeroteca** sobre usinas nucleares: funcionamento, custos, vantagens, desvantagens, resíduos radioativos e acidentes nucleares. Promovam debates sobre a utilização da energia nuclear na geração de eletricidade.

Hemeroteca – Setor das bibliotecas no qual se encontram coleções de jornais, revistas, periódicos e obras em série.

Reatores de fusão nuclear

Em virtude da repulsão eletrostática entre os núcleos de hidrogênio, são necessárias temperaturas da ordem de milhões de kelvins para a aproximação dos núcleos, a fim de que as forças atrativas iniciadoras da fusão atuem. Estima-se que esses valores correspondam à temperatura do núcleo das estrelas, onde, em razão do altíssimo grau de agitação, a matéria é um “gás” de íons positivos e elétrons denominado **plasma**. O plasma é considerado o quarto estado da matéria.

Eis um dos problemas que envolvem a construção de reatores de fusão nuclear: manter as altíssimas temperaturas necessárias para que a reação seja possível. Atualmente, alguns reatores (**figura 10.23**) conseguem suportar essas temperaturas e manter um delgado filete de plasma, longe das paredes, durante um curto intervalo de tempo, usando a técnica do confinamento magnético. Por enquanto, a energia posta em jogo para obter todas as condições favoráveis à fusão ainda é maior que a obtida com o processo.

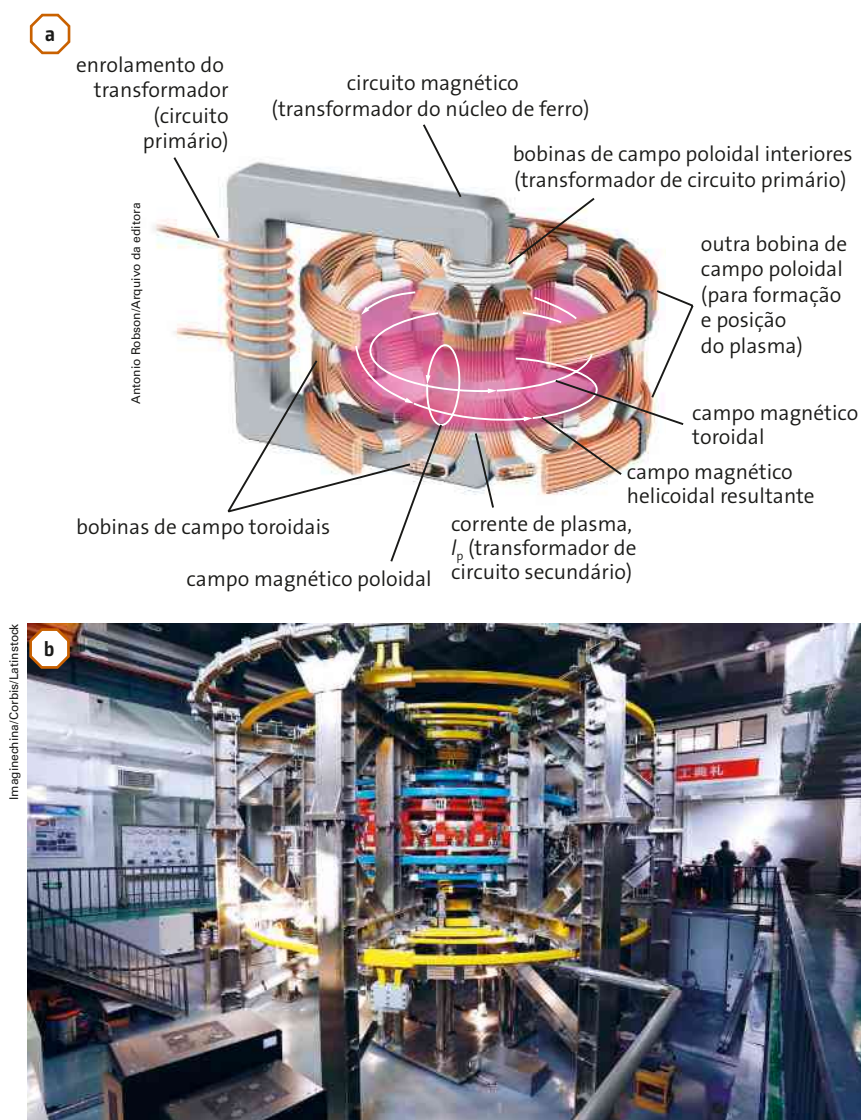


Figura 10.23 Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) de um reator de fusão nuclear (a); atualmente, o modelo mais promissor é o Tokamak, como o localizado em Hefei, China (b).

A expectativa é de que os reatores do futuro utilizem a fusão nuclear, que, além de mais eficiente que a fissão, não deixa para a sociedade a herança dos resíduos radioativos.

19. A diferença entre os três tipos de usinas elétricas citadas é a matéria-prima usada para movimentar as turbinas e gerar energia elétrica. Na hidroelétrica, a matéria-prima é a água; na termoe elétrica, normalmente é um combustível fóssil; e, na nuclear, é um material físsil (urânio).



Exercícios

18. (Enem) Para obter 1,5 kg de dióxido de urânio puro, matéria-prima para a produção de combustível nuclear, é necessário extrair e tratar 1,0 tonelada de minério. Assim, o rendimento (dado em % em massa) do tratamento do minério até chegar ao dióxido de urânio puro é de:



Dióxido de urânio é a matéria-prima para a produção de combustível nuclear.

- a) 0,10% c) 0,20% e) 2,0%
x b) 0,15% d) 1,5%

19. Quais são as diferenças entre as usinas hidrelétrica, termelétrica e nuclear utilizadas para geração de energia elétrica?



Usina hidrelétrica de Xingó, em Piranhas (AL), 2016.



Usina termoe elétrica Presidente Médici, em Candiota (RS), 2014.



Usinas da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, em Angra dos Reis (RJ), 2015.

20. Com base no texto “Risco de acidente nuclear sempre vai existir”, comente, em seu caderno, cada uma das afirmações a seguir:

- I. Mesmo com toda a tecnologia, sempre haverá acidente em qualquer usina nuclear. **Incorreta**
- II. O aumento de 75% no uso de energia nuclear para geração de energia elétrica, entre 1986 e 2007, é devido ao acidente de Chernobyl não ter sido de grandes proporções. **Incorreta**
- III. A AIEA considera a energia nuclear “limpa” porque ela não altera a qualidade do ar, não influencia na acidez da chuva e não emite dióxido de carbono. **Correta**
- IV. Os especialistas já chegaram a um consenso sobre o armazenamento dos resíduos radioativos inerentes às usinas nucleares. **Incorreta**

21. (Enem) Considere os seguintes acontecimentos ocorridos no Brasil:

- Goiás, 1987 – Um equipamento contendo cério radioativo, utilizado em Medicina nuclear, foi encontrado em um depósito de sucatas e aberto por pessoa que desconhecia o seu conteúdo. Resultado: mortes e consequências ambientais sentidas até hoje.
- Distrito Federal, 1999 – Cilindros contendo cloro, gás bactericida utilizado em tratamento de água, encontrados em um depósito de sucatas, foram abertos por pessoa que desconhecia o seu conteúdo. Resultado: mortes, intoxicações e consequências ambientais sentidas por várias horas.

Para evitar que novos acontecimentos dessa natureza venham a ocorrer, foram feitas as seguintes propostas para a atuação do Estado:

- I. Proibir o uso de materiais radiativos e gases tóxicos.
- II. Controlar rigorosamente a compra, uso e destino de materiais radioativos e de recipientes contendo gases tóxicos.
- III. Instruir usuários sobre a utilização e descarte destes materiais.
- IV. Realizar campanhas de esclarecimentos à população sobre os riscos da radiação e da toxicidade de determinadas substâncias.

Dessas propostas, são adequadas apenas:

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

Marie Curie

Marya Salomee Sklodowska, conhecida como Marie Curie ou Madame Curie, nasceu em 1867, na Polônia, e faleceu na França em 1934, aos 67 anos de idade, vítima de câncer. Segundo os médicos, "sua medula óssea não conseguiu reagir, provavelmente por estar prejudicada em razão de um longo acúmulo de radiação".

Marya viveu na Polônia até os 23 anos de idade. Sua infância e sua juventude foram marcadas pelas dificuldades financeiras da família e pelo sofrimento. Em 1874, sua irmã mais velha faleceu, vítima de tifo e, em 1878, ela perdeu sua mãe, vítima da tuberculose. Esses dois episódios marcaram profundamente esses períodos de sua vida, e seu consolo eram os livros.

Aos 16 anos, Marya terminou sua educação secundária no Liceu Russo, recebendo uma medalha de ouro de melhor aluna do ano. A vocação para as ciências já se manifestara. Matriculou-se em uma escola clandestina para mulheres e começou a lecionar. Ciência, literatura e política eram seus temas favoritos. Trabalhou como governanta com o objetivo de ajudar uma de suas irmãs, Bronia, a estudar Medicina na Sorbonne em Paris.

No final de 1891, Marya foi para Paris e matriculou-se na Sorbonne com o nome de Marie. Lá formou-se em Física (1893) e em Matemática (1894). Em 1895, ao se casar com o físico-químico Pierre Curie (1859-1906), Marie passou a usar o nome Marie Curie e se tornou a mundialmente famosa Madame Curie. Lecionou Física na Escola Normal Superior para meninas em Sèvres, onde introduziu o método de ensino baseado em demonstrações experimentais. Em 1904, assumiu o cargo de assistente no laboratório dirigido por seu marido.

Marie Curie superou todas as dificuldades que lhe eram impostas, pois, além de mulher, era cientista. Duas paixões marcaram sua vida.

A primeira, a família: Pierre, seu marido, que faleceu em 1906, aos 47 anos de idade, atropelado por uma carroça, e suas filhas, Irène, nascida em 1897, e Eve Denise, nascida em 1904.

A segunda, a ciência: foi a primeira mulher titular de uma cadeira na Sorbonne. Descobriu a radioatividade do tório e isolou quimicamente o polônio, em 1898, e o rádio, em 1910. Foi agraciada com dois Prêmios Nobel: o primeiro, de Física, em 1903, juntamente com seu marido e Henri Becquerel; e o segundo, de Química, em 1911. Após 32 anos, nenhuma outra mulher havia conquistado o Prêmio. Infelizmente, ela não viveu o suficiente para ver sua filha Irène ser a próxima mulher cientista a receber o Prêmio Nobel, junto com o marido Frédéric, pela descoberta da radioatividade artificial.

Em 1928, Marie Curie esteve no Brasil e visitou a cidade de Águas de Lindoia, SP, para constatar as fontes naturais de águas minerais radioativas existentes na cidade.



Retrato de Marie Curie (1867-1934).

Popperfoto/Getty Images

Irène Joliot-Curie

Primeira filha de Marie Curie, nasceu em 1897 em Paris. Conviveu toda a sua infância e juventude com o trabalho de sua mãe sobre a radioatividade, e essa convivência se transformou em uma estreita e prazerosa relação de trabalho. Em 1914, concluiu o Colégio Sévigné e, em 1918, tornou-se assistente de sua mãe no Instituto do Rádio da Universidade de Paris. Em 1925, apresentou sua tese de doutorado sobre as partículas alfa do polônio (elemento químico que recebeu esse nome em homenagem à Polônia, terra natal de sua mãe).

Em 1926, Irène casou-se com Jean-Frédéric Joliot (1900-1958), físico francês que trabalhava como assistente no laboratório dirigido por sua mãe. Com essa união, ambos assumiram o sobrenome Joliot-Curie. Em 1927, nasceu a primeira filha, Hélène e, cinco anos mais tarde, o filho Pierre.

Em 1933, na sétima Conferência de Solvay, em Bruxelas, que reuniu os físicos mais importantes do mundo, três mulheres estavam presentes: Marie Curie, Irène Joliot-Curie e Lise Meitner. Essa foi a primeira conferência na qual se discutiu a Física nuclear. Irène participou da fundação do Centre National de La Recherche Scientifique (Centro Nacional de Pesquisas Científicas) em 1939.

As pesquisas sobre bombardeamento de boro, alumínio e magnésio com partículas alfa realizadas por Irène em 1934, com seu marido, conduziram à criação da radioatividade artificial. Em 1935, Irène Joliot-Curie e seu marido receberam o Prêmio Nobel de Química pela síntese de novos isótopos radioativos. O trabalho de Irène foi fundamental para a descoberta da fissão nuclear.

Durante os anos 1950, a saúde de Irène entrou em declínio. Os longos anos de exposição à radiação e o contato com materiais radioativos provocaram uma leucemia da qual ela não se recuperou. Faleceu em Paris, no Hospital Curie, em 1956 com 59 anos de idade. Dois anos mais tarde, seu marido, Jean-Frédéric, também foi vítima do câncer.



Retrato de Irène Joliot-Curie (1897-1956).

Fonte de dados: ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. Disponível em <www.britannica.com/biography/Mary-Curie>. Acesso em: fev. 2016.

- Para compreender melhor a obra científica da extraordinária feminista e pacifista militante Madame Curie, sugerimos a leitura de *Gênio obsessivo: o mundo interior de Marie Curie*, de Barbara Goldsmith.

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

Retomando

22. (Fuvest-SP) As bombas atômicas, lançadas contra Hiroshima e Nagasaki em 1945, resultaram na morte de aproximadamente 300 mil pessoas, vítimas imediatas das explosões ou de doenças causadas pela exposição à radiação. Esses eventos marcaram o início de uma nova etapa histórica na corrida armamentista entre as nações, caracterizada pelo desenvolvimento de programas nucleares com finalidades bélicas. Considerando essa etapa e os efeitos das bombas atômicas, analise as afirmações abaixo.

I. As bombas atômicas que atingiram Hiroshima e Nagasaki foram lançadas pelos Estados Unidos, único país que possuía esse tipo de armamento ao fim da Segunda Guerra Mundial.

II. As radiações liberadas numa explosão atômica podem produzir mutações no material genético humano, que causam doenças como câncer ou são transmitidas para a geração seguinte, caso tenham ocorrido nas células germinativas.

III. Desde o fim da Segunda Guerra Mundial, várias nações desenvolveram armas atômicas e, atualmente, entre as que possuem esse tipo de armamento, têm-se China, Estados Unidos, França, Índia, Israel, Paquistão, Reino Unido e Rússia.

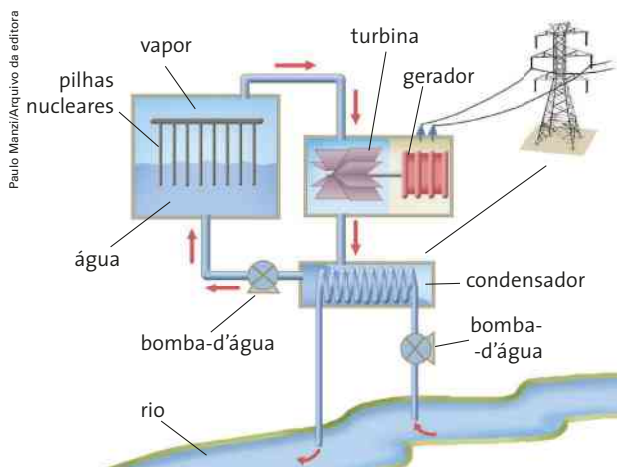
Está correto o que se afirma em:

- a) I, somente.
- b) II, somente.
- c) I e II, somente.
- d) II e III, somente.
- x e) I, II e III.**



O texto a seguir refere-se às questões 23 e 24.

A energia térmica liberada em processos de fissão nuclear pode ser utilizada na geração de vapor para produzir energia mecânica que, por sua vez, será convertida em energia elétrica. Abaixo está representado um esquema básico de uma usina de energia nuclear.



23. (Enem) Com relação ao impacto ambiental causado pela poluição térmica no processo de refrigeração da usina nuclear, são feitas as seguintes afirmações:

- I. O aumento da temperatura reduz, na água do rio, a quantidade de oxigênio nela dissolvido, que é essencial para a vida aquática e para a decomposição da matéria orgânica.
- II. O aumento da temperatura da água modifica o metabolismo dos peixes.
- III. O aumento da temperatura da água diminui o crescimento de bactérias e de algas, favorecendo o desenvolvimento da vegetação.

Das afirmativas acima, somente está(ão) correta(s):

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

24. (Enem) A partir do esquema são feitas as seguintes afirmações:

- I. A energia liberada na reação é usada para ferver a água que, como vapor a alta pressão, aciona a turbina.
- II. A turbina, que adquire uma energia cinética de rotação, é acoplada mecanicamente ao gerador para produção da energia elétrica.
- III. A água depois de passar pela turbina é pré-aquecida no condensador e bombeada de volta ao reator.

Dentre as afirmações acima, somente está(ão) correta(s):

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

25. (Enem) Na música “Bye, bye, Brasil”, de Chico Buarque de Holanda e Roberto Menescal, os versos

*puseram uma usina no mar
talvez fique ruim pra pescar*

poderiam estar se referindo à usina nuclear de Angra dos Reis, no litoral do estado do Rio de Janeiro. No caso de tratar-se dessa usina, em funcionamento normal, dificuldades para a pesca nas proximidades poderiam ser causadas:

- x a) pelo aquecimento das águas, utilizadas para refrigeração da usina, que alteraria a fauna marinha.
- b) pela oxidação de equipamentos pesados e por detonações que espantariam os peixes.
- c) pelos rejeitos radioativos lançados continuamente no mar, que provocariam a morte dos peixes.
- d) pela contaminação por metais pesados dos processos de enriquecimento do urânio.
- e) pelo vazamento de lixo atômico colocado em tonéis e lançado ao mar nas vizinhanças da usina.

26. (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.

27. (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

ação 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:

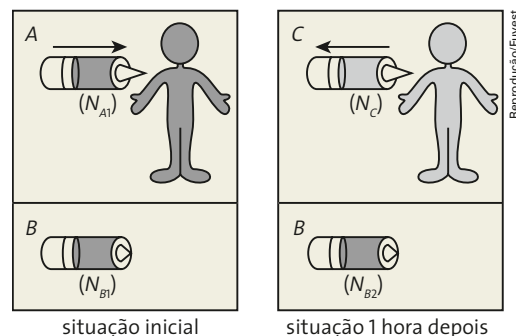
- x a) emitir radiações nocivas, por milhares de anos, em um processo que não tem como ser interrompido artificialmente.
- b) acumular-se em quantidades bem maiores do que o lixo industrial convencional, faltando assim locais para reunir tanto material.
- c) ser constituído de materiais orgânicos que 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.

28. (Enem) O funcionamento de uma usina nucleoeletrônica típica baseia-se na liberação de energia resultante da divisão do núcleo de urânio em núcleos de menor massa, processo conhecido como fissão nuclear. Nesse processo, utiliza-se uma mistura de diferentes átomos de urânio, de forma a proporcionar uma concentração de apenas 4% de material fissil. Em bombas atômicas, são utilizadas concentrações acima de 20% de urânio fissil, cuja obtenção é trabalhosa, pois, na natureza, predomina o urânio não fissil. Em grande parte do armamento nuclear hoje existente, utiliza-se, então, como alternativa, o plutônio, material fissil produzido por reações nucleares no interior do reator das usinas nucleoeletrônicas. Considerando-se essas informações, é correto afirmar que:

- a) a disponibilidade do urânio na natureza está ameaçada devido a sua utilização em armas nucleares.
- b) a proibição de se instalarem novas usinas nucleoeletrônicas não causará impacto na oferta mundial de energia.
- x c) a existência de usinas nucleoeletrônicas possibilita que um de seus subprodutos seja utilizado como material bélico.
- d) a obtenção de grandes concentrações de urânio fissil é viabilizada em usinas nucleoeletrônicas.
- e) a baixa concentração de urânio fissil em usinas nucleoeletrônicas impossibilita o desenvolvimento energético.

29. (Fuvest-SP) Uma substância radioativa, cuja meia-vida é de aproximadamente 20 minutos, pode ser utilizada para medir o volume do sangue de um paciente. Para isso, são preparadas duas amostras, A e B, iguais, dessa substância, diluídas em soro, com volume

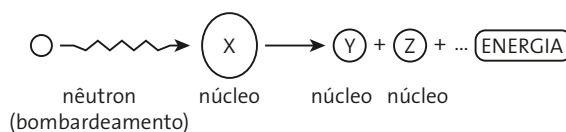
de 10 cm³ cada. Uma dessas amostras, A, é injetada na circulação sanguínea do paciente e a outra, B, é mantida como controle. Imediatamente antes da injeção, as amostras são monitoradas, indicando $N_{A1} = N_{B1} = 160\,000$ contagens por minuto. Após uma hora, é extraída uma amostra C de sangue do paciente, com igual volume de 10 cm³, e seu monitoramento indica $N_C = 40$ contagens por minuto.



- a) Estime o número N_{B2} , em contagens por minuto, medido na amostra de controle B, uma hora após a primeira monitoração. $N_{B2} = 20\,000$ cont/minuto
- b) A partir da comparação entre as contagens N_{B2} e N_C , estime o volume V , em litros, do sangue no sistema circulatório desse paciente. $V = 5\,000$ cm³

Note e adote: A meia-vida é o intervalo de tempo após o qual o número de átomos radioativos presentes em uma amostra é reduzido à metade. Na monitoração de uma amostra, o número de contagens por intervalo de tempo é proporcional ao número de átomos radioativos presentes.

30. (Uepa) Uma das maiores catástrofes da História foi a invenção e lançamento da bomba atômica nas cidades japonesas de Hiroxima e Nagasaki. O modelo abaixo representado foi a base para a construção da bomba atômica:



Em relação ao modelo, assinale a alternativa correta.

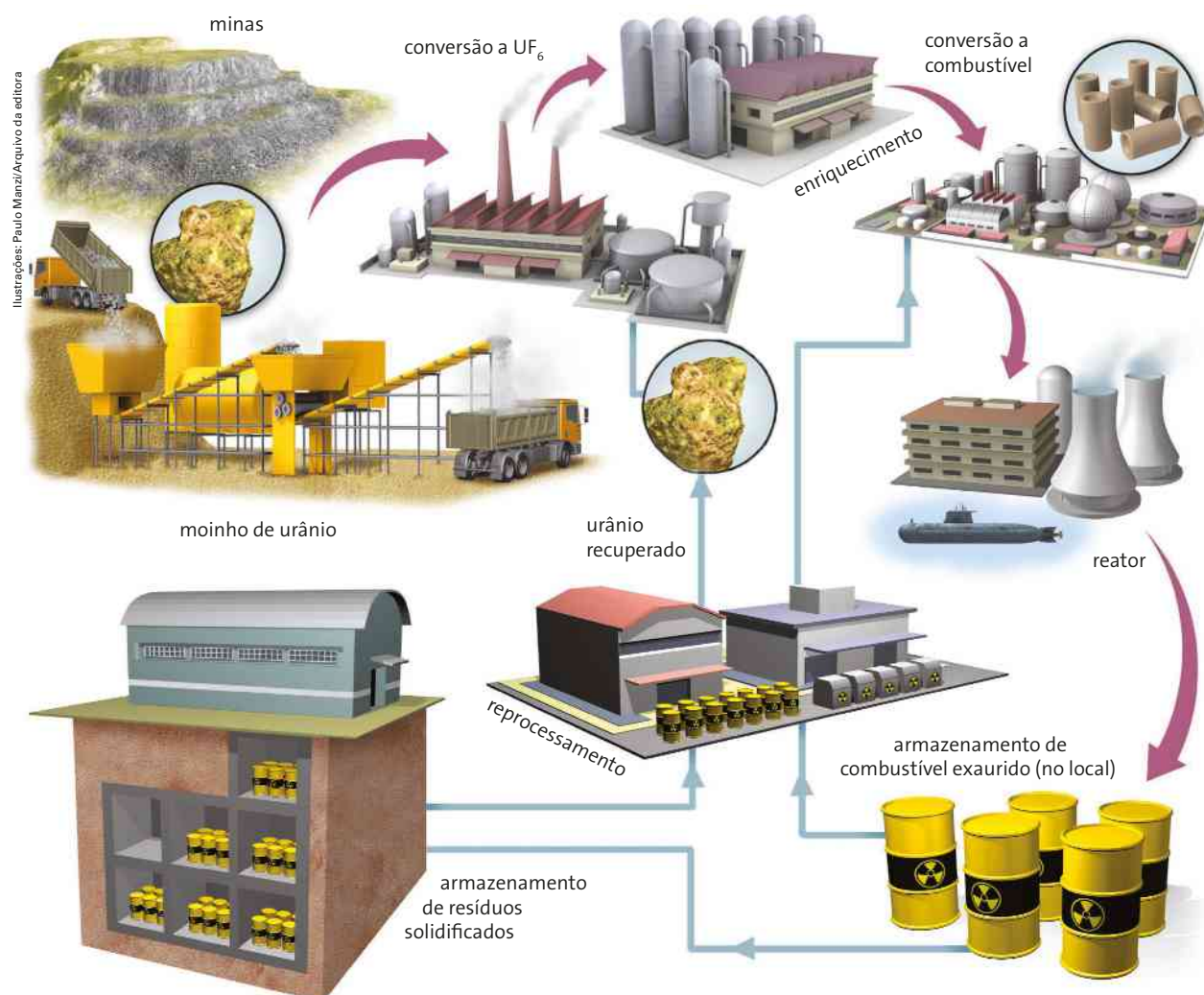
- a) Representa fissão e fusão atômica, seguida de liberação de energia.
- b) É uma representação de fusão nuclear.
- c) Representa fusão e fissão atômica, seguida de absorção de energia.
- x d) É uma representação de fissão nuclear.
- e) É uma representação de fusão atômica.

O ciclo do combustível nuclear

O ciclo do combustível nuclear envolve os processos físicos e químicos necessários à produção do combustível utilizado em reatores nucleares, bem como o descarte e o armazenamento dos resíduos e da parte não utilizada (o combustível exaurido). Os processos que ocorrem após a retirada do combustível exaurido do reator são particularmente importantes. Eles podem incluir o reprocessamento desse combustível para extração da porção do urânio e do plutônio que não foram utilizados e/ou o armazenamento dos resíduos com alto nível de radioatividade.

Mineração

O primeiro passo na produção de elementos combustíveis é a extração dos minérios que contêm urânio, por meio de métodos semelhantes aos usados para outros minérios metálicos, tais como a mineração a céu aberto e mineração no subsolo. Moinhos extraem o urânio dos minérios por meio de métodos químicos e o convertem em uma forma de óxido chamada “bolo amarelo”, a qual contém aproximadamente 70% a 90% de U_3O_8 . Esses óxidos são, então, enviados a uma usina onde ocorre o enriquecimento do ^{235}U .



Esquema ilustrativo do ciclo do combustível nuclear, da mineração até o descarte.

Enriquecimento do combustível

O enriquecimento é o empreendimento fundamental no ciclo do combustível nuclear. O principal método do enriquecimento do urânio até 3% de ^{235}U é o processo de **difusão gasosa**. Nesse método, o óxido de urânio é tratado com fluoreto de hidrogênio para que seja convertido em hexafluoreto de urânio (UF_6), que é um gás a alta temperatura. O UF_6 gasoso é forçado através de uma série de barreiras porosas delgadas. Uma vez que o hexafluoreto de ^{235}U tem uma massa molecular menor do que a do hexafluoreto de ^{238}U , deve ter uma velocidade maior à mesma temperatura. Ele vai, portanto, difundir-se ligeiramente mais rápido através das barreiras porosas. Utilizando-se muitas barreiras (mais de 1000 estágios), um enriquecimento até 2% a 3% de ^{235}U pode ser atingido. Esse processo de enriquecimento demanda muita energia, o equivalente a aproximadamente 10% da produção líquida da usina nuclear.

[...] Depois do enriquecimento, o UF_6 é convertido a dióxido de urânio (UO_2), que é enviado a uma instalação de processamento de combustível, onde as pastilhas cerâmicas são preparadas e seladas em tubos feitos de zircoloy. Os tubos carregados, ou elementos combustíveis, são então enviados ao reator nuclear.

Reprocessamento do combustível

Depois de aproximadamente três anos de uso em um reator, os elementos de combustível devem ser removidos, embora ainda contenham algum material fissil não utilizado. Esses elementos de combustível exaurido são armazenados sob a água em tanques no sítio do reator para aguardar o decaimento dos isótopos de vida curta.

[...] O reprocessamento do combustível do reator para extrair-se o urânio e o plutônio não utilizados tem sido considerado uma parte do ciclo do combustível nuclear. Nele, utiliza-se uma série de processos químicos de extração para se separar o urânio e o plutônio dos produtos de fissão produzidos nos elementos combustíveis durante a irradiação, e depois para separá-los um do outro. Depois de extraídos o plutônio e o urânio podem ser reciclados e reutilizados na usina.

[...] Os benefícios do reprocessamento do combustível nuclear são: 1) o aumento, de aproximadamente 30%, da energia disponível do urânio; 2) uma redução no custo da energia nuclear; 3) o desenvolvimento de uma tecnologia importante no reator de criação para a recuperação do plutônio produzido; 4) uma diminuição do problema de descarte de resíduos radioativos em razão da redução da quantidade de radioisótopos de vida longa.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, M. *Energia e meio ambiente*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. p. 368-372.

Trabalho com o texto

Veja respostas das atividades no Manual do Professor.

1. Por que é necessário o enriquecimento do ^{235}U para utilização no reator nuclear?
2. No processo de difusão gasosa, justifique por que o hexafluoreto de ^{235}U tem velocidade maior do que a do hexafluoreto de ^{238}U , à mesma temperatura.
3. O que são radioisótopos de vida curta e de vida longa?

Pesquise e discuta

4. Pesquise sobre o processo de enriquecimento de urânio que utiliza uma **centrifuga** e sobre o processo de **enriquecimento a laser**. Compare-os com o processo de **difusão gasosa**.
5. Pesquise sobre a utilização do plutônio em armas nucleares e discuta a seguinte questão: Os benefícios do reprocessamento do combustível são pequenos ou não em comparação com os riscos a longo prazo de se introduzir uma tecnologia que tem como um de seus produtos o plutônio de grau bélico?

CAPÍTULO 11

Cosmologia e partículas elementares

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

Babak Tafreshi/National Geographic

Constelação Cruzeiro do Sul.
Acima, em vermelho, é possível
observar a nebulosa Carina.

O professor André ensinou a seus alunos a razão da aparente perenidade do fundo estelar. Um dia antes, André mostrara a seu filho o Cruzeiro do Sul, assim como seu pai fizera há trinta anos, apresentando-lhe essa mesma constelação – que, quinhentos anos atrás, também serviu de guia aos navegantes nas Grandes Navegações.
Como localizar o Cruzeiro do Sul?



A criação

Veja comentários sobre este tópico no Manual do Professor.

É comum uma criança perguntar a seus pais: “Como foi que eu nasci?”. Há algumas décadas, na civilização ocidental, os pais responderiam que ela tinha sido trazida por uma cegonha – mas não demorava muito para a criança questionar de onde tinha vindo a cegonha...

Não queremos aqui julgar as respostas dadas às crianças nesta ou naquela época. Esse comentário serve apenas para destacar que a pergunta sobre a origem de tudo nos acompanha desde a infância, assim como acompanha a história humana desde os primórdios, com diferentes respostas, em diferentes civilizações.

Segundo o livro sagrado dos cristãos, a Bíblia, no início, Deus criou os céus e a Terra. Em seguida, criou a luz e fez a separação entre a luz e as trevas, criando assim o dia e a noite. E foi esse o primeiro dia. Nos quatro dias seguintes, Deus criou os mares, a terra seca, as plantas, o Sol, a Lua, as estrelas, as criaturas do mar e as aves. No sexto dia, criou os animais terrestres e, finalmente, o homem. No sétimo dia, Ele descansou (**figura 11.1**).

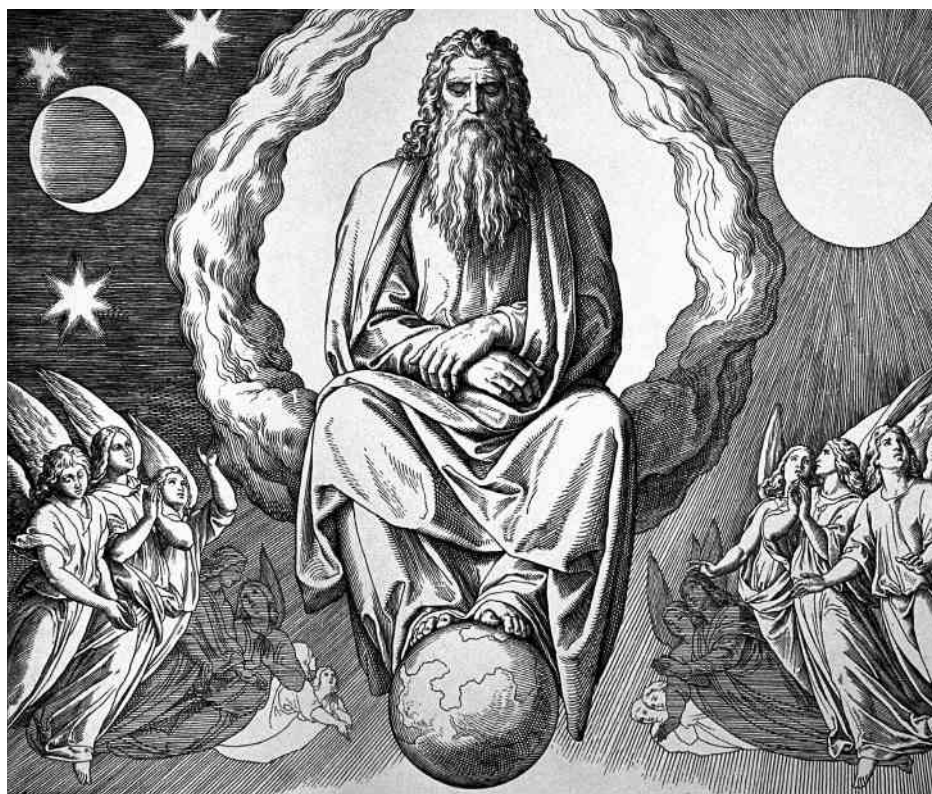


Figura 11.1 Depois de criar os céus e a Terra, Deus admira a sua obra. Gravura de Julius Schnorr von Carolsfeld, 1860.

Essa concepção não é uma exclusividade cristã: em diversas outras religiões, a origem do Universo também é percebida como um ato de criação intencional de um ser divino, externo ao Universo, que já existia antes de todas as coisas. Com base nessa concepção, de caráter religioso, surgiu o chamado **criacionismo** – nome genérico que designa as diversas correntes de pensamento que defendem, fora dos limites da religião, que a origem do Universo foi de fato um ato de criação.

Muitas associações religiosas propuseram, e algumas conseguiram, o ensino obrigatório do criacionismo nas escolas, particularmente na América do Norte. Devemos lembrar que outras culturas têm diferentes livros sagrados; há mitos da criação nas civilizações egípcia, asteca, chinesa, hindu e outras.

Rue des Archives/Other Images

Em fevereiro de 2009, comemoraram-se os 150 anos da publicação de *A origem das espécies*, de Charles Darwin (1809-1882). A data recebeu especial atenção de todos os setores da imprensa, que salientaram a importância da obra de Darwin.

Defensores do criacionismo alegam que a teoria da evolução das espécies, de Charles Darwin, não é completa. De fato, os mecanismos da genética e das mutações só vieram a ser compreendidos décadas depois da publicação dos estudos de Darwin. Em ciência, não há teoria completa, não há verdades acabadas, como discutimos no capítulo 1 do volume 1. É um erro básico de lógica achar que o fato de uma teoria ser incompleta dá validade para outra que sequer foi investigada. Além disso, essa postura derruba todos os avanços conseguidos no Renascimento, quando a ciência foi desatrelada da religião, separando-se razão e fé.

Por que estamos discutindo aqui algo que, aparentemente, só diz respeito à Biologia?

Primeiramente, as idades dos fósseis e o tempo proposto pela teoria de Darwin foram de extrema importância para a Física aprimorar o estudo da evolução da Terra e do Sistema Solar. Em segundo lugar, mas não menos importante, é que aceitar o criacionismo não significa apenas descartar a evolução das espécies, mas também abandonar todo o estudo da **Cosmologia**.

Cosmologia – Ramo da Astronomia que estuda a estrutura e a evolução do Universo em seu todo, preocupando-se tanto com a origem quanto com a evolução dele.

A criação em outras culturas

Apresentamos a seguir como outros povos, outras culturas, viam a criação do Universo, de acordo com Heather Couper (1949-) e Nigel Henbest (1951-), autores da obra *Big-bang* (São Paulo: Moderna, 1998. p. 26-27).

Os **antigos egípcios**, cuja civilização durou mais de dois milênios, acreditavam que o Universo começou quando o deus Atum surgiu, simplesmente chamando o seu próprio nome. Em seguida, Atum vomitou seu irmão e sua irmã, Shu e Tefnut, que, por sua vez, geraram o deus Geb (a Terra) e a deusa Nut (o céu) (**figura 11.2**). Todos os egípcios nasceram dos filhos de Nut e Geb. Todo ato da criação foi presenciado pelo Olho, que tudo vê, sem interferências.



Album ArtLatinstock

Figura 11.2 Na mitologia egípcia, os amantes Geb e Nut são separados um do outro para que possam existir os dias. À noite, eles voltam a se unir. Reconstrução de afresco de uma tumba em Tebas, no Vale dos Reis.



Figura 11.3 Segundo outra versão do mito chinês da criação, P'na-Ku, o criador, esculpiu a sua grande obra em meio a um redemoinho de nuvens.

Para os **antigos chineses**, o Universo surgiu de um imenso ovo cósmico contendo o *yin-yang*. Ali existiam todas as coisas e seu exato oposto. Dentro do *yin-yang* estava o deus P'na-ku: seus olhos transformaram-se no Sol e na Lua; sua respiração, no vento; seus cabelos, nas árvores e plantas; sua carne, na Terra; seu suor, na chuva; e, por fim, os vermes que corroeram seu corpo transformaram-se nos seres humanos (**figura 11.3**).

Os **astecas do México** tinham diversas lendas sobre a criação. Uma delas fala dos deuses Quetzalcoatl e Tezcatlipoca, que retiraram a deusa Coatlicue dos céus e dividiram-na em duas partes, criando o céu e a Terra. Seu corpo transformou-se em montanhas e vales; seus cabelos, em plantas. Mas Coatlicue estava infeliz com o que havia acontecido e exigia frequentes sacrifícios de corações humanos (**figura 11.4**).

Muitos dos mitos da **cultura hindu** sobre a origem do Universo têm como protagonistas deuses que surgiram ao proferirem seus nomes (**figura 11.5**). Alguns mitos descrevem grandes oceanos; outros envolvem ovos cósmicos. De acordo com uma dessas lendas, um oceano gerou um ovo de ouro. Após um ano, Prajapati surgiu do ovo. Ele descansou em sua casa durante mais um ano, antes de tentar falar. O primeiro som que ele emitiu tornou-se a Terra; o segundo, o céu; e o terceiro, as estações.

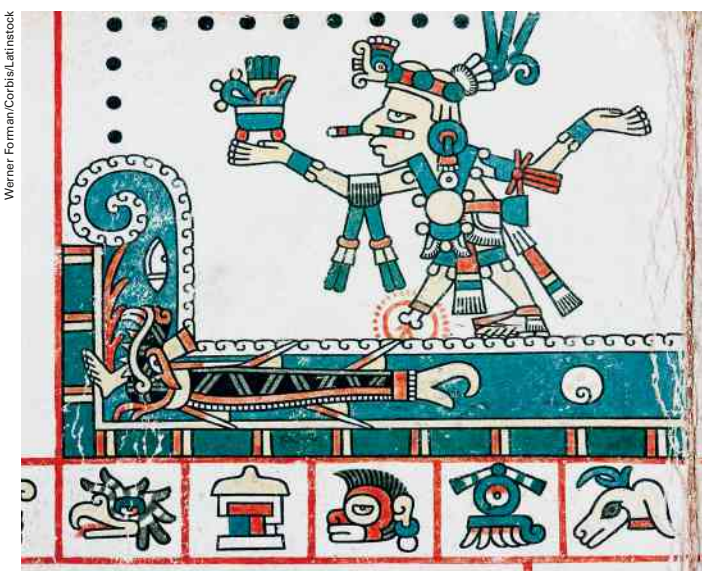


Figura 11.4 Em outro mito, Tezcatlipoca atraiu um monstro marinho para a superfície e ficou gravemente ferida. Seu corpo transformou-se na Terra.



Figura 11.5 Vishnu, um dos deuses hindus associados à criação.

Exercício



1. A partir do texto abaixo, responda às questões a seguir. **1. a) O primeiro, na Babilônia, enxergava a divindade no céu, enquanto no cristianismo o centro de tudo é o homem.** [...] Na Babilônia, a astrologia tinha enorme importância. Acreditava-se que os astros dirigiam a vida das pessoas e todos os acontecimentos da Terra. Por isso os planetas e as estrelas são considerados elementos centrais no mito da criação. Eles são tão importantes que as constelações recebem formas representando a imagem dos próprios deuses. Pelo contrário, no mito da Bíblia, o centro de tudo é o homem. Não se menciona a astrologia, e o homem é criado como uma imagem divina. Nos dois casos, esse é um aspecto estranho do mito: em que sentido os deuses possuem uma forma?

MARTINS, Roberto A. *O Universo: teorias sobre sua origem e evolução*. São Paulo: Moderna, 1994. p. 11.

- a) Qual é a diferença básica entre os dois mitos comentados?
- b) Atualmente, qual é a importância da Astrologia na vida das pessoas? **Muitas pessoas seguem horóscopos e acreditam na influência dos astros em seus destinos e temperamento. Sob esse aspecto, a Astrologia não pode ser ignorada. Por outro lado, ela não é científica.**



A vida de uma estrela

A compreensão da origem do Universo está intimamente ligada à existência das estrelas.

Uma galáxia é um grande conjunto de bilhões de estrelas e outros **objetos astronômicos**, tais como **nebulosas** e outros tipos de aglomerados, reunidos por forças gravitacionais e girando em torno de um centro de massa comum.

O motivo de começar nosso estudo da história do Universo pelas estrelas é que elas são as fornalhas em que foram formados todos os elementos químicos, a partir do hidrogênio.

A gigante vermelha

As fases da vida de uma estrela são determinadas por sua massa. Quanto maior a massa de uma estrela, mais curto é o seu ciclo de vida. A massa de uma estrela pode ser determinada, antes de seu nascimento, pela quantidade de matéria disponível em sua nebulosa.

Com o passar do tempo, o hidrogênio gasoso da nebulosa é agrupado pela ação da gravidade e, com isso, passa a girar mais rápido, pela conservação do momento angular, como ocorre com a bailarina que junta os braços ao corpo enquanto gira. À medida que o gás se agrupa e gira mais rápido, a porção central se aquece, formando uma **protoestrela**. A redução da energia potencial gravitacional acarreta o aumento da energia térmica.

Quando a temperatura atinge valores próximos a $1,5 \cdot 10^7$ K, a fusão nuclear se inicia no centro da nuvem: nasce uma **nova**. A nuvem começa a arder brilhantemente, contrai-se um pouco mais e torna-se estável. Assim se forma uma estrela da **sequência principal** – essa é a fase em que ocorre a fusão de hidrogênio em hélio –, que permanece brilhando por milhões ou bilhões de anos. É esse o estágio em que o Sol se encontra.

O hidrogênio presente no núcleo da estrela (ou **coração**, como chamam os astrônomos) é convertido em hélio, por meio da fusão nuclear, à medida que ela queima. Quando o hidrogênio (combustível) começa a faltar, a quantidade de calor produzida diminui, ocasionando a contração do núcleo. Então, a temperatura aumenta, em razão da transformação da energia potencial gravitacional em térmica, e as reações de fusão passam a ocorrer nas camadas externas, com a migração do hélio produzido para o núcleo.

As camadas mais externas da estrela, as quais contêm ainda muito combustível, começam então a se expandir. À medida que se expandem, elas esfriam e passam a brilhar avermelhadas. Assim a estrela atinge a fase de **gigante vermelha**, e está fora da sequência principal. Vermelha porque sua superfície é mais fria do que na sequência principal; gigante porque as camadas externas se expandem muito. Quando a temperatura atinge cerca de 10^8 K no coração da gigante vermelha, tem início a fusão do hélio, produzindo carbono.

Todas as estrelas evoluem da mesma maneira até a fase de gigante vermelha. A partir desse estágio, é a massa da estrela que vai determinar o seu caminho evolutivo.

Objeto astronômico –

Qualquer objeto presente no Universo que possa ser estudado pela Astronomia: estrelas, planetas, satélites, asteroides, cometas, aglomerados de matéria, nuvens de poeira cósmica, etc.

Nebulosa – Nuvem de gás e poeira cósmica em que predomina o elemento hidrogênio, embora contenha pequenas parcelas de outros elementos.

Para facilitar a comparação, a **figura 11.6** mostra os diferentes caminhos evolutivos de estrelas de baixa massa (como o Sol) e de estrelas massivas (com quatro vezes a massa do Sol ou mais) a partir da fase de gigante vermelha.

Para estrelas de baixa massa, como podemos ver na sequência de cima da **figura 11.6**, depois que o hélio é fundido em carbono, o núcleo novamente entra em colapso, isto é, sofre nova contração. Quando o núcleo colapsa, as camadas externas da estrela são expelidas, dando origem a uma **nebulosa planetária**. O núcleo permanece como uma **anã branca** – uma estrela fora da sequência principal – e finalmente esfria até se tornar uma **anã negra**.

Na sequência de baixo da **figura 11.6** está representado o ciclo da vida de uma estrela massiva. Assim como as estrelas de baixa massa, as massivas nascem de uma nebulosa, evoluem e vivem na sequência principal. Ao final da fase de gigante vermelha, contudo, o ciclo de vida de uma estrela massiva evolui de modo diferente: ela sofre uma **explosão de supernova**.

Depois dessa explosão, se o núcleo restante tiver uma massa entre 1,4 e 3 vezes a massa do Sol, ela não sobreviverá como uma anã branca estável: vai se transformar em uma **estrela de nêutrons**. Entretanto, se o núcleo restante tiver mais do que três vezes a massa do Sol, a força da gravidade vai superar as forças nucleares, fazendo com que prótons e nêutrons se combinem. O núcleo é então tragado pela sua própria gravidade, dando origem a um **buraco negro** – que prontamente atrai qualquer matéria e energia em suas proximidades.

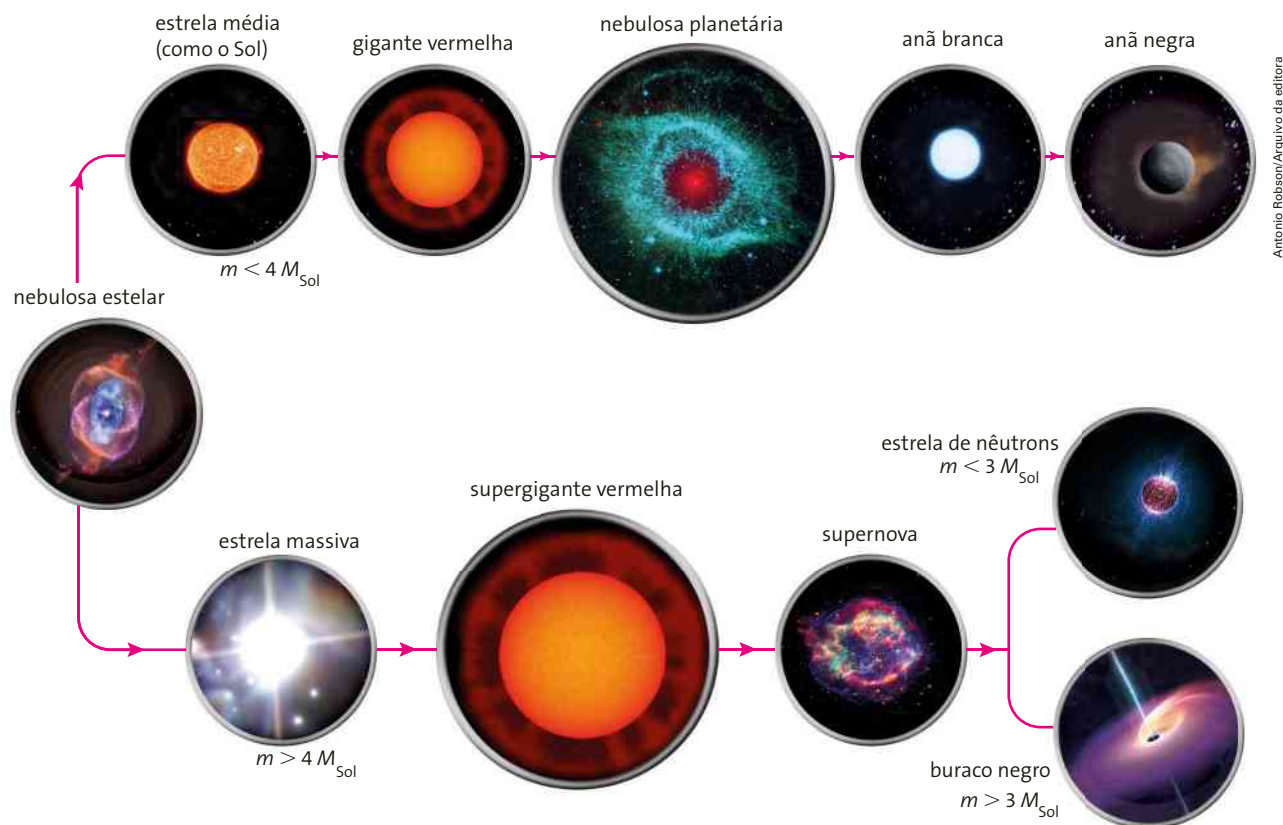


Figura 11.6 Sequência de transformações de uma estrela, conforme sua massa. Representações artísticas sem escala e em cores fantasia.

De gigante vermelha a supernova

Quando uma estrela com mais de $4 \cdot M_{\text{Sol}}$ (massa do Sol) atinge a fase de gigante vermelha (figura 11.7), a fusão do hélio no núcleo forma átomos de carbono e a sua temperatura aumenta. A força gravitacional continua a compactar os átomos de carbono, à medida que a temperatura cresce, e acontecem processos adicionais de fusão, formando oxigênio, nitrogênio e finalmente ferro.

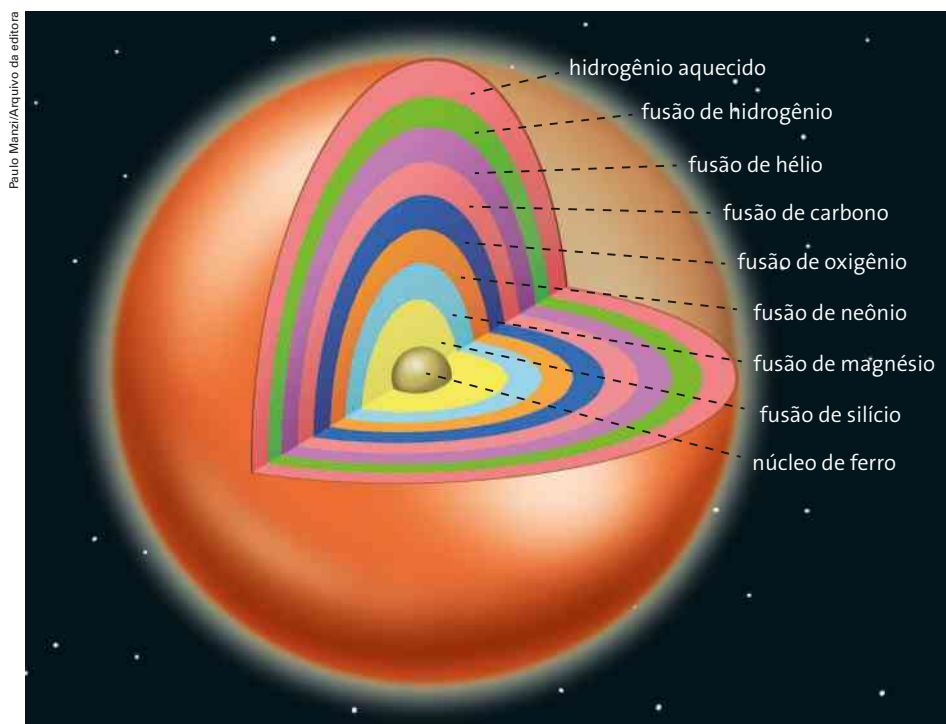


Figura 11.7 Processos em andamento numa estrela massiva em um instante próximo ao final da fase de gigante vermelha. Representação sem escala e em cores fantasia.

Quando o núcleo estiver composto basicamente de ferro, a fusão cessa. O ferro é o mais compacto e estável de todos os elementos. Isso quer dizer que a produção de elementos mais pesados que o ferro, a partir da fusão, requer uma entrada de energia maior que a liberada no processo. Uma vez que o núcleo da estrela não está mais irradiando energia, em menos de um segundo começa a fase final do seu colapso gravitacional. À medida que os átomos são fundidos, o núcleo da estrela atinge uma temperatura acima de 100 bilhões de graus Celsius.

A estrela começa a desabar sobre si mesma, até que a força repulsiva dos núcleos supera a força da gravidade e o coração se expande em um contragolpe, gerando uma onda de choque que constitui a explosão da supernova – fenômeno cuja duração é de cerca de 10 s.

Conforme a onda de choque vai encontrando os elementos das camadas mais externas, o material é violentamente aquecido, fundindo-se em novos elementos e isótopos radioativos. Enquanto muitos dos elementos mais comuns são formados no coração da estrela, a onda de choque da explosão da supernova dá origem aos elementos mais pesados e ejeta esse material para o espaço.

O material ejetado e o núcleo remanescente constituem os restos da supernova. Com exceção desse núcleo, que deixa de ser uma estrela da sequência principal, os restos da explosão se espalham pela nebulosa como poeira cósmica e, eventualmente, poderão vir a participar da composição de uma nova estrela.



Figura 11.8 Retrato de Karl Schwarzschild (1873-1916).

O buraco negro

No volume 1, capítulo 9, vimos como obter a velocidade de escape de um corpo lançado de um astro esférico, conhecendo-se a massa e o raio desse astro. Para que a velocidade de escape seja igual à da luz, a expressão é:

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R_s}}$$

Esse resultado foi obtido pelo físico e astrônomo alemão Karl Schwarzschild (**figura 11.8**). A partir dessa expressão, podemos escrever:

$$R_s = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$$

Nessa expressão, R_s é conhecido como **raio de Schwarzschild**. Qualquer objeto que se aproxime à distância R_s do centro de um buraco negro é tragado pela gravidade, e dele não se terá mais nenhuma informação. Esse raio delimita o chamado **horizonte de eventos** – superfície esférica a partir da qual nada se pode observar.

Mas como identificar um corpo do qual não recebemos luz nenhuma? Pelas influências gravitacionais que ele provoca ao redor de si, as quais podem dar origem a outras manifestações, como a emissão de raios X.

Observações mostram que a **supergigante** – estrela com massa trinta a quinhentas vezes a do Sol – catalogada como HDE 226868 (**figura 11.9**), distante 6 000 anos-luz da Terra, se aproxima e se afasta de nós de modo cíclico, a cada período de 5,6 dias. Essa regularidade sugere que essa estrela estaria descrevendo um movimento orbital – mas não se vê o corpo que ela estaria orbitando. Esse fato levou os astrônomos a admitir que esse corpo poderia ser um buraco negro.

A supergigante HDE 226868, com temperatura de superfície 31 000 K, orbita um objeto não visível, com massa estimada em 8,7 vezes a do Sol, o qual vai tragando matéria da estrela. Esses gases vão sendo acelerados, girando ao redor do objeto invisível, gerando o chamado disco de crescimento.



Martin Kommesar, ESA/ECF/Nasa

Figura 11.9 Representação (sem escala e em cores fantasia) do Sistema Cygnus X-1.

Exercícios



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

2. Talvez em razão da paixão pelo objeto de estudo, os astrônomos e cosmólogos falam da “vida” das estrelas como se elas realmente fossem seres vivos, embora sejam sistemas estritamente minerais. Aproximadamente, a vida de uma estrela na sequência principal até chegar à etapa de gigante vermelha é inversamente proporcional a $\sqrt{M^5}$, sendo M a massa da estrela.
 - a) Considere uma estrela que tenha massa igual a quatro vezes a massa solar. Quantas vezes a vida dessa estrela é menor que a do Sol na sequência principal? **32 vezes**
 - b) Considerando que a vida do Sol, antes de se tornar uma gigante vermelha, seja de cerca de 10 bilhões de anos, qual é o tempo de vida da estrela do item anterior? **310 milhões de anos**
3. O silício é um dos elementos mais utilizados atualmente na produção de circuitos integrados. Em que fase da vida de uma estrela esse elemento foi fabricado? **Na fase de gigante vermelha.**
4. Compare a reação de fusão de hidrogênio em hélio, que ocorre nas estrelas, com a reação de combustão da gasolina, que ocorre nos motores de automóveis. Considere que a fusão de 1 kg de hidrogênio em hélio libera $6,3 \cdot 10^{14}$ J e a combustão de 1 L de gasolina libera $4,6 \cdot 10^7$ J. A fusão de 1 kg de hidrogênio corresponde à queima de quantos litros de gasolina? **$14 \cdot 10^6$ litros de gasolina**

3 Origem do Sistema Solar

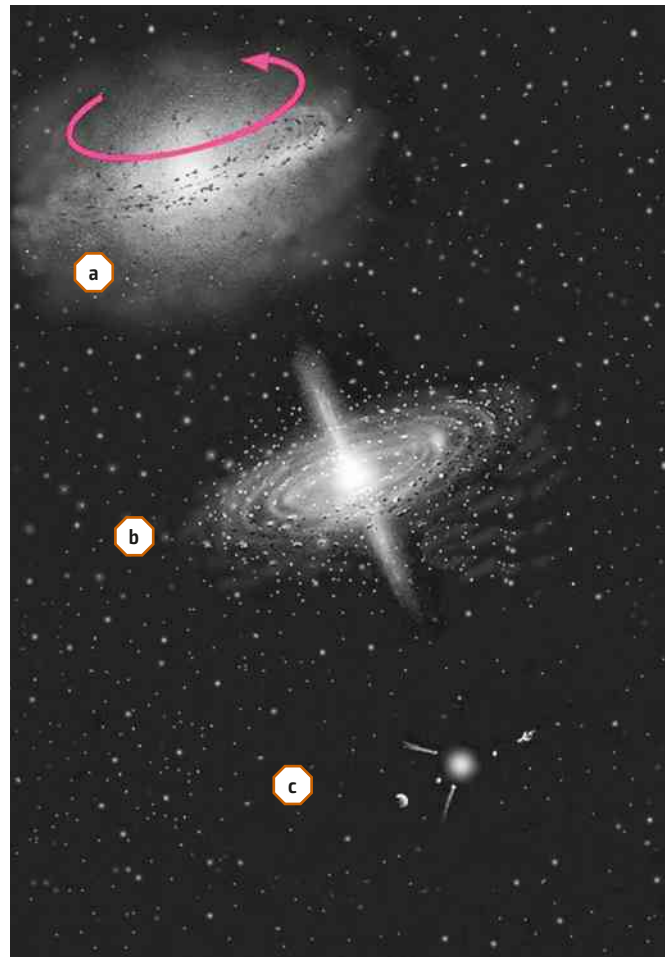
Uma peça-chave das evidências sobre a origem do Sistema Solar é o fato de que todos os planetas orbitam o Sol no mesmo sentido e aproximadamente no mesmo plano. No século XVIII, o filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) e o cientista francês Pierre-Simon Laplace (1749-1827), trabalhando independentemente, sugeriram que essas ocorrências não poderiam ser mera coincidência. Eles propuseram que o Sistema Solar teria sido formado de uma vasta nuvem girante, composta de gases e poeira cósmica, chamada **Nebulosa Solar**.

É consenso entre os astrônomos de hoje que Kant e Laplace estavam certos. Na visão moderna, a Nebulosa Solar inicialmente era similar ao que é mostrado na **figura 11.10.a** e tinha uma massa ligeiramente superior à massa atual do Sol.

Cada parte da nebulosa exerceu atração gravitacional em todas as outras. Esse puxão gravitacional mútuo fez com que a nebulosa se contraísse (**figura 11.10.b**). Durante essa contração, a concentração de matéria foi se tornando cada vez maior em sua porção central, formando uma região relativamente mais densa chamada de **protossol** – isso ocorreu por volta de 100 mil anos após o início da contração, quando a nebulosa desenvolveu a estrutura representada na **figura 11.10.c**. Essa parte da nebulosa finalmente evoluiu para o atual Sol. Já os planetas foram formados da matéria periférica mais esparsa, o que explica o fato de que a massa de todos os planetas juntos equivale aproximadamente a apenas 0,1% (um milésimo) da massa do Sol.

As temperaturas dentro do recém-nascido protossol rapidamente cresceram para vários milhares de graus. Enquanto a temperatura da superfície do protossol permaneceu praticamente constante, a do interior aumentou ainda mais por meio de posteriores contrações. Finalmente, decorridos cerca de 10 milhões de anos desde que a Nebulosa Solar começou a se contrair, a temperatura central do protossol atingiu alguns milhões de graus, dando origem a reações nucleares pelas quais o hidrogênio passou a se converter em hélio. Uma vez iniciadas essas reações, a contração cessou e uma verdadeira estrela nasceu. As reações nucleares no interior do Sol são hoje a fonte de toda a energia que ele irradia no espaço.

Se a Nebulosa Solar não tivesse inicialmente nenhum tipo de rotação, toda a matéria teria caído no protossol, isto é, nada teria sobrado para a formação dos planetas. Por outro lado, tendo essa nebulosa uma rotação global no início, à medida que ela se contraía, a velocidade de rotação aumentava, em virtude da conservação do momento angular.



Jon Lomberg/SPL/latinstock

Figura 11.10 Estágios em que a nebulosa vai se transformando em um disco na sequência de (a) para (c). Representação sem escala e em cores fantasia.

Conforme a Nebulosa Solar começou a girar mais rapidamente, também começou a se aplanar. Por ação da gravidade, as partículas tendem a orbitar o eixo de rotação da nebulosa, ao mesmo tempo que tendem a se aproximar umas das outras. Com isso, a nuvem girante foi se tornando cada vez mais plana, dispondo em discos as partículas que viriam a compor cada planeta. Assim se explica por que as órbitas dos planetas ocorrem hoje todas no mesmo sentido e praticamente no mesmo plano.

Embora a origem do Sistema Solar ainda não tenha sido comprovada, observações atuais têm constatado a existência de discos de material rodeando estrelas formadas recentemente – fato que reforça a crença na teoria da Nebulosa Solar. Eles são chamados de **discos protoplanetários**, porque os astrônomos acreditam que planetas serão formados a partir deles. Analisando esses supostos sistemas planetários em construção, os astrônomos podem ter uma ideia de como era a Nebulosa Solar 4,6 bilhões de anos atrás.

A **figura 11.11** mostra alguns discos protoplanetários da Nebulosa de Órion, uma região ativa que forma estrelas. Observe que há uma estrela visível no centro de cada disco, o que reforça a ideia de que o Sol começou a brilhar antes que os planetas fossem completamente formados. Além disso, um estudo de 110 estrelas da Nebulosa de Órion detectou discos protoplanetários em 56 delas, sugerindo que sistemas planetários podem se formar ao redor de uma fração substancial das estrelas.



Figura 11.11 Imagem de uma região da Nebulosa de Órion em que se observam discos protoplanetários.

Nasa/Science Source/Photo Researchers, Inc./Latinstock

Exercícios

5. As luas não possuem massas suficientes para gerar gravidade que segure o hidrogênio; portanto, na formação desses astros, assim como na Terra, a abundância dos outros elementos é, na verdade, escassez de hidrogênio.

5. Utilizando a equação referente à velocidade de escape, pode-se mostrar que a gravidade da Terra não é suficiente para reter hidrogênio, o elemento mais abundante no Universo. Desse modo, a abundância de elementos mais pesados em nosso planeta é, na verdade, a escassez de hidrogênio. Com essas considerações, explique por que os grandes planetas gasosos são orbitados por luas com composição semelhante à dos planetas terrestres.
6. Considerando as fases da vida de uma estrela, de onde provieram os elementos ouro, chumbo e urânio existentes em nosso planeta? Como são elementos de massa atômica superior à do ferro, foram produzidos na explosão de uma supernova.



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!



Nasa lança telescópio em busca de nova "Terra"

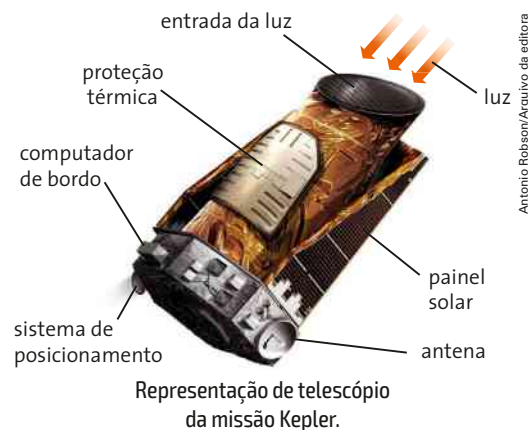
A Nasa lançou [em março de 2009] o primeiro telescópio espacial com capacidade de encontrar um planeta fora do Sistema Solar com tamanho e condições de habitabilidade semelhantes aos da Terra. A Missão Kepler vai monitorar a luminosidade de 170 mil estrelas simultaneamente para cumprir sua tarefa. Cada vez que o brilho de uma estrela cai, é sinal de que um planeta pode estar passando na sua frente.

Esse método, conhecido como "trânsito", já é usado por outros telescópios. O Kepler, porém, tem uma sensibilidade inédita. Um planeta do tamanho da Terra, se observado a distância, oculta apenas cerca de um décimo de milésimo da luz emitida por sua estrela-mãe, e o novo telescópio espacial poderá enxergar isso.

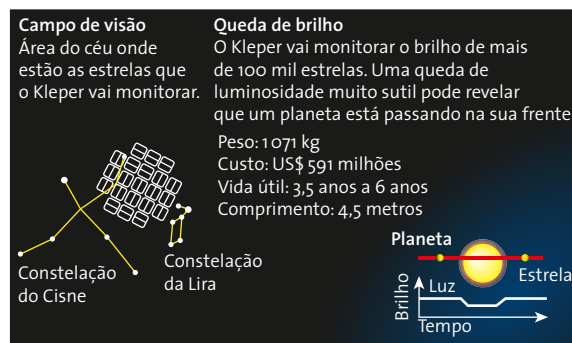
"Isso equivale à queda de luminosidade que ocorre quando uma pulga passa na frente do farol de um carro vindo na direção contrária a você, de noite, bem longe", disse [...] Jon Jenkins, da Nasa, um dos criadores do *software* que servirá como cérebro do Kepler.

[...]O Kepler não tira fotos do Universo bonitas o suficiente para enfeitar paredes. Seu papel será mesmo medir a emissão de luz de cada estrela e perceber mínimas oscilações. Contudo, só depois de análises cuidadosas de dados é que cientistas poderão dizer onde estão os tão procurados planetas "gêmeos" da Terra. O problema é que o brilho de estrelas oscila naturalmente, atrapalhando as medições. Segundo Sylvio Mello, astrônomo da USP, saber se as oscilações ocorrem sozinhas ou por causa dos planetas será "o maior desafio técnico" do Kepler. Para decretar o achado de um planeta, é preciso ver pelo menos três trânsitos com quedas de brilho semelhantes e separados pelo mesmo intervalo.

[...]O Kepler gira em torno do Sol, na mesma órbita da Terra, seguindo-a. A vantagem de estar no espaço é que não há ar para atrapalhar a visão. Além disso, como a Terra gira, um telescópio terrestre não é capaz de observar uma mesma estrela continuamente.[...]



Antonio Robson/Arquivo da editora



Formato/Arquivo da editora

Este telescópio espacial é o primeiro com capacidade de encontrar planetas tão pequenos quanto a Terra.

O interesse em procurar planetas pequenos é que aqueles muito grandes – chamados de gigantes gasosos – não possuem uma superfície sólida com condições habitáveis. Entretanto, lembra Mello, habitável não significa habitado. E ainda não há muito como tentar investigar se um planeta fora do Sistema Solar tem vida. "Seria muita casualidade encontrar algo logo de saída", diz.

Adaptado de: MIOTO, Ricardo. *Folha de S.Paulo*, 4 mar. 2009.

1. De acordo com o texto, o que é "trânsito" de um planeta?
2. Quantos trânsitos os astrônomos julgam necessário observar para decretar a existência de um planeta?



O Universo

No tópico 1, discutimos algumas versões mitológicas sobre a origem do Universo em algumas culturas. Vejamos agora o ponto de vista científico.

Compreendendo as fases da vida de uma estrela, podemos entender a formação dos elementos químicos presentes no Universo. Até a fase de gigante vermelha, temos a formação dos elementos mais leves, como o ferro. Na explosão da supernova, obtemos os elementos de maior número atômico. Depois os elementos passam a fazer parte da poeira interestelar de uma nebulosa. A partir desse ponto, é possível então formular a teoria da formação dos sistemas.

Mas e as primeiras nebulosas, de onde vieram? Essa pergunta nos remete ao estudo das origens do Universo – a Cosmologia.

O Universo finito

À medida que nos afastamos de um alto-falante, o som vai ficando cada vez mais fraco. O mesmo acontece quando nos distanciamos de uma lâmpada. À medida que nos afastamos, ela vai parecendo cada vez mais fraca; seu brilho aparente vai diminuindo. Por que isso ocorre?

Supondo que a lâmpada emita radiação uniformemente em todas as direções, essa energia se distribui em esferas cada vez maiores (figura 11.12). Assim, a energia recebida por unidade de área (e por unidade de tempo) vai ficando cada vez menor. Podemos dizer que, à medida que nos afastamos da fonte, a potência vai se distribuindo em uma esfera cada vez maior.

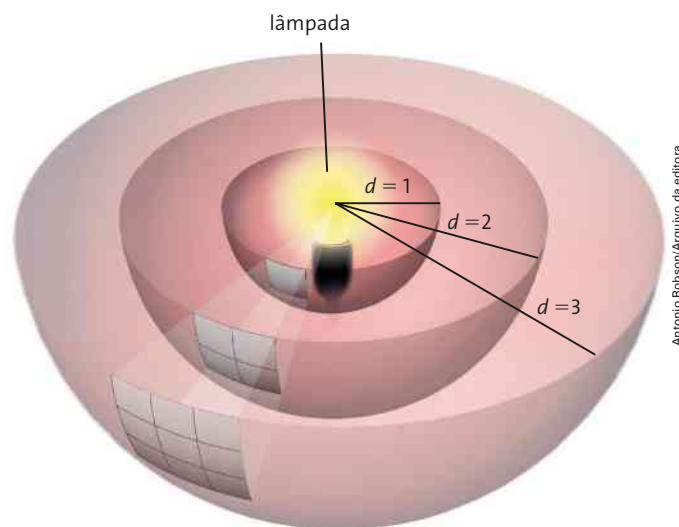


Figura 11.12 Dobrando-se a distância, a intensidade se reduz a $\frac{1}{4}$; triplicando-se, a redução chega a $\frac{1}{9}$ do valor original.

Representação sem escala e em cores fantasia.

Em relação às estrelas, conhecendo-se a potência irradiada por uma estrela (brilho real), podemos, pelo brilho aparente b , determinar a sua distância, ou vice-versa.

Considerando que a potência está distribuída pela superfície em uma esfera, cujo raio é a sua distância até a estrela, e cuja área é $A = 4\pi \cdot d^2$, o brilho aparente é dado por:

$$b = \frac{P}{4\pi \cdot d^2}$$

Por exemplo, no caso do Sol, a potência que ele irradia é $3,86 \cdot 10^{26}$ W. Qual é a intensidade luminosa b recebida por nós nas camadas mais altas da atmosfera, se estamos a $1,5 \cdot 10^{11}$ m dessa estrela?

Substituindo na expressão anterior, temos:

$$b = \frac{3,86 \cdot 10^{26}}{4\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{11})^2} \Rightarrow b = 1365 \frac{\text{W}}{\text{m}^2},$$

que é o valor obtido experimentalmente.

As estrelas têm brilhos reais diferentes, que dependem de suas idades e tamanhos; mas se tivéssemos um tipo de estrela com brilho padrão, pelo brilho aparente poderíamos determinar sua distância. Isso foi conseguido no começo do século XX, com a descoberta das **cefeidas**.

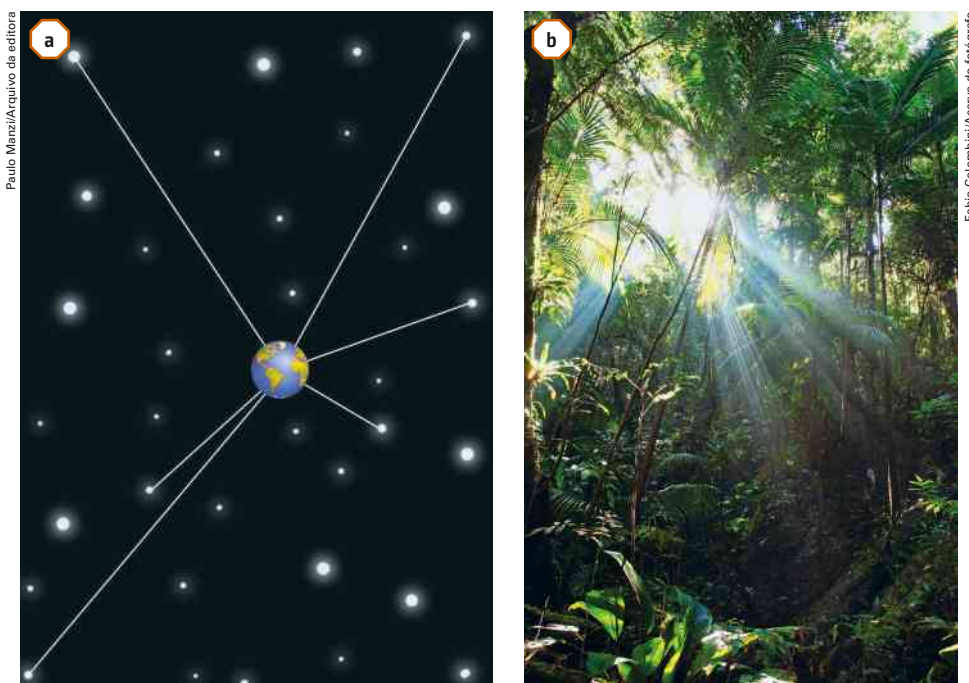
Por que, com tantas estrelas, o fundo celeste é escuro à noite? Essa pergunta, embora pareça tola, é um bom começo para a compreensão do Universo.

Por muito tempo, o Universo foi considerado infinito e eterno. Isaac Newton (1643-1727) o considerava assim, no século XVII, quando enunciou a sua célebre teoria da gravitação. Contudo, no começo do século XIX, o astrônomo amador alemão Heinrich Olbers (1758-1840), retomando uma questão já abordada antes por diversos cientistas (incluindo Johannes Kepler (1571-1630), em 1610), propôs que a escuridão das noites seria uma prova de que o Universo não era infinito nem eterno.

Olbers argumentou que, se o Universo fosse infinito, povoado por um número infinito de estrelas, qualquer que fosse a direção para a qual olhássemos no céu, à noite, encontraríamos uma estrela; portanto, o céu noturno deveria se apresentar brilhante em todas as direções (**figura 11.13.a**).

Para entender melhor essa argumentação, imagine-se embrenhado em uma floresta extensa, constituída apenas por árvores (**figura 11.13.b**). Olhando ao seu redor, você verá as árvores mais próximas bem espaçadas umas das outras; por outro lado, as árvores mais distantes preencherão todo o seu campo de visão, isto é, para qualquer lado que você olhe, verá apenas árvores.

Cefeida – Estrela que apresenta variações regulares de brilho.



Fábio Colombini/Arquivo do fotógrafo

Figura 11.13 Representação esquemática da visão que um observador teria, a partir da Terra, se houvesse no Universo um número infinito de estrelas (a). Visão de um observador embrenhado em uma floresta (b).

Na tentativa de derrubar o argumento de Olbers, alguns defensores da infinitude do Universo propuseram a seguinte explicação: sendo o Universo infinito, a luz emitida por estrelas infinitamente distantes ainda não teria chegado até nós, o que explicaria a escuridão do céu noturno. Entretanto, em um Universo eterno, qualquer que fosse a distância de uma estrela à Terra, a luz emitida por ela no passado já teria tido tempo de chegar até nós.

Essa contradição entre a ideia de um Universo infinito (em termos de tempo e de espaço) e a escuridão das noites ficou conhecida como paradoxo de Olbers – uma questão que só encontrou uma resolução razoável no século XX.

No Universo de Newton, os relógios tinham eternamente o mesmo ritmo, quaisquer que fossem suas posições e velocidades no espaço, e a luz propagava-se em linha rigorosamente reta, em todas as direções. Essa visão foi modificada pela teoria da relatividade, de Albert Einstein (1879-1955). Primeiro com a relatividade restrita, em 1905, segundo a qual relógios em diferentes estados (em termos de velocidade e posição) apresentam diferentes indicações, ou seja, essa teoria interligava tempo e espaço. Mais tarde, em 1916, Einstein apresentou a teoria da relatividade geral, levando em conta também os campos gravitacionais e interligando o espaço-tempo com a matéria. Nessa teoria, a presença da matéria encurva o que os físicos gostam de chamar de “tecido” do espaço-tempo.

É difícil para qualquer um de nós, num primeiro momento, entender a ideia de um Universo curvo, porque nossa visão de mundo é tridimensional.

O Universo em expansão

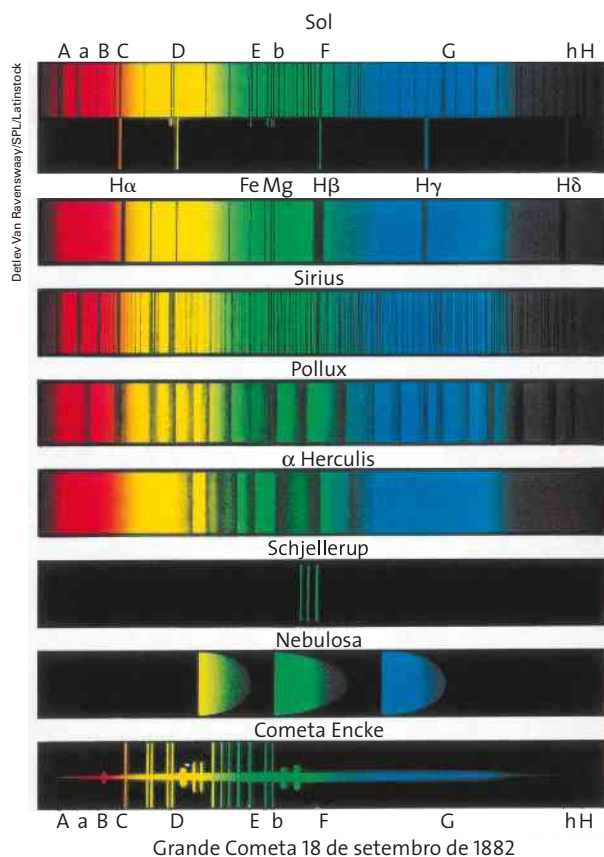
A luz emitida pelas estrelas permite determinar, além de sua composição química, se ela está se afastando ou se aproximando da Terra.

Cada elemento químico emite luz com comprimentos de onda bem definidos (o comprimento de onda está associado à cor da luz).

Esses comprimentos de onda podem ser identificados decompondo-se a luz em seus componentes fundamentais. Isso pode ser conseguido utilizando, por exemplo, um prisma de vidro. Um exemplo do resultado da decomposição, o chamado **espectro de emissão**, pode ser visto na [figura 11.14](#). As linhas que se observam no espectro são denominadas **raias espectrais**, e cada uma corresponde a um comprimento de onda.

Se o objeto que emite a luz se move em relação ao observador, as raiaes espectrais se deslocam. Elas tendem para o azul se o objeto se aproxima e para o vermelho se ele se afasta. A magnitude do deslocamento permite determinar a velocidade da fonte. Esse fenômeno é conhecido pelo nome de “efeito Doppler”.

Figura 11.14 Raias espectrais do Sol e outros corpos celestes.



Ao analisar a luz emitida por galáxias distantes, o astrônomo estadunidense Edwin Hubble (1889-1953) notou que os comprimentos de onda observados eram maiores do que os valores esperados caso a fonte de luz estivesse em repouso, isto é, as raías espectrais deslocavam-se para o lado vermelho do espectro. Esse fenômeno foi denominado **desvio para o vermelho**, sendo mais conhecido pelo nome em inglês de *redshift*. Quanto mais distante estivesse a galáxia, maior o desvio observado.

Tendo em mãos medidas efetuadas por outros cientistas, que mostravam galáxias remotas afastando-se da Terra, Hubble estabeleceu em 1929 uma relação simples entre as distâncias dessas galáxias à Terra e suas respectivas velocidades de afastamento: estas são diretamente proporcionais às distâncias. Mas como ele obteve as distâncias de galáxias tão remotas? Usando as propriedades das cefeidas, descobertas anos antes por Henrietta Leavitt (1868-1921). O gráfico da **figura 11.15** ilustra resultados atuais sobre a relação entre as distâncias das galáxias e a velocidade de afastamento.

Matematicamente, podemos então escrever:

$$v = H \cdot d$$

Nessa expressão, d é a distância entre nós e a galáxia e H é a constante de proporcionalidade, conhecida como constante de Hubble, cujo valor é $H = 7 \cdot 10^{-11} \text{ ano}^{-1}$, com uma margem de erro em torno de 10%.

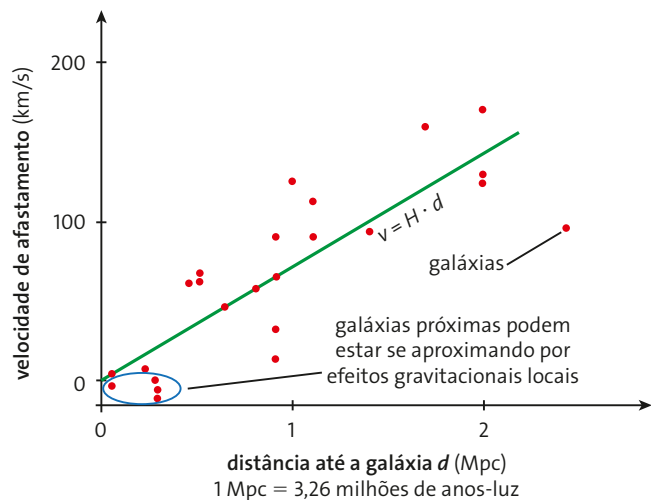
Observe que a reta média que representa graficamente a proporcionalidade da lei de Hubble não contém exatamente todos os pontos, isto é, há uma incerteza no valor de H . Além disso, como ilustra o gráfico, galáxias próximas podem até ter um movimento relativo de aproximação, por efeitos gravitacionais locais. Em outras palavras, a lei de Hubble se aplica a distâncias muito maiores que as intergalácticas.

Se as galáxias estão todas se afastando de nós, então somos o centro do Universo? A resposta é: não! Para ilustrar a expansão do Universo, podemos utilizar a seguinte analogia: imagine um balão de aniversário com várias moedas coladas na face externa. As moedas representam as galáxias. Conforme o balão vai sendo inflado, as moedas se afastam. Todas se afastam de todas, mas as moedas em si não se expandem – em analogia com as galáxias, que mantêm suas dimensões pela ação gravitacional. No interior das galáxias, a perenidade do espaço se mantém, como imaginava Newton; portanto, nossas órbitas, assim como este livro e nossos corpos, não estão crescendo com a expansão do Universo.

Além disso, nenhuma moeda é o centro da expansão. Da mesma forma, no Universo tridimensional curvo em expansão, todas as galáxias se afastam entre si e nenhum ponto é o centro.



Gráfico da lei de Hubble



Fonte: Australia Telescope National Facility. Disponível em: <www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/hubble.html>. Acesso em: maio 2016.

Figura 11.15

Banco de Imagens/Arquivo da editora

A teoria do big-bang

A lei de Hubble mostra que o Universo vem se expandindo por bilhões de anos. Isso significa que, no passado, a matéria estava mais concentrada e, portanto, a densidade do Universo era maior do que é hoje. Há bilhões de anos (**figura 11.16**), houve um momento em que a matéria estava praticamente concentrada em um ponto, chamado de **singularidade**, cuja densidade era gigantesca. Seguiu-se daí uma “explosão”, o *big-bang*, e teve início a expansão. O termo explosão está entre aspas porque esse modelo não deve ser confundido com a explosão de um objeto em um espaço vazio, já que o próprio tecido do espaço não existia ao redor da singularidade original.

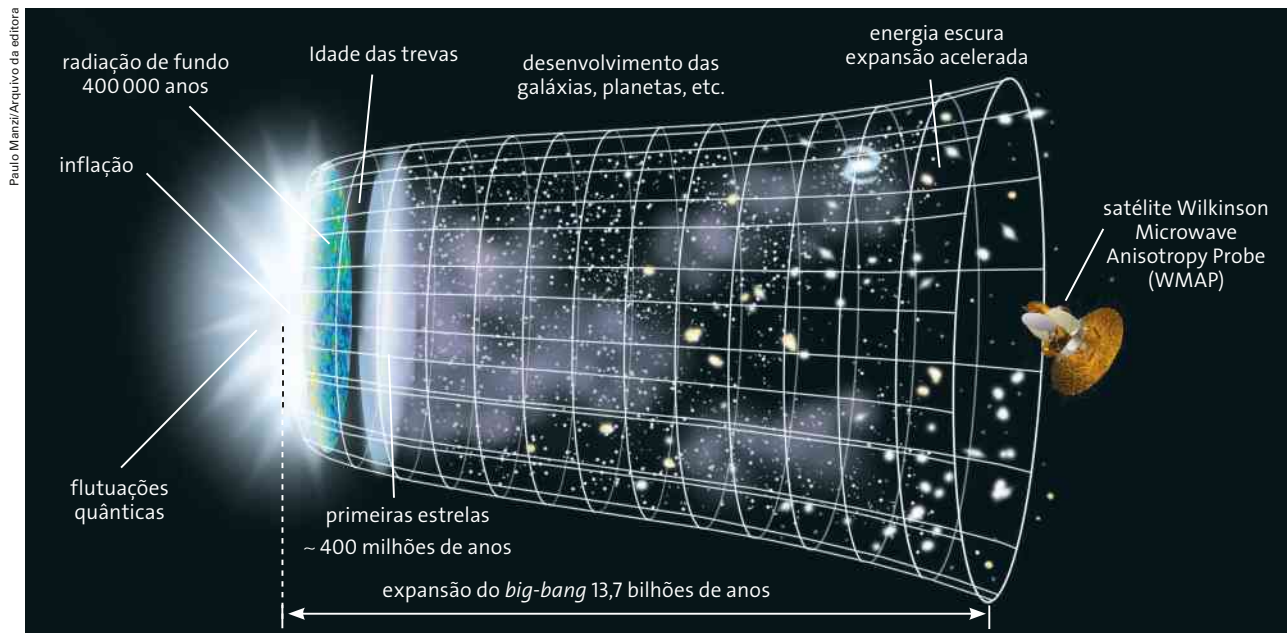


Figura 11.16 Linha do tempo cósmica. Representação sem escala e em cores fantasia.

Em geral, ao primeiro contato com essas ideias, é comum as pessoas perguntarem: mas, e antes disso?

Na verdade, dentro desse modelo, a pergunta não tem sentido. Não existe o “antes”, pois, sem matéria nem espaço, o conceito de tempo perde o sentido.

Exercício resolvido

Considere uma galáxia remota situada a uma distância d . Se no momento do *big-bang* toda a matéria do Universo estava praticamente junta, o tempo que essa galáxia levou para se separar de nós seria a idade do Universo. Nessas condições, qual é a idade do Universo, supondo que a separação dessa galáxia tenha acontecido com velocidade constante?

Resolução:

Sendo $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, temos $v = \frac{d}{T_0}$, em que T_0 seria a idade de nosso Universo. Igualando com a expressão da lei de Hubble, obtemos:

$$\frac{d}{T_0} = H \cdot d \Rightarrow T_0 = \frac{1}{H}$$

Usando-se o valor padrão: $H = 7 \cdot 10^{-11} \text{ ano}^{-1}$, temos para a idade do Universo o valor:

$$T_0 = 14 \text{ bilhões de anos}$$

Considerando-se as margens de erro, a idade do Universo é atualmente estimada entre 12 e 16 bilhões de anos.

Evidências experimentais do modelo do *big-bang*

O hidrogênio é o elemento mais simples da natureza. Inicialmente, os modelos cosmológicos consideravam que todos os outros elementos seriam produzidos a partir do hidrogênio, nas fornalhas das estrelas e nas explosões de supernovas.

No entanto, as observações mostravam que a quantidade de hélio presente no Universo era muito maior do que o que poderia ter sido “fabricado” pelas estrelas (figura 11.17).

Pouco depois da Segunda Guerra Mundial, os físicos estadunidenses Ralph Alpher (1921-2007) e Robert Hermann (1914-1997) propuseram que o Universo, imediatamente após o *big-bang*, teria sido extremamente quente, deflagrando reações nucleares em todos os pontos do pequeno espaço, o que explicaria que a origem do hélio não são as estrelas. Esse “extremamente quente” quer dizer uma temperatura pelo menos igual à do núcleo solar, onde ocorrem as reações de fusão ($\sim 10^8$ K). Com o prosseguimento da expansão, porém, o Universo teria esfriado gradativamente. Com isso, cerca de 380 mil anos depois do *big-bang*, teria começado a chamada fase da **recombinação**, na qual os elétrons teriam se combinado com os núcleos, formando os átomos, a uma temperatura aproximada de 3 000 K. Antes disso, o Universo teria sido opaco.

Seguindo essa ideia, em 1960, Robert Henry Dicke (1916-1997) e Phillip James Edwin Peebles (1935-) consideraram a radiação emitida por esse “corpo opaco” – a chamada radiação de corpo negro do Universo – no início da fase de recombinação e como ela deveria estar hoje. As características dessas radiações dependem da temperatura do corpo negro.

Uma pergunta comum para quem começa a estudar Cosmologia é em que lugar aconteceu o *big-bang*. A resposta é: em todos os pontos do nosso espaço-tempo, uma vez que todos eles se originaram da singularidade. Cada um deles é, por assim dizer, um pedaço da singularidade inicial.

Sendo assim, a radiação procurada por Dicke e Peebles deveria provir, de maneira praticamente uniforme, de todas as regiões do Universo. Outro cuidado que a dupla de cientistas teve foi o de considerar o *redshift* dessa radiação pela expansão do Universo nesses 14 bilhões de anos. Seus cálculos apontaram que o Universo estaria hoje banhado por uma radiação equivalente à emitida por um corpo negro que estivesse à temperatura de 2,7 K.

Os procedimentos experimentais verificaram não só a existência de radiação que provinha de maneira praticamente uniforme de todas as direções, como também que ela correspondia exatamente à radiação de um corpo negro a 2,7 K – exatamente o valor previsto na teoria. Essa radiação é chamada de **radiação de fundo**. É uma das principais fontes de informação dos primórdios de nosso Universo.

A abundância relativa, tanto dos elementos mais pesados, quanto dos mais leves, é também um resultado em acordo com a teoria do *big-bang*.

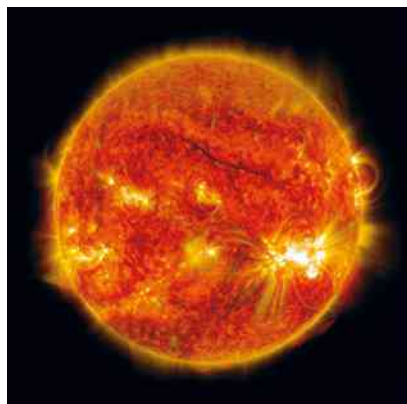


Figura 11.17 O Sol contém cerca de 25% de hélio, muito mais do que ele poderia ter produzido em sua vida como estrela. Imagem da explosão solar ocorrida em 26 de outubro de 2014.

Futuro do Universo

As hipóteses em Cosmologia para o futuro do Universo são, de certa maneira, mais filosóficas e menos experimentais do que em outras áreas da Física. Uma das razões é que não se dispõe de vários Universos para levar a cabo uma sequência de experimentos no laboratório; outra é que as escalas de tempo em Cosmologia são muito, mas muito, maiores que a vida média de um pesquisador, ou mesmo de uma espécie.

Um exemplo do ponto de vista filosófico: no começo do século XVI, Nicolau Copérnico (1473-1543) considerou que não ocupávamos um lugar especial no espaço, elaborando sua teoria heliocêntrica.

Hoje sabemos que a Terra não é uma referência privilegiada, e que o Sistema Solar é apenas um dos vários sistemas planetários que dia a dia são descobertos. Sabemos também que nossa galáxia, a Via Láctea, é semelhante a muitas outras.

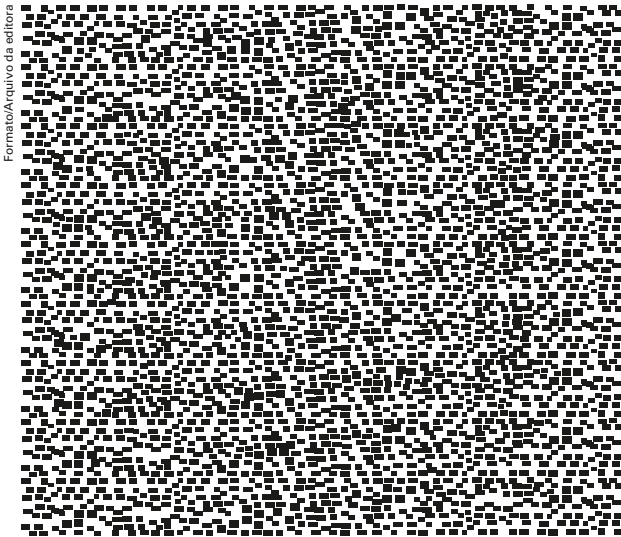


Figura 11.18 Observe o retângulo de diferentes distâncias. Ele é cinza ou é um conjunto de pontos pretos e brancos?

Einstein considerou que, em larga escala (grandes grupos de galáxias), nosso Universo é praticamente uniforme, hipótese, predominante entre os cosmólogos até hoje, conhecida como **princípio cosmológico**. Exemplificando: se você olhar para a **figura 11.18** a uma distância superior a 1,0 m, dirá que todos os pontos são cinza, que não há regiões diferentes. No entanto, ao olhar de perto, perceberá que há regiões brancas e regiões pretas. Em larga escala, a pintura do desenho é uniforme, mas numa visão próxima, há diferenças.

Usando o princípio cosmológico, Einstein aplicou a sua teoria da relatividade geral (1916), considerando um Universo estático (a lei de Hubble ainda não havia sido formulada), e obteve a chamada constante cosmológica.

Com a descoberta de Hubble, Einstein admitiu que sua constante cosmológica havia sido o maior engano de sua vida. No entanto, o trabalho de Einstein serviu de base para novas pesquisas, pois deu origem a conjecturas sobre qual seria o valor exato dessa constante.

Trabalho em equipe

Façam uma pesquisa, sob a orientação do professor, sobre como as diversas civilizações compreenderam a Astronomia através dos tempos. Com um painel, apresentem sua pesquisa para os colegas.

Exercícios

7. Segundo Heinrich Olbers, como seriam as noites se o Universo fosse infinitamente povoado de estrelas?
As noites seriam esplendorosamente claras.
8. Cite um exemplo cotidiano que ilustra o efeito Doppler. *A variação na frequência do som de uma buzina ouvida por uma pessoa em movimento em relação à fonte sonora.*





Os tijolos da matéria

De que é feito o mundo? Quais são os elementos fundamentais constituintes da matéria? Filósofos e cientistas vêm levantando essas questões há milhares de anos. Ainda não temos o que poderia se chamar de uma resposta final, mas já trilhamos um longo caminho.

Durante anos, prótons, nêutrons e elétrons foram considerados as partículas elementares constituintes da matéria. Mas, na década de 1960, experimentos contribuíram para que os cientistas chegassem à conclusão de que prótons e nêutrons **não** são partículas elementares. Eles têm uma estrutura interna constituída de outras partículas que receberam o nome de **quarks**.

Por que um nome tão estranho? Os físicos estavam um pouco desapontados com os nomes escolhidos ao longo da História e que depois não se mostraram adequados, senão conceitualmente errados; por exemplo: calor específico (supondo que os corpos continham calor) e átomo (indivisível). Assim, foi escolhida uma palavra sem significado, tomada de um neologismo de James Joyce (1882-1941), na obra da literatura irlandesa *Finnegans Wake* (“Three quarks for Muster Mark!” ou “Três ‘quarks’ para Muster Mark!” em tradução livre). Se, no futuro, o *quark* se revelar, por exemplo, divisível, não haverá problema com o nome escolhido para ele.

Na matéria comum os *quarks* se apresentam em dois tipos: *quarks up* (*u* – para cima) e *quarks down* (*d* – para baixo). Estes, também, são apenas nomes figurativos, para diferenciar os dois tipos. Os *quarks up* têm carga $+\frac{2}{3}e$, enquanto os *down* têm $-\frac{1}{3}e$.

As partículas formadas pela composição de *quarks* são chamadas **hádrons**, como os prótons e os nêutrons. O próton tem 2 *quarks up* e um *quark down*, enquanto o nêutron é composto de 2 *quarks down* e 1 *quark up* (figura 11.19).

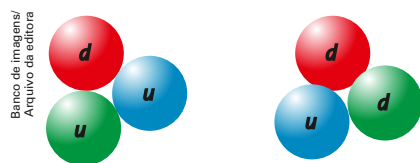


Figura 11.19 Composição e carga elétrica de um próton e de um nêutron. Representação sem escala e em cores fantasia.

$$\text{próton: } Q_{\text{próton}} = 2 \cdot \frac{2}{3}e + \left(-\frac{1}{3}e\right) = e$$

$$\text{nêutron: } Q_{\text{nêutron}} = 1 \cdot \frac{2}{3}e + 2 \left(-\frac{1}{3}e\right) = 0$$

Além dos *quarks*, são também partículas elementares o elétron (e^-) e o neutrino (ν_e – pronuncia-se *ni*).

A existência do neutrino foi prevista teoricamente em 1930, mas só verificada experimentalmente em 1956. É uma partícula eletricamente neutra e de massa extremamente pequena. Na verdade, até agora, os resultados experimentais não foram decisivos para dizer se a massa do neutrino é de fato muito pequena, ou nula, o que seria inteiramente aceitável de acordo com a teoria da relatividade.

Os neutrinos e o elétron fazem parte do grupo dos **léptons** (em grego, ‘pequenos’, ‘delicados’). Toda matéria comum é constituída por essas quatro partículas elementares: *quark up*, *quark down*, elétron e neutrino.



Há muito mais espaço lá embaixo

Em 1959, no encontro anual da Sociedade Norte-Americana de Física, o físico norte-americano Richard Feynman (1918-1988), Prêmio Nobel de Física em 1965, fez uma conferência inusitada, cujo título, em tradução livre era: "Há muito mais espaço lá embaixo".

Esse estranho título era uma resposta provocativa ao anúncio de que alguém conseguira gravar a oração "Pai Nosso" na cabeça de um alfinete. Feynman disse:

Por que apenas uma oração e não todo o conteúdo da Enciclopédia Britânica? Ora, se ampliássemos o diâmetro dessa cabeça em 25 mil vezes, teríamos uma área útil que comportaria todas as páginas dessa enciclopédia. Ou melhor, bastaria que utilizássemos caracteres 25 mil vezes menores, escritos com o auxílio da microscopia eletrônica ou, quem sabe, através da manipulação de átomos e moléculas.

Adaptado de: OLIVEIRA, I. S. (Coord.). Física hoje. *Ciência Hoje*. Rio de Janeiro, 2007. p. 71.

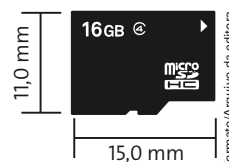
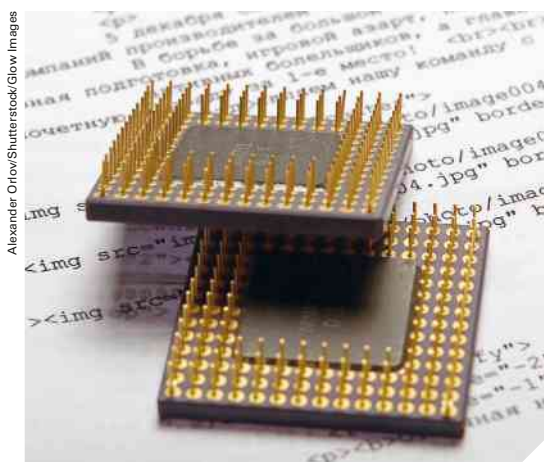
Em 2009, uma grande livraria internacional lançou no mercado um aparelho para leitura, cujo *chip* de memória, menor que a tampa de uma caneta, pode armazenar mais de 17 mil livros inteiros. De certa forma, esse aparelho é a realização da profecia de Feynman. No entanto, o gosto pelos livros tradicionais não é algo que possa mudar repentinamente, como mostra a crônica seguinte.

Ao começar a mexer no aparelho de leitura, lembrei-me de uma viagem aos Estados Unidos em que fui apresentado ao hambúrguer de soja. "Não é igual?", quis saber minha irmã, vegetariana, antes que eu engolisse a primeira mordida. Era quase: tinha cara de hambúrguer, cheiro de hambúrguer, gosto de hambúrguer, mas... não era hambúrguer.

O aparelho de leitura é assim. Faz um esforço danado para ser um livro, mas, embora esteja mais perto do original de papel do que o bolinho de soja está para a carne, não é. Pareceu-me um objeto útil e fácil de usar, mas esse desejo indisfarçável de ser uma outra coisa me deixou desconfiado. Com uma certa pena, até, como se ele fosse um patinho feio dos *hardwares*, um Pinóquio dos eletrônicos, cujo grande sonho fosse ser de celulose, como seus amiguinhos que moram todos juntos, nas prateleiras.

Fui lendo um livro de Stephen King, com facilidade, mas não conseguia parar de pensar em como o aparelho de leitura era um objeto complexado, escondendo sua verdadeira condição eletrônica sob uma capa de couro, seu disfarce de livro.

Adaptado de: PRATA, Antonio. Crônicas e outras milongas. *O Estado de S. Paulo*, 30 set. 2009.



As imagens estão representadas fora de escala.

1. Considerando que o *chip* de memória do aparelho leitor de livros tenha $1,7 \text{ cm}^2 = 170 \text{ mm}^2$, quantos livros ele armazena por milímetro quadrado?
2. Segundo Antonio Prata, qual é a relação entre o hambúrguer de soja e o aparelho de leitura?

As três gerações de partículas

As partículas elementares, *quark up*, *quark down*, elétron e neutrino, são consideradas os tijolos da matéria comum e são referidas como a **primeira geração** dos *quarks*.

Vivemos em um ambiente cuja temperatura é da ordem de 300 K (27 °C). Com essa temperatura média, a energia cinética das partículas da matéria é relativamente baixa. Mas, como seria a matéria em temperaturas de milhões de kelvin?

Nos experimentos conduzidos nos modernos aceleradores de partículas, capazes de acelerar partículas carregadas a velocidades próximas à da luz, o que corresponde a elas estarem sob milhões de kelvin, outras partículas estão presentes e acredita-se que isso tenha acontecido também nos primórdios do Universo, quando as temperaturas eram gigantescas.

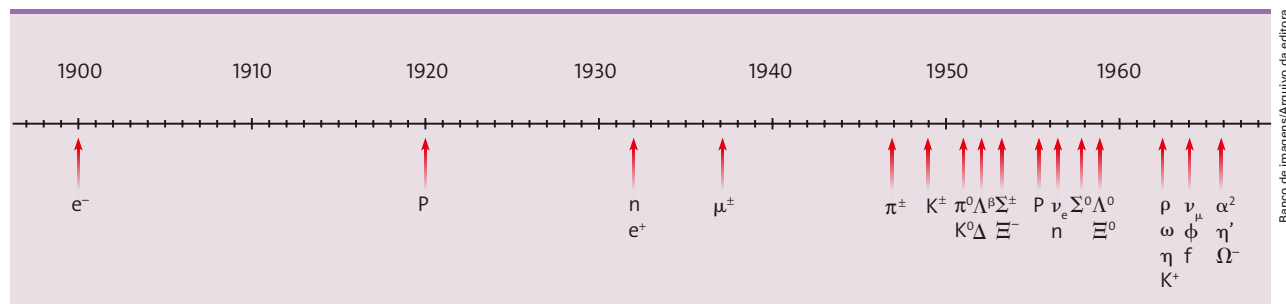
Os núcleos das estrelas também estão sujeitos a temperaturas muito altas. Por essa razão, o estudo das partículas elementares nos modernos aceleradores tem uma profunda ligação com os modelos cosmológicos e o estudo da Astrofísica.

Um dos fatores decisivos que motivaram a concepção dos *quarks* e dos léptons como fundamentais foi a grande quantidade de partículas que os aceleradores possibilitaram descobrir. Vejamos a descrição de um especialista sobre o que aconteceu há seis décadas:

A partir da década de 1950, com o advento dos grandes aceleradores, formou-se um verdadeiro zoológico de novas partículas. Cada uma ganhou uma letra grega. Eram tantas que, nas palavras de um físico, temeu-se que o alfabeto grego não fosse suficiente. Em 1955, o físico norte-americano Willis Lamb Jr. descreveu o espanto de seus colegas: [...] o descobridor de uma nova partícula elementar costumava ser agraciado com o Prêmio Nobel, mas agora deveria ser punido com uma multa de \$ 10 mil [dólares].

ANJOS, J.; VIEIRA, C. L. (Ed.). *Um olhar para o futuro*. Rio de Janeiro: Faperj, 2008.

Na **figura 11.20**, vê-se como o cardápio de partículas se avolumou na época.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 11.20 Cronologia das partículas elementares.

Além da primeira geração de partículas elementares, têm-se mais duas gerações, cada uma com dois novos léptons e dois novos *quarks*.

A segunda geração contém a partícula múon (μ) e seu próprio neutrino (múon neutrino – ν_μ), que são léptons, e os *quarks* charme (c) e estranho (s), com cargas iguais aos respectivos da primeira geração.

	Léptons		Quarks	
1ª geração	elétron e^- carga -1	neutrino do elétron ν_e carga 0	up u carga +2/3	down d carga -1/3
2ª geração	múon μ^- carga -1	neutrino do múon ν_μ carga 0	charme c carga +2/3	strange s carga -1/3
3ª geração	tau τ^- carga -1	neutrino do tau ν_τ carga 0	top t carga +2/3	bottom b carga -1/3

Figura 11.21 As três gerações das partículas elementares.

	Antiléptons		Antiquarks	
1ª geração	pósitron e^+ carga +1	antineutrino do elétron $\bar{\nu}_e$ carga 0	up antiquark $\bar{u}$ carga -2/3	down antiquark $\bar{d}$ carga +1/3
2ª geração	múon μ^+ carga +1	antineutrino do múon $\bar{\nu}_\mu$ carga 0	charme antiquark $\bar{c}$ carga -2/3	strange antiquark $\bar{s}$ carga +1/3
3ª geração	tau τ^+ carga +1	antineutrino do tau $\bar{\nu}_\tau$ carga 0	top antiquark $\bar{t}$ carga -2/3	bottom antiquark $\bar{b}$ carga +1/3

Figura 11.22 As antipartículas das três gerações.

férmions		bósons	
léptons	$spin = \frac{1}{2}$	$spin = 1^*$	mediadoras
quarks			
bárions (qqq)	$spin = \frac{1}{2}$ $\frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	$spin = 0, 1, 2, \dots$	mésons ($q\bar{q}$)

Figura 11.23 Classificação das partículas de acordo com o *spin*.

10. Porque átomo significa indivisível, e o átomo se revelou composto de outras partículas. O nome *quark* foi propositalmente escolhido de uma palavra sem significado, imitando o ruído dos patos, depois encontrado na literatura de Joyce.

11. Porque as energias envolvidas correspondem a temperaturas extremamente altas, como se imagina ter acontecido nos primórdios do Universo.



ATENÇÃO!
Não escreva
no seu livro!

Exercícios

- No capítulo 1 deste volume, encontramos a seguinte afirmação: “[...] os valores de cargas elétricas dos corpos são, sempre, múltiplos inteiros da chamada **carga elementar** (e). Esse fato é chamado de **quantização da carga elétrica**”. Como você analisa essa afirmação levando em conta a existência dos *quarks*? **Na natureza não encontramos valores de carga fracionados; para se obter tal valor é necessário utilizarmos grandes energias para separar os *quarks*.**
- Por que o nome “átomo” não se mostrou adequado para o que ele descreve? De onde proveio o nome *quark*?
- Por que razão o estudo das partículas elementares nos modernos aceleradores tem profunda ligação com a Cosmologia?
- Considerando-se as três gerações de *quarks* e léptons e as respectivas antipartículas, quantas partículas elementares são obtidas? **24 partículas elementares.**

A terceira geração contém a partícula tau (τ) e seu próprio neutrino (ν_τ), que são léptons, e os *quarks top e bottom* (figura 11.21).

A razão da existência dessas três gerações com características análogas é uma pergunta ainda não respondida. Contudo, os experimentos apontam para a existência somente dessas três e nada mais.

Temos agora todas as partículas elementares desde a criação do Universo? Não exatamente. Nos anos 1930, Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) previu que toda partícula elementar teria a sua antipartícula, com a mesma massa, mas carga oposta, o que foi constatado inicialmente com a descoberta do pósitron, a antipartícula do elétron.

Devemos então acrescentar às 12 partículas na figura 11.21, as 12 antipartículas, totalizando 24. Para representar a antipartícula usamos o mesmo símbolo da partícula, com um traço em cima, a não ser para os elementos da primeira coluna, pois o sinal da carga já mostra que elas são antipartículas (figura 11.22).

As partículas elementares têm uma propriedade denominada *spin*. Classicamente, essa propriedade era entendida como o efeito da rotação do corpo – o momento angular –, mas essa interpretação **não** se mostrou válida na Mecânica quântica. Por exemplo, o fóton, considerado sem dimensões, tem *spin* 1. Os *spins* de todas as partículas elementares são múltiplos inteiros ou semi-inteiros de $\frac{h}{2\pi}$, em que h é a constante de Planck. As partículas de *spin* inteiro são chamadas **bósons** e as de *spin* semi-inteiro, **férmions**.

O motivo dessa nomenclatura reside nas diferenças de comportamento coletivo quando analisamos um grupo do primeiro ou do segundo tipo.

Léptons e bárions são exemplos de férmions, incluindo os elétrons, prótons e nêutrons. As partículas mediadoras, incluindo o fóton e os mésons, são exemplos de bósons (figura 11.23).

6 Interações fundamentais e modelo-padrão

Conhecendo-se as partículas elementares, o passo seguinte é conhecer como elas interagem, seja formando novas partículas ou alterando seus estados. Elas interagem por meio de outras partículas, que intermedeiam as interações. São as partículas **mediadoras**.

Na Mecânica, o termo força pode ser aplicado para a tração, o atrito, o peso, a força de contato, etc., que na verdade correspondem à composição de um número gigantesco de interações fundamentais (eletromagnéticas). Mas, no estudo das partículas elementares, é usual dar-se preferência ao termo interação, em vez de força.

Uma interação que nos é familiar é a **eletromagnética**. A partícula mediadora dessa interação é o **fóton**.

A **figura 11.24** ilustra dois elétrons se repelindo pela troca de apenas um fóton (γ). Na realidade uma quantidade gigantesca deles é trocada por segundo entre duas partículas carregadas.

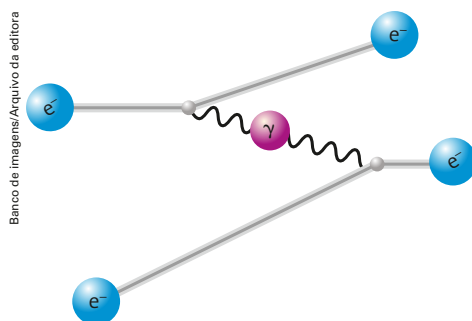


Figura 11.24 Um elétron “sente” a presença do outro pela troca de fótons (γ). Representação sem escala e em cores fantasia.

Vamos considerar um fóton que tenha como emissor o elétron da parte de cima. Quando o fóton é emitido, esse elétron da parte de cima já “sente” a reação, em razão da conservação da quantidade de movimento. No entanto, o elétron de baixo só vai “sentir” a ação quando realmente for atingido pelo fóton. Isso quer dizer que, considerando apenas os dois elétrons, a ação e a reação não são simultâneas. A explicação para esse fato é que, durante algum tempo, a interação permanece na partícula mediadora. Isso vai ocorrer para as quatro interações e, quando a massa de repouso da mediadora for nula, sua velocidade será a da luz no vácuo.

Além dos fenômenos eletromagnéticos macroscópicos, a interação eletromagnética é responsável pela formação de grupamentos de átomos e moléculas, que constituem todos os corpos – este livro, o chão que você pisa e você mesmo.

O raio de ação da força eletromagnética é ilimitado, mas sua intensidade vai diminuindo com o quadrado da distância.

Outra que nos é familiar é a **interação gravitacional**, responsável pela formação dos astros, sistemas planetários e galáxias. É a mais fraca das quatro interações fundamentais. A partícula mediadora da interação é o **gráviton**, ainda não detectado experimentalmente. Assim como a interação eletromagnética, seu raio de ação é ilimitado e a intensidade vai diminuindo com o quadrado da distância.

A **interação nuclear forte**, responsável por manter juntos os núcleons (prótons e nêutrons), é do mundo subatômico. Sabendo que os hádrons são constituídos de *quarks*, conclui-se que a interação nuclear forte ocorre entre estes. As partículas mediadoras são oito tipos de **glúons**.

O raio máximo de ação da interação nuclear forte é cerca de $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$, ou seja, atua até uma distância curtíssima. Entretanto, dentro de seu raio de ação, ela é a mais intensa das quatro. Essa força é a principal responsável pela grande quantidade de energia envolvida nas reações nucleares.

A **interação nuclear fraca**, também por pertencer ao mundo subatômico, não é percebida diretamente, mas seus efeitos são significativos. Por exemplo, ela participa de um dos estágios da reação nuclear que ocorre no Sol, a desintegração β . As partículas que sentem a ação da interação nuclear fraca, mas **não** a forte, são os léptons.

Uma descrição consistente da interação nuclear fraca demanda três partículas mediadoras, Z^0 , W^+ e W^- . A primeira é neutra e as duas últimas são eletricamente carregadas.

A teoria moderna que descreve com grande sucesso as interações eletromagnéticas, a nuclear forte e a nuclear fraca começou a ser desenvolvida nos anos 1960. Ela é conhecida como **modelo-padrão** e teve a colaboração de vários cientistas no seu desenvolvimento.

Uma grande quantidade de experimentos independentes têm verificado, com alta precisão, as previsões do modelo-padrão, bem como vêm confirmando todas as partículas que a teoria prevê existirem. No entanto, o modelo-padrão **não** representa uma explicação para tudo. Por exemplo, ele não inclui a interação gravitacional em sua formulação.

Horizontes da Física



Figura 11.25 Por esse trabalho teórico sobre a teoria eletrofraca, Glashow, Salam e Weinberg receberam o Prêmio Nobel de Física em 1979.

Os físicos teóricos há muito tempo vêm sonhando em combinar todas as interações da natureza em uma simples teoria unificada. Einstein despendeu décadas em busca dessa teoria.

Entre 1961 e 1967, Sheldon Glashow (1932-), Abdus Salam (1926-1996) e Steven Weinberg (1933-) desenvolveram uma teoria que unificava a interação fraca com a eletromagnética: a **teoria eletrofraca** (figura 11.25).

Uma decorrência dessa teoria foi a predição das partículas mediadoras da força fraca e suas massas, os bósons Z^0 , W^+ e W^- . A ideia básica é a de que as massas entre os fótons (massa de repouso nula) e os bósons da interação fraca ($\sim 100 \text{ GeV}/c^2$) têm comportamentos muito diferentes em baixas energias, mas que, em energias suficientemente altas (acima de 100 GeV), a distinção desaparece e as duas massas se misturam em uma única interação.

A predição desses três cientistas foi verificada na Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (Cern) em 1983, no grande acelerador LEP, com a colisão de um próton e um antipróton, em alta energia. Os bósons fracos foram encontrados e suas massas concordavam com as previsões teóricas: uma maravilhosa convergência entre teoria e experimento.

O sucesso da unificação eletrofraca encorajou os físicos teóricos a considerar que, talvez, em energias suficientemente altas, a interação forte apresente uma convergência similar à da força fraca. Se assim for, será possível unificar as três interações em uma única teoria, a **Grande Teoria Unificada** (GTU). No entanto, por ora, ela é somente uma possibilidade, com várias propostas em sua formulação.

Na maioria das formulações das GTUs, os neutrinos (ν_e , ν_μ e ν_τ) têm massas de repouso não nulas, o que os faz sofrer oscilações de um tipo para outro. Esse fato foi verificado experimentalmente em 1998, no Japão.

A descoberta das oscilações dos neutrinos esclareceu um antigo mistério sobre o Sol. Desde 1960 os cientistas têm usado detectores sensíveis para captar neutrinos solares. Pela quantidade de reações nucleares que ocorrem no Sol por segundo, é possível fazer uma previsão da quantidade de neutrinos solares que deveria chegar à Terra nesse intervalo. Contudo, os fluxos de neutrinos solares observados correspondiam a apenas $\frac{1}{3}$ do previsto. Em 2002, no observatório de neutrinos de Sudbury, Canadá, que pode detectar simultaneamente neutrinos dos três tipos, verificou-se que, considerando esses três tipos, as medidas correspondem aos valores previstos. O que ocorre é que, embora o Sol produza neutrinos de elétrons na quantidade prevista, $\frac{2}{3}$ deles se transformam em neutrinos de múons e neutrinos de tau durante seus voos até os detectores na Terra.

Há um sonho maior ainda do que o da GTU. O sonho de incluir a gravitação e unificar as quatro interações fundamentais.

Diferentemente do modelo-padrão, os trabalhos teóricos admitem a existência de mais dimensões além das três do espaço e uma do tempo, considerando as simetrias e as chamadas supercordas.

A comprovação dessas outras dimensões poderia proporcionar a realização do grande sonho de haver um único modelo teórico para explicar as quatro interações fundamentais: a **teoria de tudo** (em inglês, *Theory of Everything* – TOE).



Exercícios

13. (UFMT) Na Física contemporânea, todos os fenômenos podem ser descritos pelas quatro forças naturais:

- a gravitacional, que atua entre corpos e partículas que possuem massa;
- a eletromagnética, que atua entre corpos e partículas que possuem carga elétrica;
- a nuclear forte, que atua entre prótons e nêutrons no interior do núcleo dos átomos;
- a nuclear fraca, que é responsável pelos processos de transformação de um próton em um nêutron, ou vice-versa.

Assim sendo, uma reação química é uma manifestação:

a) da força gravitacional.	c) da força nuclear forte.	e) de uma combinação das forças gravitacional e eletromagnética.
X b) da força eletromagnética.	d) da força nuclear fraca.	

14. De acordo com o texto abaixo, qual é a maior dificuldade que os físicos encontram para reproduzir em laboratório as condições iniciais do Universo? [A obtenção de temperaturas da ordem de \$10^{32}\$ K.](#)

Os físicos dispõem de modelos teóricos que unificam as três primeiras interações, mas ninguém ainda conseguiu formular uma teoria de gravitação quântica necessária para lidar com as enormes densidades que existiam nos primeiros instantes do *big-bang*. Em consequência, não temos meios para descrever o que aconteceu até o resfriamento do Universo “congelar” ou “condensar” a força gravitacional, o que deve ter ocorrido cerca de 10^{-43} s após o *big-bang*, quando a temperatura ainda era de 10^{32} K.

TIPLER, Paul A. *Física moderna*. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. (Física, v. 3).



Edwin Powell Hubble

O astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953) é considerado o fundador da Astronomia extragaláctica, por ser o primeiro a mostrar evidências da expansão do Universo. Seu interesse em Astronomia foi despertado na Universidade de Chicago, inspirado pelo astrônomo George E. Hale (1868-1938), famoso na época pelas descobertas sobre as manchas solares.

Em Chicago, Hubble concluiu em 1910, simultaneamente, os cursos de Matemática e Astronomia, e tinha grande reputação como lutador de boxe. Contudo, após a graduação, deixou de lado tanto o esporte quanto a Astronomia para estudar Direito na Universidade de Oxford, onde se graduou em 1912. Pouco mais de um ano depois, ele se entediou com o trabalho em advocacia e finalmente escolheu trabalhar com Astronomia, retornando à Universidade de Chicago.

Após obter seu doutorado em Astronomia em 1917 e servir a seu país na Primeira Guerra Mundial (1914-1918), Hubble foi muito beneficiado pela conclusão do telescópio Hooker, com um espelho de 100 polegadas (2,5 m), no observatório de Monte Wilson, Pasadena, no qual continuou seu trabalho.

Usando esse maravilhoso refletor (o maior em seu tempo), ele confirmou a hipótese do astrônomo Vesto Slipher (1875-1969), cujos dados eram de 1914, de que muitos astros apontados como nebulosas eram na verdade galáxias como a nossa, a Via Láctea, mas muito distantes.

Slipher despendeu centenas de horas medindo o espectro da luz de espirais distantes. O deslocamento na maioria das linhas espectrais era para o vermelho, indicando que essa maioria estava se afastando de nossa galáxia. Em 1925, ele usou o *redshift* para analisar as velocidades radiais de 44 galáxias. Como as maiores velocidades eram superiores a 1 000 km/s, Slipher concluiu que aquelas galáxias estavam além da Via Láctea. Hubble se concentrou em determinar as suas distâncias e, em 1929, ele e seu colega Milton Lasalle Humason (1891-1972) tinham coletado dados sobre 49 galáxias espirais.

Hubble ficou surpreso ao verificar que, quanto mais distante estava uma galáxia, maior era o *redshift*. Essa correlação mostrava que o Universo estava em expansão e que tinha uma origem definida em determinado instante do passado; essas observações estavam de acordo com as previsões dos cosmólogos Georges Lemaitre (1894-1966) e Aleksandr Friedmann (1888-1925), feitas com base na relatividade geral de Einstein.

A proporção entre a velocidade de afastamento e a distância ficou conhecida como constante de Hubble. Infelizmente, o valor da constante proposto por Hubble indicava que a idade do Universo era de poucos bilhões de anos, um valor menor que a idade já estimada para a Terra na época. As distâncias das galáxias foram reexaminadas e essa discrepância foi eliminada, com uma nova estimativa da idade do Universo em cerca de 14 bilhões de anos.



Edwin Hubble em Monte Wilson (1922).

Emilio Segre Visual Archives/American Institute of Physics/SPL/Latinstock

TALLACK, Peter (Ed.). *The Science Book*. London: Weindenfeld & Nicolson, 2001. p. 306-307. Texto traduzido.

1. De acordo com o texto, quais as principais evidências de que o Universo está em expansão?
2. Explique por que o *redshift* (desvio para o vermelho) indica que o Universo está em expansão.

Experimento



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

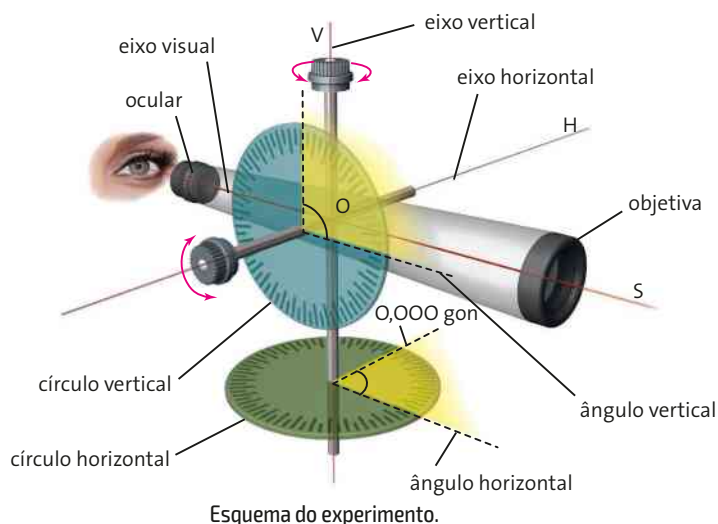


Medindo distâncias por paralaxe

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

Nesta atividade, você e seu grupo vão medir ângulos utilizando o método da paralaxe, técnica muito usada na Astronomia. Para tanto, vocês vão precisar de um segmento de reta de base, de comprimento conhecido, e um medidor de ângulos. Os agrimensores usam medidores de ângulo sofisticados e precisos, chamados teodolitos, mas vocês podem usar um método caseiro de menor precisão, como uma cópia de um transferidor colada em uma cartolina.

Além do transferidor, vocês vão precisar de dois cabos de vassoura, que serão usados como estacas. A medição deve ser feita próximo a uma árvore. Sigam o esquema representado na figura abaixo.



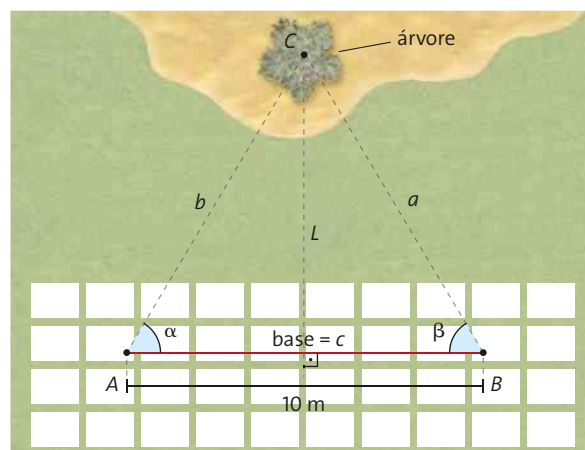
Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Teodolito, apoiado em tripé.

Fixem verticalmente uma das estacas em um dos lados da árvore. Em seguida, com uma fita métrica, meçam uma distância de, digamos, 10 m a partir dessa primeira estaca e, paralelamente, fixem a outra no outro lado da árvore. As estacas determinam os extremos de sua linha de base.

A partir do ponto de fixação de uma das estacas, tracem uma linha reta em direção à árvore. Repitam o procedimento com a outra estaca. Vocês agora dispõem de dois ângulos que podem ser medidos (α e β).

Retirem as estacas para fazer a medida dos ângulos. Anotem os valores obtidos. Em uma folha em branco, refaçam a figura em escala: 1 cm no desenho deve corresponder a 1 m na realidade. Comecem desenhando a linha de base. Depois, com um transferidor, desenhem os outros dois lados do triângulo.



Esquema para medida dos ângulos com a linha de base de comprimento c .

Paulo Manz/Arquivo da editora

1. Quais foram os valores obtidos para os ângulos α e β ?
2. Qual é a medida do ângulo do triângulo cujo vértice está no tronco da árvore?
3. Em seu desenho, quanto valem os lados a , b e c do triângulo?
4. Considerando a escala utilizada, qual é o valor da distância L ?

15. Muitos físicos têm se preocupado com as conexões entre ciência e teologia. Isso fica evidente nas palavras de Paul Davies (1946-), físico, matemático, professor de Filosofia e autor de vários livros:

As pessoas em geral pensam que, à medida que a ciência avança, a religião retrocede. Mas, quanto mais descobrimos acerca do mundo, mais percebemos que há um propósito ou um desígnio por trás disso tudo.

Você concorda com as palavras de Paul Davies? Qual a sua opinião a respeito de ciência e religião?

Resposta pessoal.

16. Há muita coisa que a ciência não compreende, muitos mistérios que ainda devem ser resolvidos. Num Universo com dezenas de bilhões de anos-luz de extensão e uns 10 ou 15 bilhões de anos de idade, talvez seja assim para sempre.

Carl Sagan (1934-1996), em 1996.

Com base na fala de Carl Sagan, você investiria bilhões de dólares em pesquisas sobre o Universo? Justifique sua resposta. **Resposta pessoal.**

17. Uma típica estrela anã branca tem aproximadamente o tamanho da Terra, mas sua densidade é cerca de 10^6 kg/m^3 .

- Compare a densidade dessa estrela com a densidade da Terra.
- Faça, em seu caderno, um esquema de todas as fases anteriores à de anã branca pelas quais passou essa estrela, a partir da nebulosa. **Veja a figura 11.6**

18. Determinada galáxia está a 2 Mpc (milhões de parsecs) de distância da Terra. $d = 6,176 \cdot 10^{19} \text{ km}$

- Qual o valor dessa distância em km?
- Utilizando a lei de Hubble, obtenha a velocidade de afastamento dessa galáxia, em km/s. Compare seu resultado com o apresentado no gráfico da teoria. $v = 1,36 \cdot 10^{17} \text{ km/s}$

19. (UFRN) Recentemente, a humanidade conheceu a maior máquina do mundo – o Grande Colisor de Hádrons, ou LHC (*Large Hadron Collider*) –, que é o mais poderoso acelerador de partículas construído até hoje.



Um modelo do Grande Colisor de Hádrons no centro de visitantes do Cern, em Genebra.

Com o LHC, os cientistas procuram compreender a natureza do Universo, ao tentarem reproduzir, em um gigantesco laboratório, a escala do fenômeno conhecido como *big-bang*. Nesse experimento, eles esperam encontrar, especificamente, uma partícula chamada bóson de Higgs, que só existe na teoria do *big-bang*. Em relação a esse experimento, afirma-se:

- A descoberta do bóson pode ser uma certeza absoluta de que a origem do Universo se deu tal qual explica a teoria do *big-bang*. Dessa forma, essa teoria passaria a ser uma realidade inquestionável.
- As observações dos cientistas são objetivas e independentes das teorias que norteiam os experimentos.
- Se os elétrons, os prótons e os fótons cumprem o princípio de incerteza de Heisenberg, isso implica a impossibilidade de se conhecer com precisão, de forma simultânea, a posição e a velocidade de cada uma dessas partículas.

Dessas afirmações, apenas:

- a I e a II estão corretas.
- X** b) a III está correta.
- a II está correta.
- a I e a III estão corretas.

20. (UFPA) Uma das maiores descobertas da humanidade no século XX ocorreu em 1929 quando o astrônomo Edwin Hubble descobriu que as galáxias distantes se moviam com uma velocidade diretamente proporcional à distância em relação a nós, na Terra. Essa descoberta deu suporte experimental à teoria de que o Universo teve origem em uma grande explosão, conhecida por *big-bang*, a partir de um estado inicial, e se expande desde então.

A descoberta de Hubble é resumida em uma expressão simples, conhecida como lei de Hubble, que relaciona a velocidade à distância da galáxia em relação a nós (na Terra): $V = H \cdot L$, sendo L a distância da galáxia em relação à Terra, e H uma constante (constante de Hubble) que permitiu estimar a idade do Universo, conhecida hoje, em cerca de 14 bilhões de anos. Segundo a expressão da lei de Hubble, a constante H é medida em unidades de:

- velocidade.
- tempo.
- X** c) inverso de tempo.
- comprimento.
- inverso de comprimento.

Respostas

Unidade 1 • Fenômenos elétricos em condutores

Capítulo 1 • Energia e corrente elétrica

1. a) US\$ $100 \cdot 10^4$ ou US\$ 1 000 000
b) US\$ $2\,000 \cdot 10^4$ ou US\$ 20 000 000
c) R\$ 2,25
d) R\$ 3,00
2. Alternativa c
3. a) A: carga elétrica positiva; B: carga elétrica negativa
b) Forças de atração
4. a) A: carga elétrica positiva; B: carga elétrica negativa; C: carga elétrica negativa
b) Forças de atração
c) Forças de repulsão
5. I. Errada
II. Errada
III. Certa
6. a) Corrente iônica
b) Corrente eletrônica
7. a) $Q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C
b) Corrente mista
8. Bateria de automóvel: corrente iônica; lâmpada halógena: corrente eletrônica; lâmpada fluorescente: corrente mista
9. a) $i = 0,16$ A
b) $Q = 1,6$ C
10. a) $Q = 6$ C
b) $i = 2$ A
11. a) $i = 0,32$ A
b) $i = 0,48$ A
c) $i = 0,8$ A
12. Alternativa e
13. Alternativa c
14. a) $Q = 21\,600$ C
b) $m = 7,920$ g
15. Alternativa c
16. Alternativa d

Capítulo 2 • Os circuitos elétricos nas residências

1. $\Delta E = 1,2 \cdot 10^9$ J
2. $U = 120$ V
3. R\$ 69,30
4. $\Delta t \approx 2,47$ h
5. a) Sim
b) 252 000 Wh ou 252 kWh
6. Alternativa e
7. a) A diferença de tamanho está relacionada com a máxima corrente elétrica em cada uma delas.
b) Energia química

8. a) Receptor
b) $i = 12,7$ A
9. a) A lâmpada
b) O chuveiro
10. Não há contradição.
11. Alternativa c
12. $P = 283$ W
13. Alternativa b
14. a) Para o resistor representado na figura A.
b) 5Ω
c) 2Ω
15. $R = 11 \Omega$
16. $R = 0,1 \Omega$
17. a) $R = 4 \cdot 10^{-2} \Omega$
b) 2,2%
18. Como se trata de um circuito em série, a retirada de uma das lâmpadas deixa o circuito aberto, o que implica corrente nula em todas as lâmpadas.
19. b) $i = 4$ A
c) $U = 108$ V; $R = 27 \Omega$
d) $R = 30 \Omega$
22. a) $i = 1,5$ A
b) $R = 8 \Omega$
c) $P = 18$ W
23. a) $P = 9\,380$ W
b) 4 circuitos
24. Alternativa b
25. Alternativa d
26. Alternativa b
27. Alternativa c
28. Alternativa d
29. Alternativa e
30. Alternativa c
31. Alternativa d

Capítulo 3 • Geradores e receptores elétricos

1. Alternativa d
2. a) $\Delta E = 6$ Wh = 21 600 J
b) $\Delta t = 2$ h
3. I. Correta
II. Correta
III. Correta
4. a) $\varepsilon = 12$ V; $r = 2 \Omega$
b) $U = 12 - 2i$ (SI)
c) $U = 6$ V
d) $R = 2 \Omega$
5. Alternativa b
6. Equivalente de cada série: $\varepsilon = 3$ V; $r = 2$ V
Duas dessas séries em paralelo: $\varepsilon = 3$ V; $r = 1 \Omega$

7. Duas em paralelo e o conjunto em série com a outra
8. a) $\Delta E = 24 \text{ J}$
b) Não, pois parte da energia será dissipada.
9. a) $\epsilon' = 90 \text{ V}$
b) $P_{\text{útil}} = 450 \text{ W}$; $P_{\text{total}} = 500 \text{ W}$; $P_{\text{dissipada}} = 50 \text{ W}$
c) $P_{\text{dissipada}} = 5000 \text{ W}$
10. a) $U = 75 \text{ V}$
b) $\eta = 33,3\%$
12. Alternativa c
13. a) E_1 : receptor; E_2 : gerador; E_3 : receptor
b) $\frac{5}{3} \text{ A}$; sentido anti-horário
14. b) $i = 1,44 \text{ A}$
15. a) $U = 15 \text{ V}$
b) Diminui.
16. $i = 1,2 \text{ A}$; $U = 2,4 \text{ V}$
17. Alternativa b
18. Alternativa c
20. O voltímetro mede a ddp nos terminais do gerador e o amperímetro mede a corrente no circuito.
21. Alternativa e
22. $U = 150 \text{ V}$; $i = 1,6 \text{ A}$
23. Alternativa e

Unidade 2 • Ações elétricas a distância

Capítulo 4 • Campo elétrico

1. Alternativa b
2. $Q_A: -2 \mu\text{C}$; $Q_B: -4 \mu\text{C}$; $Q_C: -2 \mu\text{C}$; $Q_{\text{plano}}: +8 \mu\text{C}$
3. Os corpos ficam eletrizados quando aproximados na horizontal.
4. Alternativa d
5. I. Certa
II. Errada
III. Certa
IV. Errada
V. Certa
6. a) $Q = 2\sqrt{2} \cdot 10^{-5} \text{ C}$
b) $F = 5 \text{ N}$
7. a) A partícula eletrizada com $-Q$ é atraída com $2F$ por $+Q$ e com $F \cdot \frac{4Q}{(2r)^2}$ por $+4Q$. Assim, a resultante terá intensidade $3F$.
b) A carga $+2Q$ é atraída com $2F$ por $-Q$ e repelida com $8F \cdot (2Q \cdot 4Q)$ por $+4Q$. Pela disposição das cargas, essas forças têm mesmo sentido e a resultante terá, portanto, intensidade $10F$.
c) A carga $+4Q$ é atraída com F por $-Q$ e repelida com $8F$ por $+2Q$. Pela disposição das cargas, essas forças têm sentidos opostos e a resultante terá, portanto, intensidade $7F$.

8. Alternativa b
10. Intensidade: $E = 5 \cdot 10^6 \text{ N/C}$; direção e sentido: mesmos da força.
11. a) Intensidade: $E = 7,7 \cdot 10^4 \text{ N/C}$; direção: horizontal; sentido: para a direita
b) O campo elétrico resultante é nulo.
12. $E = 2,16 \cdot 10^8 \text{ N/C}$, vertical, para cima
13. Alternativa b
14. Alternativa a
15. a) Entrará em movimento.
b) Movimento retilíneo uniformemente acelerado
16. a) $V_{(+)} = +12 \text{ V}$
b) $V_{(-)} = -12 \text{ V}$
c) $V_{(+)} = +15 \text{ V}$
17. a) $E = 5 \cdot 10^3 \text{ N/C}$
b) $F = 5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$
c) $\tau = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$
18. a) $\tau = -2 \cdot 10^{-5} \text{ J}$
19. $U = 480 \text{ V}$
20. Alternativa e
21. Alternativa c
22. Alternativa b
23. Alternativa b
24. Alternativa e

Capítulo 5 • Cargas elétricas em condutores

1. I. Verdadeira
II. Verdadeira
III. Falsa
IV. Falsa
2. Alternativa d
3. Alternativa b
4. Não
5. a) O vetor campo elétrico é nulo.
b) $V = -30 \text{ V}$
6. a) $E = 0$
b) $Q = 0$
7. a) Não
b) $E = 7,2 \cdot 10^4 \text{ N/C}$
9. $\tau = 0$
10. $E = 7,2 \cdot 10^6 \text{ N/C}$
11. a) $C = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ F}$
b) $Q = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ C}$
12. $Q = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ C}$
13. a) $U = 4,5 \cdot 10^8 \text{ V}$
b) $Q = 4,5 \text{ C}$
14. a) $C = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ F}$

15. a) $Q = 8 \mu\text{C}$
16. I. Certo
II. Errado
17. $W = 5 \cdot 10^{-5} \text{ J}$
18. a) $W = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ J}$
b) $\Delta t = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}$
c) $R = 0,5 \Omega$
19. a) $Q = 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ C}$
b) $W = 1,125 \cdot 10^{-1} \text{ J}$
c) $P = 0,25 \text{ W}$
20. a) $W = 1,0 \cdot 10^9 \text{ J}$
b) $F = 6,7 \cdot 10^6 \text{ N}$
c) Dobrará de valor.
d) Dobrará de valor.
21. Alternativa c
22. a) $C_{eq} = 1,2 \mu\text{F}$
b) $Q = 21,6 \mu\text{C}$
c) $U_1 = 7,2 \text{ V}$; $U_2 = 10,8 \text{ V}$
d) $W_1 = 77,76 \mu\text{J}$; $W_2 = 116,64 \mu\text{J}$
23. a) $C_{eq} = 5 \mu\text{F}$
b) $U = 6 \text{ V}$
c) $Q_1 = 18 \mu\text{C}$; $Q_2 = 12 \mu\text{C}$
d) $W_1 = 54 \mu\text{J}$; $W_2 = 36 \mu\text{J}$
24. a) $U = E = 20 \text{ V}$
b) $W = 6 \text{ J}$
25. Alternativa e
26. Alternativa a
27. Alternativa b
28. Alternativa b

Capítulo 6 • Campos e forças de natureza magnética

1. a) Pedro poderia pendurar o prego com um fio muito fino (por exemplo, linha de costura) e verificaria que sua ponta (polo norte do prego) apontaria para o norte geográfico da Terra, que corresponde ao sul magnético da Terra.
b) O prego A; prego B ou nenhum dos pregos estaria imantado.
2. a) Polo sul
c) Nas bússolas 1 e 2
3. Alternativa d
4. Alternativa b
5. As partes serão novos ímãs.
6. Intensidade: $B = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ T}$; direção: perpendicular ao plano do papel; sentido: saindo do plano do papel.
7. a) O campo na parte externa de um solenoide é nulo.
b) $B_{ext} = 8\pi \cdot 10^{-2} \text{ T}$
c) $B_{int} = 8\pi \text{ T}$
9. Nulo

10. a) $B = 4\pi \cdot 10^{-2} \text{ T}$
b) $B = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ T}$
11. Alternativa b
13. Intensidade: $2,4 \cdot 10^{-12} \text{ N}$; direção: perpendicular ao plano do papel; sentido: entrando no plano do papel.
14. $v = 2,0 \cdot 10^6 \text{ m/s}$
15. a) $F_m = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ N}$
b) $F_m = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ N}$
16. 0° ou 180°
17. Alternativa e
18. $\tau = 0$
19. A partícula de maior massa é aquela que percorre o maior raio.
20. $v = \frac{E}{B}$
21. $R = \frac{mv}{2qB}$
22. $F_m = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$
23. Intensidade: $i = 5 \text{ A}$; sentido: da esquerda para a direita (regra da mão direita)
24. Alternativa a
25. $F = 0 \text{ N}$
26. $i = \frac{mg}{BL}$
27. Alternativa b
28. Alternativa c
29. Alternativa d
30. Alternativa d
31. I. Incorreta
II. Incorreta
III. Incorreta
32. Alternativa c

Unidade 3 • Fenômenos eletromagnéticos na sociedade moderna

Capítulo 7 • Indução eletromagnética

1. I. Não há variação de fluxo.
II. Há variação de fluxo.
III. Há variação de fluxo.
2. (1) e (3)
3. a) Sim
b) Não
6. a) Anti-horário
b) Horário
7. a) O sentido da corrente no condutor será do eixo x.
b) O sentido da corrente no condutor será oposto ao eixo x.

8. a) Não há *fem* induzida no solenoide.
b) A *fem* induzida terá uma polaridade que gera uma corrente no sentido do campo original.
c) A *fem* induzida terá uma polaridade que gera uma corrente no sentido oposto ao do campo original.
9. a) Situação correta
b) Situação correta
c) Situação correta
d) Situação incorreta
10. a) $\phi = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m}^2$
b) $\varepsilon = 3,9 \text{ V}$
11. a) Na espira circular
b) Espira quadrada: horário; espira circular: anti-horário
12. Deve ocorrer variação de fluxo em um circuito fechado.
13. a) (1) o fluxo está aumentando; (2) o fluxo é constante; (3) o fluxo está diminuindo.
b) $\varepsilon = 0,5 \text{ V}$
c) Os sentidos são diferentes.
14. a) $\phi = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \cos(\pi t) \text{ Wb}$
c) $\varepsilon = -2 \cdot 10^{-4} \pi \cdot \sin(\pi t) \text{ (V)}$
15. a) $i = \sin(120 \pi t) \text{ (A)}$
b) Esse tempo é muito inferior ao limite de resolução de nossa visão.
16. I. Errada
II. Errada
III. Errada
17. Se a corrente for contínua, não há variação de campo e, portanto, não há variação de fluxo para produzir corrente ou *ddp*.
18. $N_1 = 364 \cdot N_2$
19. a) $U_1 = 100 \text{ V}$
b) $P_2 = P_1 = 100 \text{ W}$
20. a) Sim
b) Contínua
21. Alternativa e
22. Alternativa c
23. Alternativa e
24. Alternativa e
25. a) $U_2 = 220 \text{ V}$
b) $i_2 = 3 \text{ A}$
c) $U_1 = 90 \text{ V}$
26. Alternativa a
27. Alternativa a

Capítulo 8 • Ondas eletromagnéticas

1. $f = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$
2. A frequência da estação A é 10 vezes a frequência da estação B.
3. Alternativa d
4. a) Não

b) Emissoras AM: $\lambda_{\text{menor}} = 193,5 \text{ m}$; $\lambda_{\text{maior}} = 545,5 \text{ m}$

Emissoras FM: $\lambda_{\text{menor}} = 2,8 \text{ m}$; $\lambda_{\text{maior}} = 3,4 \text{ m}$

5. A afirmativa é falsa, pois as ondas de rádio são ondas eletromagnéticas.
6. Essas radiofrequências não são ionizantes.
7. a) A função da onda portadora é transmitir o som.
b) Onda eletromagnética
8. A função do modulador é, como o nome indica, modular a onda eletromagnética (onda portadora) pelo sinal de áudio (onda sonora) para que a transmissão do som possa ocorrer por meio de ondas eletromagnéticas. Nas transmissões AM, a modulação ocorre na amplitude da onda e, nas transmissões FM, a modulação ocorre na frequência da onda.
9. Com as ondas de rádio
10. Ao colocarmos uma caneca com leite no forno micro-ondas, a radiação interage com as moléculas da água presentes no leite, provocando o seu aquecimento. Materiais não hidratados (que não possuem água), como a caneca, não são aquecidos pela radiação. O pequeno aquecimento da caneca é explicado pelo fato de ela estar em contato com o leite.
11. Alternativa a
12. a) $\lambda_{\text{máx.}} = 9,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
b) A radiação é infravermelha.
13. a) 81%
b) A lâmpada rende mais como aquecedor.
14. Alternativa a
15. A polarização só é possível para ondas transversais como as ondas eletromagnéticas, nas quais a luz se encaixa. Já o som, por ser uma onda longitudinal, não pode ser polarizado.
16. Quando a fenda é grande, como na figura (a), os efeitos de difração praticamente não existem. Isso provoca uma sombra com os contornos bem definidos. Por outro lado, diminuindo-se o tamanho da fenda, como na figura (b), os efeitos de difração passam a ser acentuados e os contornos da sombra não são bem definidos, pois o efeito borrado nas bordas aumenta.
17. A radiação ultravioleta C
18. Em virtude de os olhos serem órgãos muito sensíveis à radiação ultravioleta, é aconselhável que as pessoas utilizem óculos protetores quando expostas ao Sol. Embora alguns óculos escuros funcionem simplesmente como estética, é preciso que eles funcionem como bloqueadores de radiação ultravioleta.
19. Alternativa c
20. Esses procedimentos têm como objetivo produzir um contraste para que os tecidos biológicos sejam destacados na radiografia.
21. As radiografias são essenciais em alguns diagnósticos médicos. Por isso, elas devem ser usadas com moderação e com uma frequência que permita ao organismo humano se recuperar.
22. Um elemento químico radioativo é aquele que espontaneamente emite radiação.
23. Os raios X são produzidos na eletrosfera dos átomos em razão da desaceleração brusca de elétrons e os raios gama são radiações emitidas pelo núcleo dos átomos. Além disso, os raios gama possuem frequência maior que os raios X, portanto são mais energéticos.

24. Alternativa b
25. Alternativa b
26. Alternativa c
27. Alternativa b
28. Alternativa e

Unidade 4 • O muito pequeno e o muito grande

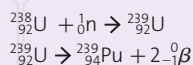
Capítulo 9 • Os pilares da Física moderna

1. I. Errada
II. Certa para referenciais inerciais
III. Errada
2. $v = 300\,000\text{ km/s}$
3. $v = 300\,000\text{ km/s}$
4. O intervalo de tempo medido pelo seu amigo que se encontra no carro.
5. O astronauta recebeu mais do que esperava.
6. Alternativa e
7. O evento durou 20 minutos.
8. a) $\Delta t_0 = 12\text{ meses}$
b) A medida própria é aquela feita no referencial da espaçonave.
9. Alternativa c
10. Alternativa d
11. a) O comprimento da barra não se altera.
b) O comprimento da barra medido pelo observador será menor do que 2,0 m (medida do comprimento da barra em repouso).
12. Não
13. Menor que 1,70 m
14. Alternativa b
15. Os efeitos relativísticos que afetam a massa e o tempo: aumento de massa e dilatação do tempo em virtude da velocidade, matematicamente expressa pela equação $E = mc^2$ e pela transformação de Lorentz relativa à dilatação do tempo.
16. Não
17. $E = 9,0 \cdot 10^{16}\text{ J}$
18. $E_{\text{repouso}} = 1,8 \cdot 10^{16}\text{ J}$; $E_{\text{total}} = 3,6 \cdot 10^{16}\text{ J}$; $E_{\text{cinética}} = 1,8 \cdot 10^{16}\text{ J}$
19. Embora todos os corpos irradiem energia na temperatura ambiente, essa energia concentra-se na região infravermelha do espectro eletromagnético. Assim, quer com iluminação, quer no escuro, essa radiação não é visível para nós.
20. a) $\lambda = 9,4 \cdot 10^{-6}\text{ m}$
b) Essa radiação encontra-se na faixa do infravermelho do espectro.
c) As pessoas não brilham tanto porque a radiação emitida está na faixa do infravermelho e nossos olhos não são sensíveis a essa radiação.
21. a) $\lambda = 9,7 \cdot 10^{-7}\text{ m}$
b) 19%
22. Uma grandeza é quantizada quando só é possível se obter determinados valores para a grandeza e esses valores são múltiplos de um valor fundamental. A grandeza “intervalo de tempo” não é quantizada; a grandeza “quantidade de carga elétrica”, sim.
23. a) $f = 5,2 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$
b) A cor da luz correspondente à radiação emitida é amarela.
25. O de maior intensidade conseguirá arrancar mais elétrons da placa.
26. Para o efeito fotoelétrico ocorrer em dado metal, existe uma frequência mínima (f_0) da luz incidente, ou seja, somente quando usamos luz de frequência igual a ou maior que f_0 , elétrons podem ser arrancados do metal. Se um dos feixes de luz não conseguiu produzir o efeito, podemos atribuir isso ao fato de ser sua frequência menor do que a mínima necessária para aquela placa (f_0).
27. $W = 2,1\text{ eV}$
28. Hoje, o átomo perdeu o *status* de partícula indivisível devido às descobertas do elétron, do próton e do nêutron, que são os constituintes básicos do átomo e, também, pelo conhecimento das reações, tanto as atômicas quanto as nucleares.
32. a) Podem ser diferentes.
b) A soma das energias dos fótons emitidos em duas etapas é igual à energia do fóton emitido em um único salto.
33. a) $E = 20\text{ eV}$
b) Energias possíveis: 3 eV; 5 eV; 8 eV; 10 eV; 15 eV e 18 eV
34. I. Errada
II. Certa
35. Alternativa b
36. a) A energia cinética máxima $E_{c(\text{máx.})}$ que o elétron ejetado (fotoelétron) pode ter é dada por:
 $E_{c(\text{máx.})} = E - W$, onde E é a energia do fóton incidente e W é a função trabalho do material da placa metálica, que depende do tipo de metal utilizado. Assim, a energia cinética máxima não depende da intensidade da luz policromática incidente.
b) Cada elétron necessita receber uma quantidade mínima de energia para ser arrancado. Se a energia do fóton não superar essa quantidade mínima, o elétron não é arrancado e o efeito fotoelétrico não acontece. No experimento mostrado na questão, isso só acontece com fótons que possuem energia mínima de 6,0 eV.
37. Alternativa d
38. Alternativa c
39. Alternativa b
40. a) $E_0 = -6,8\text{ eV}$
b) $E_f = 8,1 \cdot 10^{-14}\text{ J}$

Capítulo 10 • Física nuclear

1. Não
2. Uma partícula α
3. b) $\Delta t = 26\text{ h}$
4. Alternativa d
5. $t_{1/2} = 4\text{ h}$

6. A meia-vida do cézio-137 é de aproximadamente 30 anos.
7. As emissões β e γ
8. Como a meia-vida do tecnécio é de 6 horas, em uma semana terão se passado 28 meias-vidas. Dessa forma, a atividade terá decaído 2^{28} vezes, ou seja, bilionésimos do valor inicial e será praticamente indetectável.
9. $t = 22\,800$ anos
10. Uma das diferenças é que as reações químicas envolvem as eletrosferas dos átomos e ocorrem devido às forças de origem eletromagnética. Já as reações nucleares ocorrem nos núcleos, sob a influência da interação forte. Além disso, outra diferença é que as energias envolvidas nas reações nucleares são milhões de vezes maiores que as das reações químicas.
11. Reagentes: alumínio (Al) e a partícula α ; produtos: fósforo (P) e um nêutron
12. Nos aceleradores circulares (*Fermilab*) as partículas são aceleradas a cada volta, em determinada região, enquanto nos aceleradores lineares (Slac) elas são aceleradas ao longo de todo o percurso. Outra diferença de grande importância é que nos aceleradores circulares pode-se efetuar a colisão de partículas que se movimentam em sentidos contrários, aumentando significativamente a energia dos elementos envolvidos na colisão, mas no acelerador linear a colisão é contra um alvo fixo.
13. Não
14. Como a massa dos produtos é menor do que a dos reagentes, a reação nuclear libera energia.
15. As reações apresentadas no texto são:



Em um reator de fissão, há grande quantidade de urânio-238 e nêutrons. Dessa forma, o plutônio é um dos subprodutos desse tipo de usina.

16. a) $4,5 \cdot 10^{26}$ J
b) $t = 2 \cdot 10^8$ anos
17. Porque quando consideramos a energia liberada por núcleon (ou por grama de reagente) a energia obtida na fusão é praticamente 8 vezes maior que a energia liberada na fissão.
18. Alternativa b
19. A diferença entre os três tipos de usinas elétricas citadas é a matéria-prima usada para movimentar as turbinas e gerar energia elétrica. Na hidroelétrica, a matéria-prima é a água; na termoeletrica, normalmente é um combustível fóssil e, na nuclear, é um material físsil (urânio).
20. I. Incorreta
II. Incorreta
III. Correta
IV. Incorreta
21. Alternativa e
22. Alternativa e
23. Alternativa d
24. Alternativa d

25. Alternativa a
26. Alternativa d
27. Alternativa a
28. Alternativa c
29. a) $N_{B2} = 20\,000$ contagens/minuto
b) $V = 5000 \text{ cm}^3$
30. Alternativa d

Capítulo 11 • Cosmologia e partículas elementares

1. a) O primeiro, na Babilônia, enxergava a divindade no céu, enquanto no cristianismo o centro de tudo é o ser humano.
b) Muitas pessoas leem horóscopos e acreditam na influência dos astros em seus destinos e temperamento. Sob esse aspecto, a Astrologia não pode ser ignorada. Por outro lado, ela não é científica.
2. a) 32 vezes
b) Aproximadamente 310 milhões de anos
3. Na fase de gigante vermelha
4. $14 \cdot 10^6$ litros de gasolina
5. As luas não possuem massas suficientes para gerar gravidade que segure o hidrogênio; portanto, na formação desses astros, assim como na Terra, a abundância dos outros elementos é, na verdade, escassez de hidrogênio.
6. Como são elementos de massa atômica superior à do ferro, foram produzidos na explosão de uma supernova.
7. As noites seriam esplendorosamente claras.
8. A variação na frequência do som de uma buzina ouvida por uma pessoa em movimento em relação à fonte sonora.
9. Na natureza não encontramos valores de carga fracionados; para se obter tal valor é necessário utilizarmos grandes energias para separar os *quarks*.
10. Porque átomo significa indivisível, e o átomo se revelou composto de outras partículas. O nome *quark* foi propositalmente escolhido de uma palavra sem significado, imitando o ruído dos patos, depois encontrado na literatura de Joyce.
11. Porque as energias envolvidas correspondem a temperaturas extremamente altas, como se imagina ter acontecido nos primórdios do Universo.
12. 24 partículas elementares
13. Alternativa b
14. A obtenção de temperaturas da ordem de 10^{32} K
15. Resposta pessoal
16. Resposta pessoal
17. a) A densidade da anã branca é 10^3 vezes maior que a da Terra.
18. a) $d \approx 6,176 \cdot 10^{19}$ km
b) $v = 1,36 \cdot 10^{17}$ km/s
19. Alternativa b
21. Alternativa c

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!

- ♦ ABDALLA, M. C. B.; NETO, T. V. *Novas janelas para o Universo*. São Paulo: Unes, 2005. O livro, que faz parte da Coleção Paradidáticos – Série Novas Tecnologias, é constituído de seis capítulos: 1) O Universo em que vivemos; 2) Novas tecnologias: proporcionando ao Homem uma nova visão

do Universo; 3) O Universo em ondas de rádio e as micro-ondas cósmicas; 4) Uma radiografia do céu: o Universo em raios X e gama; 5) O Universo revelado pelas partículas elementares; 6) O Universo continua um grande desconhecido.

- ♦ BARANAUSKAS, V. *O celular e seus riscos*. Campinas: Ed. do Autor, 2001. O livro aborda as radiações eletromagnéticas e o funcionamento da telefonia celular: as radiações emitidas, os efeitos dessas radiações nos seres humanos, os limites seguros e outros fatores de risco.

- ♦ 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.
- ♦ BODANIS, D. *$E = mc^2$: uma biografia da equação que mudou o mundo e o que ela significa*. Rio de Janeiro: Ediouro, 2001.
- ♦ BRENNAN, R. *Gigantes da Física: uma história da Física moderna através de oito biografias*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998. O livro apresenta as biografias de: 1. Isaac Newton; 2. Albert Einstein; 3. Max Planck; 4. Ernest Rutherford; 5. Niels Bohr; 6. Werner Heisenberg; 7. Richard Feynman; 8. Murray Gell-Mann.
- ♦ BRODY, D. E.; BRODY, A. R. *As sete maiores descobertas científicas da história*. São Paulo: Companhia das Letras, 1999. O livro apresenta as sete descobertas científicas e as pessoas que as fizeram: A gravidade (Newton); A estrutura do átomo (Rutherford e Bohr); O princípio da relatividade (Einstein); O *big-bang* (Hubble); A evolução e a seleção natural (Darwin); A célula e a genética (Flemming e Mendell) e A estrutura da molécula de DNA (Watson e Crick).
- ♦ CHAVES, A.; SHELLARD, R. C. (Ed.). *Física para o Brasil: pensando o futuro*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2005. O livro aborda o desenvolvimento da Física e sua inserção na vida social e econômica do país.
- ♦ EINSTEIN: O homem além do mito. *Scientific American Brasil*: Gênios da Ciência. São Paulo: Duetto, n. 2, 2. ed. A edição apresenta a vida e a obra de Albert Einstein.
- ♦ FRONTEIRAS da Física. *Scientific American Brasil*. Edição Especial n. 26. Teoria das cordas, buracos negros, teletransporte, Física das partículas e neutrinos são alguns dos temas apresentados.
- ♦ 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.
- ♦ GOLDSMITH, B. *Gênio obsessivo: o mundo interior de Marie Curie*. São Paulo: Companhia das Letras, 2006. Da infância pobre na Polônia à consagração na França, o livro apresenta vida e obra de uma das mulheres mais inteligentes e corajosas de todos os tempos.
- ♦ HAMBURGER, E. W. *Ciências Físicas no Brasil*. São Paulo: Livraria da Física, 2006. Diversos autores da comunidade científica brasileira contam a história da Física no Brasil, destacando a atuação dos centros de pesquisa existentes nos variados ramos da Física teórica e experimental.
- ♦ MOURÃO, R. R. F. *Explicando a Teoria da Relatividade*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1997. O livro explica a importância de conhecer a relatividade e qual foi a real contribuição brasileira.
- ♦ ———. *Nas fronteiras da intolerância: Einstein, Hitler, a bomba e o FBI*. São Paulo: A Girafa, 2007. O livro fala da intolerância que marcou a vida de um dos grandes gênios da humanidade, Albert Einstein, e de sua capacidade de se contrapor a esse designio ao se afirmar como cientista brilhante,

como pacifista destemido, defensor intransigente das liberdades individuais, que nunca abandonou suas convicções.

- ♦ NATALE, A. A.; LEITE, V. *O universo sem mistérios: uma visão descomplicada da Física contemporânea: do big-bang às partículas*. Rio de Janeiro: Vieira e Lent, 2003. Os oito capítulos trazem temas presentes em todos os ramos do conhecimento humano, das minúsculas partículas elementares até a imensidão do cosmos.
- ♦ O PASSADO e o presente do Cosmos. *Scientific American Brasil*. Edição Especial n. 1. A edição aborda a moderna Cosmologia, as primeiras estrelas, o ciclo das galáxias, outros universos, ecos do *big-bang*, entre outros assuntos.
- ♦ RELATIVIDADE. *Scientific American Brasil*. Edição Especial n. 24. Vários artigos tratam da relatividade especial, dos buracos negros e estrelas de nêutrons, da relatividade geral, dos buracos de minhoca e propulsão *warp*, das imagens em 3D, incluindo dois apêndices.
- ♦ RIVA, M. *Os grandes experimentos científicos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. v. 1. 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 de 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.
- ♦ SCAFF, L. A. M. *Radiações*. São Paulo: Barcarola, 2002. O autor discute mitos e verdades sobre as radiações por meio de 60 perguntas e suas respectivas respostas.

Páginas indicadas para pesquisa e consulta

- ♦ Associação Brasileira de Energia Nuclear:
<www.aben.com.br/>.
- ♦ Caderno Brasileiro de Ensino de Física:
<www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica>.
- ♦ Revista Ciência Hoje:
<<http://cienciahoje.org.br/>>.
- ♦ Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN):
<www.cnen.gov.br>.
- ♦ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen):
<www.ipen.br>.
- ♦ Revista Brasileira de Ensino de Física:
<www.scielo.br/rbepf>.
- ♦ Scientific American Brasil:
<www.sciam.com.br>.
- ♦ Sociedade Brasileira de Física:
<www.sbfisica.org.br>.
- ♦ Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência:
<www.sbpnet.org.br>.

Acessos em maio 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*. Porto Alegre: 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*. v. I. Das origens à Grécia. v. II. Oriente, Roma e Idade Média. v. III. Da Renascença à Revolução Científica. v. 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

absorção, 201
agulha magnética, 116
Ampère, André-Marie, 110
amperímetro, 69
amplitude, 163
antipartícula, 272
Aristóteles, 161

B

balança de torção, 18
bobina, 141
Bohr, Niels, 186, 201, 208
bússola, 117

C

campo
elétrico, 83
magnético, 115
capacidade eletrostática, 102
carga elétrica, 18
comprimento de onda, 159
constante de Planck, 204
contração da distância, 197
Curie, Irène Joliot, 246
Curie, Marie, 245

D

densidade de probabilidade, 215
diferença de potencial, 28
difração, 165

E

efeito Joule, 24
Einstein, Albert, 187, 216
eletroímã, 124
eletroscópio, 79
energia
cinética, 199, 206
elétrica, 12, 13
mecânica, 62
potencial, 32, 34
térmica, 29, 67, 175, 255
espaço, 83, 85
espectro eletromagnético, 159

F

Faraday, Michael, 144
fluxo magnético, 143
força
de atração, 16, 76
elétrica, 81
magnética, 127

G

gerador elétrico, 32

H

Hubble, Edwin Powell, 276

I

ímã, 115
intensidade de corrente elétrica, 22

K

Kirchhoff, Gustav Robert, 72

L

lei
de Coulomb, 81
de Faraday-Neumann, 148
de Lenz, 148
de Ohm, 36
linhas
de indução, 143
de transmissão, 13, 37

M

Maxwell, James Clerk, 180
Mileto, Tales de, 14
Millikan, Robert Andrews, 92

O

Oersted, Hans Christian, 133
Ohm, Georg Simon, 51
ondas
de rádio, 162
eletromagnéticas, 158
sonoras, 163, 171
órbita, 210

P

Planck, Max, 186, 204, 210

Q

quantidade de movimento, 273

R

radiação térmica, 202
resistividade, 37
Röntgen, Wilhelm., 175

S

satélite, 195, 255
solenóide, 124

T

telefone, 162, 166
telégrafo, 162
teoria
da relatividade, 186, 188, 189
do *big-bang*, 266
geral da relatividade, 187
quântica, 201
Tesla, Nikola, 45
transformador, 152

V

velocidade da luz, 159
Volta, Alessandro, 19
voltímetro, 69

Manual do Professor

Física

VOLUME 3

Sumário

1	Conversa com o professor	291
2	Os PCNEM e a história do ensino de Física.....	291
3	Aprender e ensinar Física para quê?	294
4	O Novo Enem	299
5	Sugestões de aprofundamento	302
6	Linha pedagógica da Coleção e estrutura da obra	305
7	Discussão sobre avaliação	308
8	Estratégias didáticas e o conteúdo digital na prática pedagógica.....	313
9	Temas transversais	318
10	Sugestões de abordagem e resoluções	321
	Capítulo 1	321
	Capítulo 2.....	324
	Capítulo 3.....	330
	Capítulo 4	336
	Capítulo 5.....	340
	Capítulo 6	345
	Capítulo 7	353
	Capítulo 8	357
	Capítulo 9	362
	Capítulo 10.....	372
	Capítulo 11	379

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

Os PCNEM e a história do ensino de Física

O novo paradigma

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 requisitos 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 encaminha-mento 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 aluno 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 autocohecimento, 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 gigantes, 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 (1809-1882), 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 indicio

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, suprimindo 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, mudou 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 labora-

tório, 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 pre-estabelecida 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 Psychology*, 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 julgar 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 e 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, reprovando. Ensino porque busco, porque indaguei, porque indago e me indago. Pesquisa para constatar, constatando, intervenho, intervindo educo e me educo. Pesquisa 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.

Antônio 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, Resnick, 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 – Tipler, 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 Átomos

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 hetero-

geneidade, 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 seqüenciamento 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 box, 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, irreversível. 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:

$$m = 3 \text{ kg}$$

$$F_r = 6 \text{ N}$$

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 especialmente 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.

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

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.

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 vingam, 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, discutiremos 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 disponha 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 otimizaría 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 adequam 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 nexos a tudo que for ensinado, observando que o 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 estíletos 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 depa-

ram 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 multidisciplinares.

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 naturalmen-

te, 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 intercam-biam 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.



Sugestões de abordagem e resoluções

Apresentamos sugestões de abordagem acompanhadas de resoluções dos exercícios de cada capítulo. As sugestões são baseadas nas experiências em sala de aula que tivemos. No entanto, 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 seu método de aula.

UNIDADE 1 – Fenômenos elétricos em condutores

CAPÍTULO 1 – Energia e corrente elétrica

Quando concebemos os capítulos de Eletricidade, Magnetismo e Eletromagnetismo, pensamos em proporcionar um conjunto de informações que desse ao aluno a ideia de como os fenômenos eletromagnéticos fazem parte do nosso cotidiano, para desfazer a ideia de que esse assunto é “abstrato”.

Assim, invertemos a ordem em que os assuntos são tradicionalmente apresentados.

Para identificar os princípios físicos do cotidiano do aluno, iniciamos com a Eletrodinâmica, apresentada com exemplos relativos ao funcionamento dos dispositivos que povoam a rotina do aluno. Abusando um pouco da linguagem, chamaremos essa parte de “Eletricidade com fios”.

Depois virão a Eletrostática e os Princípios do Eletromagnetismo (“Eletricidade sem fios”).

Finalmente a Indução eletromagnética e as Ondas eletromagnéticas (“Eletricidade no mundo moderno”), para completar os diversos tópicos relevantes.

Neste capítulo, em particular, pretendemos que o estudante se familiarize com os fenômenos elétricos, que fazem parte de sua vida.

1. A importância da eletricidade

Neste tópico, procuramos desenvolver as habilidades e competências relativas ao entendimento dos fenômenos cotidianos e das possíveis leis físicas que os regem.

O ponto de partida é que não há vida sem movimento e, portanto, sem transformações entre as diversas modalidades de energia. Assim, embora a energia elétrica não seja um fim, é um importante meio de distribuir energia para a população, em larga escala.

Sugerimos que a leitura do texto inicial de David Bodanis seja feita acompanhada de uma discussão sobre o que aconteceria no dia a dia das pessoas caso faltasse energia elétrica.

Além disso, o professor pode conduzir a discussão com observações como:

- Que energia usamos ao ligar um liquidificador? A energia mecânica.
- Que energia usamos ao acender uma lâmpada? A energia luminosa.

Entretanto, todas essas formas de energia, em nossa residência, provêm da energia elétrica.

Nesse momento, consideramos importante que você leve o aluno a perceber que é mais econômico, primeiro, converter a energia em energia elétrica e depois distribuir essa energia.

Além disso, o professor pode explicar que a energia elétrica pode ser transportada com poucas perdas.

Após entender a importância da energia elétrica, talvez seja interessante mostrar que ela está associada a propriedades microscópicas da matéria e que seu conhecimento nunca passou de mera curiosidade, até que Alessandro Volta fez sua experiência.

Então, é possível recordar a estrutura do átomo, de maneira simples, a partir do que já foi desenvolvido em Química. Os conceitos de núcleo e eletrosfera e de ganho ou perda de elétrons levam à ideia de corpos eletrizados, positiva ou negativamente.

Para o entendimento dessas ideias, basta que o estudante tenha noções do conceito de energia e tenha, em Química, visto alguns rudimentos de estrutura da matéria.

O entendimento histórico do fato de que os fenômenos elétricos são ligados à estrutura microscópica dos materiais e com propriedades das partículas elementares permite estabelecer o princípio da atração e repulsão e a medida de carga elétrica.

Física tem história

A leitura do texto pode ser útil para que o aluno perceba a evolução de uma teoria, desenvolvendo suas competências de entendimento dos modelos teóricos como explicações da realidade. A resposta da questão proposta é pessoal.

2. Medida de carga elétrica

Este é um tópico que você pode começar dialogando com os alunos sobre como, na Química, é comum expressar a carga de um íon. Por exemplo: Na^{1+} ; Cl^{1-} .

Você pode perguntar o significado dos números $1+$ e $1-$ e concluir, em conjunto com a classe, que representam um elétron a menos ou um elétron a mais, respectivamente.

Esses números são medidas naturais de cargas elétricas, em uma unidade não compatível com o SI.

Para refletir

Caso o número de prótons seja igual ao número de elétrons, o corpo está neutro e sua carga é igual a zero.

3. A experiência de Volta: corrente elétrica

Aqui, a lei de Du Fay pode ser reapresentada e rediscutida, e pequenos experimentos com pedaços de papel, canetas esferográficas e bolinhas de isopor podem ilustrar as conclusões teóricas.

Juntando a ideia de energia com a de carga elétrica, pode-se associar energia com trabalho da força elétrica microscópica.

Ou seja, a energia elétrica, para poder ser utilizada, requer movimento de corpos eletrizados, isto é, corrente elétrica, o que leva à experiência de Volta.

Por que essa experiência foi importante? Essa é uma pergunta que pode ser utilizada para um trabalho em equipe, e uma pequena redação sobre ela pode ser solicitada.

Completando o tópico, você pode mostrar que a existência de corrente elétrica depende, sempre, de portadores de carga livres, que podem ser elétrons e/ou íons. Essa corrente elétrica pode ser classificada em eletrônica, iônica e mista.

4. Corrente elétrica: sentido e intensidade

O início deste tópico pode ser discutido apresentando-se os tipos de portadores de carga e seus sinais. Em seguida, você pode mostrar que um elétron que se move em certo sentido equivale à sua ausência de mobilidade (carga positiva) no sentido oposto.

Fica, então, natural estabelecer a convenção para o sentido da corrente. É importante que o aluno entenda o que é convenção: deve ser estabelecida para facilitar o estudo e, caso seja invertida, não altera a descrição do fenômeno.

Finalizamos com o conceito de intensidade de corrente, que decorre naturalmente da observação do movimento de cargas por uma seção transversal do condutor.

O exercício resolvido, caso seja discutido cuidadosamente, pode completar o assunto de maneira integrada (sentido e intensidade).

Física explica

Este tópico trata dos efeitos da corrente elétrica e pode ser objeto de pesquisa dos alunos, que, divididos em equipes, podem apresentar, na forma de seminário, os diversos efeitos da corrente elétrica.

A corrente elétrica pode causar diversos danos ao corpo humano. Dependendo da intensidade, ela pode danificar tecidos, provocar coágulos nos vasos sanguíneos e queimaduras na pele, além de paralisar a respiração e os músculos cardíacos. Veja quadro na página 48 do Livro do Aluno.

Entretanto, há pesquisas em reabilitação de pacientes com lesão medular, paraplégicos, visando o retorno dos movimentos dos membros inferiores e superiores. Nesses estudos, é utilizada tecnologia de Estimulação Elétrica Neuromuscular (EENM), em que, por eletrodos, são aplicados impulsos elétricos de baixa intensidade nas terminações do sistema nervoso periférico dos pacientes. Os impulsos elétricos podem servir para gerar o movimento de esticar o braço ou prender objetos com os dedos, por exemplo. Para a pesquisa, indicamos o texto “Parceria de EESC-UNICAMP ajuda pacientes com lesão medular”, disponível no site: <www.cruesp.sp.gov.br/?p=7012>. Acesso em: maio 2016.

Experimento

A construção de uma pilha pode ser uma atividade interdisciplinar interessante, pois reúne conhecimentos de Física e Química.

Caso haja laboratório na escola, você pode incentivar os alunos a fazer essa experiência. Caso não haja, você pode solicitar que façam o experimento em equipe, em local adequado, que deve ser vistoriado antecipadamente por você.

A seguir sugestões de respostas para as questões da seção.

1. A solução de sulfato de cobre perde elétrons. A solução de sulfato de magnésio ganha elétrons.
2. O sentido convencional da corrente na solução é da esquerda para a direita.

Atividades complementares

Sugerimos que os alunos, reunidos em equipe, reflitam sobre as transformações de energia nos seguintes elementos:

- liquidificador;
- ferro elétrico;
- televisão;
- lâmpada;

- rádio;
- impressora;
- computador;
- pilha.

Ao final da atividade, uma apresentação escrita, na forma de relatório, pode ser utilizada como complemento de avaliação.

A seguir apresentamos alguns exercícios complementares para serem utilizados em avaliações ou como apoio.

1. (Enem) Segundo matéria publicada em um jornal brasileiro, *Todo o lixo (orgânico) produzido pelo Brasil hoje – cerca de 20 milhões de toneladas por ano – seria capaz de aumentar em 15% a oferta de energia elétrica. Isso representa a metade da energia produzida pela hidrelétrica de Itaipu. O segredo está na celulignina, combustível sólido gerado a partir de um processo químico a que são submetidos os resíduos orgânicos.*

O Estado de S. Paulo, 1º/1/2001.

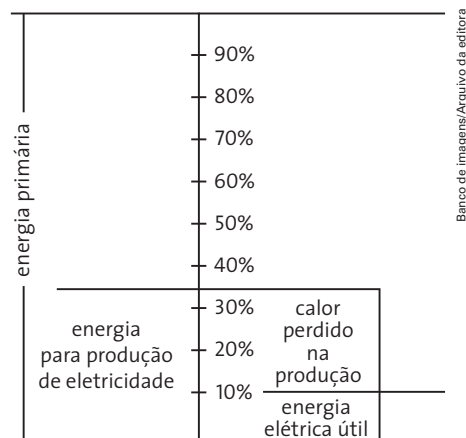
Independentemente da viabilidade econômica desse processo, ainda em fase de pesquisa, na produção de energia pela técnica citada na matéria, a celulignina faria o mesmo papel:

- a) do gás natural em uma usina termelétrica.
- b) do vapor de água em uma usina termelétrica.
- c) da queda de água em uma usina hidrelétrica.
- d) das pás das turbinas em uma usina eólica.
- e) do reator nuclear em uma usina termonuclear.

Resolução:

A celulignina é um combustível, assim como o gás natural. Alternativa **a**.

2. (Enem) O diagrama mostra a utilização das diferentes fontes de energia no cenário mundial.



Embora aproximadamente um terço de toda a energia primária seja orientada à produção de eletricidade, apenas 10% desse total são obtidos em forma de energia elétrica útil. A pouca eficiência do processo de produção de eletricidade deve-se, sobretudo, ao fato de as usinas:

- a) nucleares utilizarem processos de aquecimento, nos quais as temperaturas atingem milhões de graus Celsius, favorecendo perdas por fissão nuclear.
- b) termelétricas utilizarem processos de aquecimento a baixas temperaturas, apenas da ordem de centenas de graus Celsius, o que impede a queima total dos combustíveis fósseis.

- c) hidrelétricas terem o aproveitamento energético baixo, uma vez que parte da água em queda não atinge as pás das turbinas que acionam os geradores elétricos.
- d) nucleares e termelétricas utilizarem processos de transformação de calor em trabalho útil, no qual as perdas de calor são sempre bastante elevadas.
- e) termelétricas e hidrelétricas serem capazes de utilizar diretamente o calor obtido do combustível para aquecer a água, sem perda para o meio.

Resolução:

Segundo o gráfico a energia perdida é na forma de calor, isso acontece predominantemente com as usinas termelétricas e nucleares. Alternativa **d**.

3. (Vunesp-SP) Mediante estímulo, $2 \cdot 10^5$ íons de K^+ atravessam a membrana de uma célula nervosa em 1,0 milissegundo. Calcule a intensidade dessa corrente elétrica, sabendo que a carga elementar é $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Resolução:

$$i = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} = \frac{N \cdot e}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1 \cdot 10^{-3}} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ A}$$

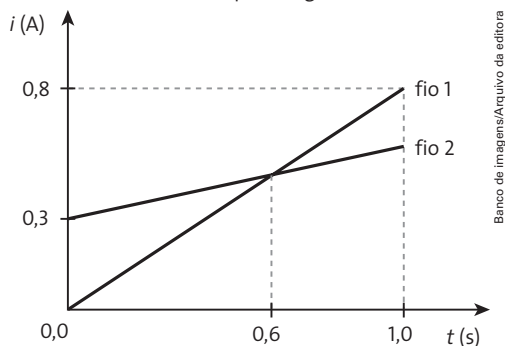
4. (UFPE) Suponha que o feixe de elétrons em um tubo de imagens de televisão tenha um fluxo de $8,1 \cdot 10^{15}$ elétrons por segundo. Qual a corrente do feixe em unidades de 10^{-4} A?
- a) 13
b) 15
c) 17
d) 19
e) 23

Resolução:

$$i = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} = \frac{N \cdot e}{\Delta t} = \frac{8,1 \cdot 10^{15} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1} = 13,0 \cdot 10^{-4} \text{ A}$$

Alternativa **a**.

5. (UFRGS-RS) Selecione a alternativa que preenche corretamente as lacunas do texto abaixo, na ordem em que elas aparecem. As correntes elétricas em dois fios condutores variam em função do tempo de acordo com o gráfico mostrado a seguir, onde os fios estão identificados pelos algarismos 1 e 2.



No intervalo de tempo entre zero e 0,6 s, a quantidade de carga elétrica que atravessa uma seção transversal do fio é maior para o fio do que para o outro fio; no intervalo entre 0,6 s e 1,0 s, ela é maior para o fio do que para o outro fio; e no intervalo entre zero e 1,0 s, ela é maior para o fio do que para o outro fio.

- a) 1-1-2
b) 1-2-1
c) 2-1-1
d) 2-1-2
e) 2-2-1

Resolução:

A quantidade de carga elétrica que atravessa a seção transversal pode ser calculada pela área abaixo da curva do gráfico $i \times t$.

Analisando o gráfico, concluímos que para o intervalo de tempo de zero a 0,6 s a $A_2 > A_1$, portanto $Q_2 > Q_1$.

Para o intervalo de tempo de 0,6 s e 1,0 s, a $A_1 > A_2$, portanto $Q_1 > Q_2$.

Para o intervalo de tempo de zero e 1,0 s, $A_2 > A_1$, portanto $Q_2 > Q_1$.

Alternativa **d**.

Resolução dos exercícios

- 1 a) Sabendo que $10 \text{ MW} = 10^4 \text{ kW}$ e que o investimento para cada 1 kW é de US\$ 100, o custo da construção é de:
US\$ $100 \cdot 10^4$ ou US\$ 1000 000
- b) O investimento para cada 1 kW é de US\$ 2000, o custo da construção é de:
US\$ $2000 \cdot 10^4$ ou US\$ 20 000 000
- c) O consumo mensal de energia devido à lâmpada é calculado da seguinte forma:
 $\Delta E = p \cdot \Delta t = 100 \cdot 5 \cdot 30 = 15 \text{ kWh}$
O custo mensal será de: $C = \frac{15 \cdot 150}{1000} \Rightarrow \text{R\$ } 2,25$
- d) A energia consumida é a mesma do item anterior.
 $\Delta E = p \cdot \Delta t = 100 \cdot 5 \cdot 30 = 15 \text{ kWh}$
O custo mensal será de: $C = \frac{15 \cdot 200}{1000} \Rightarrow \text{R\$ } 3,00$
- 2 Para ficar com carga elétrica negativa, o corpo deve receber elétrons. Alternativa **c**.
- 3 a) O corpo A inicialmente neutro cede elétrons, ficando positivamente carregado, $Q_A > 0$.
O corpo B inicialmente neutro recebe elétrons, ficando negativamente carregado, $Q_B < 0$.
- b) Corpos carregados com cargas elétricas opostas se atraem.
- 4 a) Corpos eletricamente neutros, quando recebem elétrons, ficam com carga elétrica negativa. Corpos eletricamente neutros, ao cederem elétrons, ficam positivamente carregados.
Corpo A cede elétrons e fica com carga elétrica positiva.
Corpos B e C recebem elétrons e ficam com cargas elétricas negativas.
- b) A e B trocam forças de atração.
- c) B e C trocam forças de repulsão.
- 5 I. **Incorreta.** A carga positiva indica que o corpo tem elétrons a menos que o número de prótons, mas isso não significa a ausência de elétrons.

II. **Incorreta.** Se a carga elétrica do corpo for negativa, ele possui mais elétrons do que prótons.

III. **Correta.**

- 6 a) Corrente iônica.
b) Corrente eletrônica.
- 7 a) H^+ significa que o hidrogênio perdeu 1 elétron, ficando com carga elétrica positiva de $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
b) Corrente mista.
- 8 Bateria de automóvel – corrente iônica
Lâmpada incandescente – corrente eletrônica
Lâmpada fluorescente – corrente mista
- 9 a) $Q = N \cdot e = 10^{18} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,16 \text{ C}$
 $i = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} = \frac{0,16}{1} = 0,16 \text{ A}$
b) $|\Delta Q| = i \cdot \Delta t = 0,16 \cdot 10 = 1,6 \text{ C}$
- 10 a) A carga elétrica corresponde à área do triângulo:
 $\Delta q = \frac{(B \cdot h)}{2} = \frac{3 \cdot 4}{2} = 6 \text{ C}$
b) $i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{6}{3} = 2 \text{ A}$
- 11 a) $i_{\text{iônica}} = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} = \frac{|N \cdot e|}{\Delta t} = \frac{|2 \cdot 10^{18} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}|}{1} = \frac{0,32}{1} = 0,32 \text{ A}$
b) $i_{\text{eletrônica}} = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} = \frac{|N \cdot e|}{\Delta t} = \frac{|3 \cdot 10^{18} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}|}{1} = \frac{0,48}{1} = 0,48 \text{ A}$
c) $i_{\text{total}} = i_{\text{iônica}} + i_{\text{eletrônica}} = 0,8 \text{ A}$

Retomando

- 12 Verificando as unidades de medida, temos:

$$[\Delta t] = h$$

$$[i] = A$$

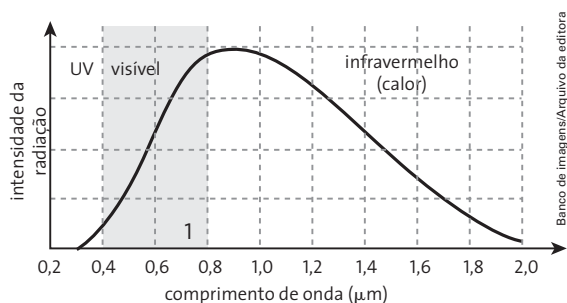
$$\Delta Q = i \cdot \Delta t$$

$$[\Delta Q] = A \cdot h$$

A unidade de medida ampère-hora indica a quantidade de carga elétrica.

Alternativa e.

- 13 A área do gráfico pode ser calculada contando-se o número de quadradinhos abaixo da curva.



O número de quadradinhos da parte cinza é de aproximadamente 5 e de toda a área abaixo da curva é de aproximadamente 20.

$$n = \frac{E_{\text{visível}}}{E_{\text{total}}} = \frac{5}{20} \approx 25\%.$$

Alternativa c.

- 14 a) $\Delta Q = i \cdot \Delta t = 6,0 \cdot 3600 = 21600 \text{ C}$
b) $\Delta Q = i \cdot \Delta t = 6,0 \cdot 20 \cdot 60 = 7200 \text{ C}$
 $M_{\text{prata}} = 7200 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} = 7,920 \text{ g}$
- 15 Para o relógio marcar a hora indicada, 20 filetes devem ficar acesos. Assim, a corrente elétrica vale:
 $i = 20 \cdot 10 = 200 \text{ mA}$ ou $0,2 \text{ A}$.
Logo, como $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, temos: $0,2 = \frac{720}{\Delta t}$ e, portanto:
 $\Delta t = \frac{720}{0,2} = 3600 \text{ s} = 1 \text{ h}$
- Alternativa c.
- 16 A matriz energética brasileira é, predominantemente, composta de hidrelétricas. Além disso, nos últimos anos houve um grande progresso na utilização de energia de biomassa.
- Alternativa d.

CAPÍTULO 2 – Os circuitos elétricos nas residências

Neste capítulo pretendemos que o aluno entenda uma instalação elétrica residencial e quais são os fatores relevantes na estimativa do custo da energia elétrica consumida.

Consideramos que esta é uma maneira de apresentar alguns conceitos de eletrodinâmica, como diferença de potencial, potência elétrica e resistência elétrica, utilizando a observação do espaço físico do estudante.

As perguntas iniciais podem ser os primeiros pontos de discussão, pois todos já utilizaram tomadas e “benjamins” para alguma finalidade. É um bom momento para retomar a abertura desta Unidade após o entendimento dos conceitos do capítulo.

1. Bipolos e transformações de energia

Acreditamos que o ponto de partida da metodologia a ser desenvolvida é o entendimento das grandezas físicas que caracterizam um aparelho elétrico: os valores nominais de sua ddp e de sua potência.

Você pode mostrar uma lâmpada (110 V; 100 W) e interpretar o que esses números significam e, a partir disso, apresentar o conceito de ddp (energia por unidade de carga) e de potência (energia por unidade de tempo).

Essas duas ideias combinadas levam à expressão da potência elétrica.

Uma vez estabelecidos esses conceitos, a estimativa do consumo mensal de uma residência pode ser trabalhada. Cada estudante pode analisar se a conta de luz de sua casa está coerente com seus cálculos.

Um ponto adicional a ser explorado para que o aluno passe a dominar os conceitos envolvidos é que as transformações de energia requerem realização de trabalho, e o conceito de ddp pode ser formulado como o trabalho realizado pela força elétrica por unidade de carga elétrica transportada.

Além disso, é possível enfatizar que o conceito de potência é necessário para os fatores determinantes da potência elétrica e, como consequência, do consumo de energia elétrica associado ao funcionamento de um bipolo.

Para refletir

$$\text{Consumo} = P \cdot \Delta t = 100 \cdot 3\,600 = 3,6 \cdot 10^5 \text{ J}$$

$$\text{Sendo } 1 \text{ J} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \text{ kW, temos:}$$

$$\text{Consumo} = 3,6 \cdot 10^5 \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \text{ kW} = 0,1 \text{ kWh}$$

2. Classificação dos bipolos e definição de resistência elétrica

Para iniciar este tópico, é possível, mais uma vez, listar os diversos aparelhos já discutidos no capítulo anterior, de acordo com as transformações de energia associadas, que permite sua classificação: geradores, receptores ativos e receptores passivos.

Uma primeira divisão pode ser proposta considerando os dois sentidos diferentes de transformação de energia: outra modalidade em elétrica (geradores); elétrica em outra modalidade (receptores).

Um ponto que você pode ressaltar é que, nos geradores, há aumento de energia potencial elétrica e, nos receptores, diminuição. Isso permite ao aluno identificar o sentido da corrente elétrica em cada tipo de bipolo sem precisar recorrer a memorizações.

Assim, essa classificação permite que você desenvolva nos alunos habilidades e competências de expressão e interpretação de fenômenos compatíveis com seu cotidiano em linguagem física.

A distinção entre receptores ativos e resistivos pode ser apresentada a partir de uma diferenciação natural entre eletrodomésticos. Por exemplo: liquidificador (ativo); ferro de passar roupa (resistivo).

Finalmente, a definição de resistência elétrica pode ser apresentada, acompanhada de suas unidades e seguida da dedução de novas expressões para a potência elétrica.

Acreditamos ser importante, neste ponto, que o aluno tenha clareza de que:

- para uma dada *ddp*, maior resistência implica menor potência;
- para uma dada corrente, maior resistência implica maior potência.

3. Leis de Ohm

Na apresentação das leis de Ohm é interessante mostrar aos alunos que, nos resistores, *ddp* e corrente são grandezas diretamente proporcionais, isto é, o quociente entre a *ddp* e a corrente é uma constante que não depende da corrente e da *ddp*.

Você pode recordar o conceito matemático de grandezas diretamente proporcionais, isto é, duas grandezas são diretamente proporcionais quando seu quociente é uma constante que não depende dessas grandezas.

É interessante lembrar, por exemplo, o conceito de massa específica de uma substância: quociente entre massa e volume, que não depende da massa e do volume, pode ser ilustrativo para o aluno.

O passo seguinte (segunda lei de Ohm) pode ser iniciado com a pergunta “De quem depende a resistência elétrica?”, o que permite o enunciado da segunda lei de Ohm.

Acreditamos que você possa usar o exercício resolvido para mostrar, com detalhes, o uso do conjunto da primeira e da segunda leis de Ohm, mais uma vez, trabalhando as habilidades de expressar e avaliar numericamente grandezas físicas que modelam fenômenos cotidianos.

4. Associações: série e paralelo

Este tópico pode começar com uma questão a ser discutida: o que fazer quando não dispomos do resistor de que precisamos? Essa ideia proporciona a oportunidade de explicar as associações de resistores.

O passo seguinte pode ser a discussão de dois conceitos essenciais para o prosseguimento do raciocínio: fio ideal (corrente sem perda de energia) e lei dos nós (conservação do número de partículas).

Uma pergunta a ser respondida é: “Tenho uma bateria de 12 V e preciso ligar uma lâmpada de *ddp* nominal 3 V. O que devo fazer?”. Explicar, então, a associação em série de resistores.

Aparecerá, então, a ideia de equivalência, presente em todo o raciocínio científico, sendo necessária para o entendimento das associações de resistores. Esclareça que equivalência, aqui, é relativa ao ponto de vista energético.

Isto é, resistores equivalentes convertem, no mesmo intervalo de tempo, a mesma quantidade de energia elétrica em térmica, ou seja, têm a mesma potência. Essa ideia permite a dedução da expressão da resistência equivalente de uma associação em série de resistores.

Uma nova pergunta a ser respondida é: “Como faço para ligar todos os aparelhos da casa em 110 V?”. Explicar, então, a associação em paralelo de resistores.

Novamente, a ideia de equivalência se faz presente em todo o raciocínio científico, sendo mais uma vez necessária para o entendimento das associações de resistores. A equivalência, aqui, é relativa ao ponto de vista energético, ou seja, resistores equivalentes convertem, no mesmo intervalo de tempo, a mesma quantidade de energia elétrica em térmica, isto é, têm a mesma potência. Essa ideia, como já afirmamos, permite a dedução da expressão da resistência equivalente de uma associação em paralelo de resistores.

O exercício resolvido (associação mista de resistores) permitirá a integração dos conceitos do tópico, mais uma vez desenvolvendo competências de expressão matemática de leis físicas, associadas ao cotidiano.

5. Instalações elétricas residenciais

Este tópico pode ser iniciado com a leitura do texto apresentado em **Física tem história**, intitulado *A guerra das correntes*, que trata da diferenciação das correntes contínua e alternada.

Os alunos podem realizar uma atividade em equipe sobre o texto. Ao final, você pode explicar que as leis físicas aplicadas para a corrente contínua são válidas para a corrente alternada, com valores eficazes nos cálculos.

A principal vantagem da geração de energia elétrica em corrente alternada é a sua facilidade de transmissão a grandes distâncias.

O esquema da instalação residencial pode ser feito indicando os diversos circuitos independentes, com associações em paralelo.

Várias curiosidades aparecerão, sendo explicáveis pela teoria desenvolvida: Por que o benjamim tem limite?; Quando precisamos usar fios mais grossos?; Qual é a função de um fusível?; Qual é a função de um disjuntor?; O que significa curto-circuito?

Física explica

Este item trata dos choques elétricos e do curto-circuito e é uma oportunidade interessante para uma nova atividade em equipe. Cada equipe pode realizar um seminário associado a um tópico proposto: choque por circuito energizado; choque por corpo eletrizado;

choque por descarga atmosférica e curto-circuito. A seguir as sugestões de respostas para as questões propostas.

1. Caso a pessoa esteja molhada, sua resistência elétrica é menor e, portanto, pode ser percorrida por correntes mais intensas. Esse fato implica choques mais intensos e, portanto, mais perigosos.
2. Não. Curto-circuito é, apenas, um trecho de circuito de resistência desprezível.

Em construção

Neste capítulo prestamos a nossa homenagem ao físico alemão Georg Simon Ohm. Você pode recomendar aos alunos uma pesquisa nos meios de informação para contextualizar seus trabalhos na história e verificar como suas contribuições influenciaram na vida em sociedade. Mencione que Ohm obteve seu doutorado em Matemática, embora tivesse uma grande atração pela Física.

Trabalho em equipe

Sugira aos alunos que olhem os disjuntores no quadro de força de casa e observem suas correntes nominais. Em seguida, considerando a tensão nominal da instalação, peça que estimem quais aparelhos estão em cada circuito.

Por exemplo, se o disjuntor indicar o número 20, isto é, 20 A, para uma tensão nominal de 110 V, há uma potência associada a esse disjuntor de 2 200 W. Logo, ele pode estar no circuito de:

- 5 lâmpadas de 100 W;
- 1 máquina de lavar de 500 W;
- 1 aparelho de som de 200 W;
- 1 ferro de passar roupa de 1 000 W.

Qualquer aparelho adicional fará com que o disjuntor desarme e proteja a instalação de superaquecimento. Com base nisso, as diversas equipes podem esboçar plantas de distribuição de circuitos nas suas residências e compará-las.

O trabalho em equipe, uma pesquisa de campo, trará aos alunos ideias sobre como definir estratégias para economia de energia. As estratégias propostas pelos grupos podem ser discutidas, comparadas e apresentadas à comunidade, que as utilizará para exercer sua cidadania.

Experimento

A atividade é de utilidade no sentido de desenvolver habilidades e competências de avaliação numérica de grandezas físicas. As estratégias de cálculo e os resultados obtidos podem ser mostrados e discutidos para verificar as diversas maneiras de expressar matematicamente as leis físicas.

As respostas podem variar de acordo com a cidade em que o aluno mora, com os eletrodomésticos que costuma utilizar e com seus hábitos.

A seguir, exemplos de respostas.

1. Normalmente é de 127 V.
2. Os dados nominais, em geral, são a potência e a tensão. Usando a equação $P = U \cdot i$ é possível calcular cada uma das correntes.
3. Os valores habituais podem ser comparados entre os alunos. O Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética (PROCEL) uma estimativa de consumo mensal de eletrodomésticos, que pode ser consultada em: <www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>. Acesso em: maio 2016.
4. Basta usar a corrente de cada dispositivo (item 2) e somá-la.

Atividades complementares

A seguir apresentamos alguns exercícios complementares para serem utilizados em avaliações ou como apoio.

1. O feixe de elétrons de um tubo de televisão é acelerado por uma *ddp* de 15 000 V. Determine a energia adquirida pelo feixe:
a) em eV;
b) em J.

Resolução:

Para um feixe de N elétrons, a energia adquirida pelo feixe é de:

a) $E = N \cdot 15\,000 \text{ eV}$

b) Lembrando que $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, temos:

$$E = N \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 15\,000$$

$$E = N \cdot 2,4 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

2. Uma pessoa resolveu trocar o aparelho de televisão convencional, de 70 W, de sua residência por um de plasma, de 220 W. Sabendo-se que na residência o aparelho fica ligado 6 horas por dia:
a) Qual será o aumento no consumo mensal de energia após a troca de aparelho?
b) Considerando que o preço do kWh é R\$ 0,30, qual será o valor do aumento da conta mensal de consumo de energia elétrica da residência?

Resolução:

- a) O consumo em um dia da TV convencional pode ser calculado como se segue:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow 70 = \frac{\Delta E}{6} \Rightarrow \Delta E = 0,42 \text{ kWh}$$

O consumo em um dia da TV de plasma é de:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow 220 = \frac{\Delta E}{6} \Rightarrow \Delta E = 1,32 \text{ kWh}$$

O aumento do consumo em um dia é de:

$$E = 1,32 - 0,42 = 0,9 \text{ kWh}$$

Em um mês de 30 dias, será de:

$$E = 0,9 \cdot 30 = 27 \text{ kWh}$$

- b) Com o aumento de 27 kWh por mês e o custo da energia elétrica em R\$ 0,30 por kWh, o aumento da conta será de: $0,30 \cdot 27 = \text{R\$ } 8,10$.
3. Quanto tempo uma lâmpada de dados nominais (100 W; 120 V) precisa permanecer ligada para gastar a mesma energia que um chuveiro de dados nominais (2 400 W; 120 V) ligado durante 30 min?

Resolução:

$$\Delta E = P \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta E = 2\,400 \cdot 0,5 = 1,2 \text{ kWh}$$

Para consumir essa energia a lâmpada deve permanecer acesa durante 12 h.

$$\Delta E = P \cdot \Delta t \Rightarrow 1,2 = 0,1 \cdot \Delta t_L \Rightarrow \Delta t_L = 12 \text{ h}$$

4. Um fio de comprimento L e seção transversal de área S passa por uma máquina de trefilar que aumenta o comprimento do fio para $9L$. Sabendo que a resistência do fio original era R e supondo que não há perda de material, qual será a nova resistência elétrica do fio ao sair da máquina de trefilar?

Resolução:

Para a situação descrita, a densidade e a massa devem permanecer constantes.

$m = d \cdot V$ e $V = A \cdot L$, onde A é a área do fio e L seu comprimento.

Para aumentar o comprimento do fio em 9 vezes, deve-se diminuir sua área também em 9 vezes.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

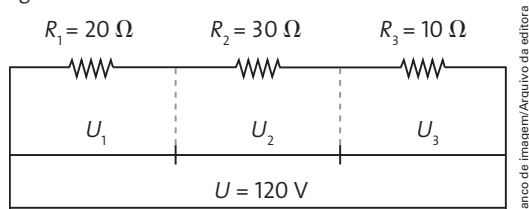
$$R' = \rho \frac{9L}{\frac{A}{9}} = 81R$$

5. Três resistores $R_1 = 20 \Omega$, $R_2 = 30 \Omega$ e $R_3 = 10 \Omega$ são associados em série, e uma ddp de 120 V é aplicada entre os terminais da associação. Determine:

- A resistência equivalente da associação.
- A intensidade de corrente em cada resistor.
- A ddp em cada resistor.

Resolução:

O esquema do circuito pode ser representado pela seguinte figura:



a) $R_{\text{série}} = R_1 + R_2 + R_3$

$$R_{\text{série}} = 20 + 30 + 10 = 60 \Omega$$

Como a corrente tem o mesmo valor nos três resistores, temos:

$$U = R \cdot i \Rightarrow 120 = 60 \cdot i \Rightarrow i = 2 \text{ A}$$

- b) Idem ao item a.

c) Resistor 1: $U_1 = R_1 \cdot i \Rightarrow U_1 = 20 \cdot 2 = 40 \text{ V}$

Resistor 2: $U_2 = R_2 \cdot i \Rightarrow U_2 = 30 \cdot 2 = 60 \text{ V}$

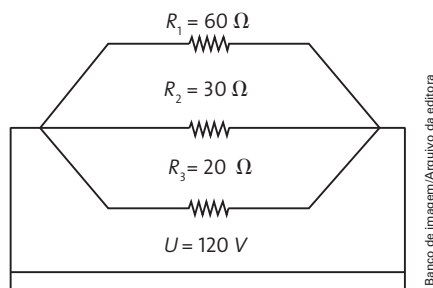
Resistor 3: $U_3 = R_3 \cdot i \Rightarrow U_3 = 10 \cdot 2 = 20 \text{ V}$

6. Três resistores $R_1 = 60 \Omega$, $R_2 = 30 \Omega$ e $R_3 = 20 \Omega$ são associados em paralelo, e uma ddp de 120 V é aplicada entre os terminais da associação. Determine:

- A resistência equivalente da associação.
- A intensidade de corrente em cada resistor.
- A potência total dissipada.

Resolução:

O circuito pode ser representado da seguinte forma:



a) $\frac{1}{R_{\text{paralelo}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

$$\frac{1}{R_{\text{paralelo}}} = \frac{1}{60} + \frac{1}{30} + \frac{1}{20}$$

$$\frac{1}{R_{\text{paralelo}}} = \frac{1 + 2 + 3}{60}$$

$$R_{\text{paralelo}} = 10 \Omega$$

- b) Como todos os resistores do circuito estão submetidos à mesma ddp, temos:

Resistor 1:

$$U_1 = R_1 \cdot i \Rightarrow 120 = 60 \cdot i \Rightarrow i = 2 \text{ A}$$

Resistor 2:

$$U_2 = R_2 \cdot i \Rightarrow 120 = 30 \cdot i \Rightarrow i = 4 \text{ A}$$

Resistor 3:

$$U_3 = R_3 \cdot i \Rightarrow 120 = 20 \cdot i \Rightarrow i = 6 \text{ A}$$

c) $P_{\text{dissipada}} = R_{\text{paralelo}} \cdot (i_{\text{total}})^2$

$$P_{\text{dissipada}} = 10 \cdot 12^2$$

$$P_{\text{dissipada}} = 1440 \text{ W}$$

Resolução dos exercícios

1 $U = \frac{\Delta E}{\Delta q} \Rightarrow 1,2 \cdot 10^6 = \frac{\Delta E}{1000} \Rightarrow \Delta E = 1,2 \cdot 10^9 \text{ J} = 1,2 \text{ GJ}$

2 $P = U \cdot i \Rightarrow 60 = U \cdot 0,5 \Rightarrow U = 120 \text{ V}$

3

Dispositivo	O consumo em kWh por mês $E = P \cdot \Delta t$	O custo mensal por aparelho
Televisão	$E = 80 \cdot 5 \cdot 30 = 12 \text{ kWh}$	$0,3 \cdot 12 = \text{R\$ } 3,60$
Lâmpada	$E = 20 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 30 = 12 \text{ kWh}$	$0,3 \cdot 12 = \text{R\$ } 3,60$
Máquina de lavar	$E = 100 \cdot 1 \cdot 30 = 3 \text{ kWh}$	$0,3 \cdot 3 = \text{R\$ } 0,90$
Computador	$E = 200 \cdot 4 \cdot 3 = 24 \text{ kWh}$	$0,3 \cdot 24 = \text{R\$ } 7,20$
Chuveiro	$E = 4000 \cdot 1 \cdot 30 = 120 \text{ kWh}$	$0,3 \cdot 120 = \text{R\$ } 36$
Ferro de passar roupa	$E = 2000 \cdot 0,5 \cdot 30 = 30 \text{ kWh}$	$0,3 \cdot 30 = \text{R\$ } 9,00$
Secador de cabelos	$E = 2000 \cdot 0,5 \cdot 30 = 30 \text{ kWh}$	$0,3 \cdot 30 = \text{R\$ } 9,00$

Somando o custo da energia de cada aparelho, temos: R\$ 69,30

4 $P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow 0,45 = \frac{4000}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t \approx 2,47 \text{ h}$

- 5 a) Sim, pois sua tensão nominal é 220 V. Entretanto, funcionará insatisfatoriamente, pois desenvolverá uma potência inferior à nominal.

- b) Como a potência correspondente à refrigeração máxima é de 2100 W, temos:

$$\text{Consumo} = 2100 \text{ W} \cdot 4 \cdot 30 \text{ h} = 252\,000 \text{ Wh ou } 252 \text{ kWh}.$$

- 6 A leitura do mês anterior é: 3 563 kWh
A leitura atual é: 3 783 kWh.
Logo, o consumo foi $(2\,783 - 2\,563) = 220 \text{ kWh}$, e o gasto é de $220 \cdot (0,2) = 44 \text{ reais}$, o que corresponde à alternativa e.
- 7 a) A diferença de tamanho está relacionada com a máxima corrente elétrica em cada uma delas. Com a mesma ddp, a corrente na pilha AAA é menor do que na AA.
b) Nas pilhas, a energia química transforma-se em elétrica.
- 8 a) A rigor, receptor, pois a energia elétrica se transforma parte em mecânica (ventilador) e parte em térmica.
b) $P = U \cdot i$ e, portanto, $2\,800 = 220 \cdot i$. Logo: $i = 12,7 \text{ A}$.
- 9 a) $R = \frac{U^2}{P}$. Logo:
Lâmpada: $R = 127 \cdot \frac{127}{100} = 161 \Omega$
Ferro de passar roupa $R = 220 \cdot \frac{220}{2\,200} = 22 \Omega$
Chuveiro: $R = 220 \cdot \frac{220}{4\,800} = 10,1 \Omega$
Logo, o dispositivo de maior resistência é a lâmpada.
b) Consumirá maior energia, no mesmo intervalo de tempo, o aparelho de maior potência, isto é, o chuveiro.
- 10 Não há contradição, pois a análise deve sempre ser feita partindo-se de um dos pressupostos descritos abaixo:
- caso a ddp seja mantida constante, maior resistência implica menor potência;
 - caso a corrente elétrica seja mantida constante, maior resistência implica maior potência.
- 11 I. O chuveiro original, em condições nominais, é atravessado por uma corrente $i = \frac{P}{U} = 17,3 \text{ A}$.
Assim, se for ligado em 220 V será atravessado por 34,6 A, valor não permitido (acima de 30 A). Logo, isto não pode ser feito.
II. a) $i = \frac{P}{U} = \frac{2\,200}{220} = 10 \text{ A}$ (Permitido)
b) $i = \frac{P}{U} = \frac{4\,400}{127} = 34,6 \text{ A}$ (Não permitido)
c) $i = \frac{P}{U} = \frac{4\,400}{220} = 20 \text{ A}$ (Permitido)
Entre os valores permitidos de corrente, a melhor opção é a c, por ser a de maior potência.

- 12 Cálculo da resistência elétrica, considerando-se as condições nominais:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{850} = 57 \Omega$$

Com a ddp de 127 V, a potência elétrica fica:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{127^2}{57} = 283 \text{ W}$$

Assim, a nova potência desenvolvida vale 283 W.

- 13 Deve ser 4 vezes maior, pois $P_{sp} = P_{flo}$; logo:

$$\frac{110^2}{8} = \frac{220^2}{R} \Rightarrow R = 32 \Omega$$

Alternativa b.

- 14 a) Para o resistor representado na figura A.
b) Com os dados obtidos da figura B, temos:
 $U = R \cdot i \Rightarrow 20 = R \cdot 4 \Rightarrow R = 5 \Omega$
c) O condutor representado na figura A é ôhmico, isto é, tem resistência constante.
 $U = R \cdot i \Rightarrow 10 = R \cdot 5 \Rightarrow R = 2 \Omega$

- 15 Cálculo da resistência:

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow 4\,400 = \frac{220^2}{R} \Rightarrow R = 11 \Omega$$

Nova potência:

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow P = \frac{110^2}{11} = 1\,100 \text{ W}$$

Como o condutor é ôhmico, o valor de sua resistência permanecerá constante tanto em 110 V quanto em 220 V. Entretanto, reduzindo-se a diferença de potencial pela metade, sua potência diminui em 4 vezes. Sendo assim, a potência de um chuveiro ligado em 110 V será de 1100 W e a resistência será:

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{110^2}{1\,100} = 11 \Omega$$

- 16 Para $U = 2 \text{ V}$, temos:

$$i = 5 \cdot U^2 \Rightarrow i = 5 \cdot 2,0^2 = 20 \text{ A e } U = R \cdot i \Rightarrow 2,0 = R \cdot 20 \Rightarrow R = 0,1 \Omega$$

- 17 a) Usando a segunda lei de Ohm:

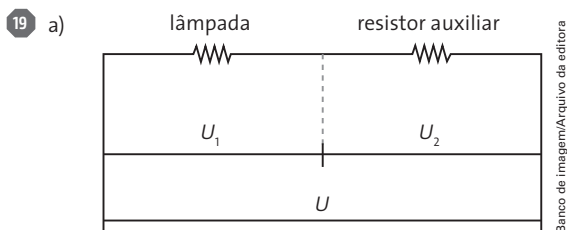
$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \Rightarrow R = 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{10}{4 \cdot 10^{-6}}, \text{ portanto: } R = 4 \cdot 10^{-2} \Omega.$$

- b) Como $P = U \cdot i$; $3\,300 = 110 \cdot i$. Portanto, $i = 30 \text{ A}$. A potência dissipada em cada fio vale:

$$P_{\text{diss}} = R \cdot i^2 = 4 \cdot 10^{-2} \cdot (30)^2 = 36 \text{ W, e, como o trecho tem dois fios, a potência dissipada total é } 72 \text{ W}.$$

$$\text{Para calcular o percentual de perdas: } \frac{72}{3\,300} = 0,022 \text{ ou } 2,2\%.$$

- 18 Como se trata de um circuito em série, a retirada de uma das lâmpadas deixa o circuito aberto, o que implica corrente nula em todas as lâmpadas.



No esquema, a ddp $U_1 = 12 \text{ V}$ e a ddp $U = 120 \text{ V}$.

- b) $P_L = U_L \cdot i_L$; logo: $48 = 12 \cdot i$ e, portanto, $i = 4 \text{ A}$.

c) $U = U_1 + U_2$; logo: $120 = 12 + U_2$ e, portanto, $U_2 = 108$ V.

A resistência do resistor auxiliar vale:

$$R_2 = \frac{U_2}{i} = \frac{108}{4} = 27 \Omega$$

d) $R_L = R_1 = \frac{U_1}{i} = 3 \Omega$. Como $R_{eq} = R_1 + R_2 = 3 + 27$, portanto $R_{eq} = 30 \Omega$

Outra solução: $R_{eq} = \frac{U}{i} = \frac{120}{4} = 30 \Omega$

20 O trecho de mau contato está associado em série com o conjunto, sendo, portanto, atravessado pela mesma corrente do circuito. Para uma mesma corrente, maior resistência implica maior potência.

21 Na associação em paralelo, todos os ramos estão submetidos à mesma ddp e suas correntes são, portanto, independentes umas das outras.

22 a) Lâmpada 1: $P_1 = U_1 \cdot i_1$; logo: $6 = 12 \cdot i_1$ e, portanto, $i_1 = 0,5$ A;
Lâmpada 2: $P_2 = U_2 \cdot i_2$; logo: $12 = 12 \cdot i_2$ e, portanto, $i_2 = 1$ A;
A corrente total é: $i = i_1 + i_2$ e, portanto, $i = 1,5$ A.

b) $R_{eq} = \frac{U}{i} = \frac{12}{1,5} = 8 \Omega$

c) A potência total é: $P_1 + P_2 = 18$ W

23 a) A potência total do circuito é a soma da potência de cada aparelho.

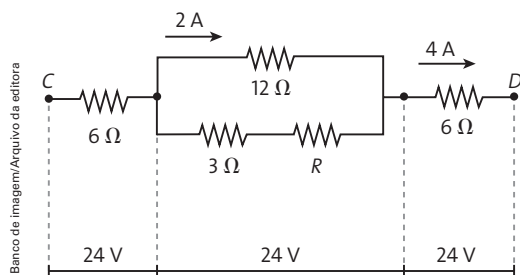
$$P_{total} = P_{tv} + P_L + P_{ml} + P_c + P_{ch} + P_f + P_s$$

$$P_{total} = 80 + 10 \cdot 100 + 100 + 200 + 4000 + 2000 + 2000$$

$$P_{total} = 9380 \text{ W}$$

b) $N_{inteiro} \approx \frac{9380}{2400} \Rightarrow N_{inteiro} = 4$

24 A distribuição de corrente no circuito em questão pode ser esquematizada como segue:



Note que as três lâmpadas L_2 , L_3 e L_4 são percorridas pela mesma intensidade de corrente e têm assim o mesmo brilho.

Alternativa b.

25 A inspeção direta da tabela leva a: tomada (2,5); lâmpada (1,5) e chuveiro (6,0). Alternativa d.

26 A potência elétrica total correspondente aos aparelhos ligados ao benjamim é:

$$130 + 300 + 1200 = 1630 \text{ W}$$

A corrente associada vale: $i = \frac{P}{U} = \frac{1630}{120} = 13,6 \text{ A}$

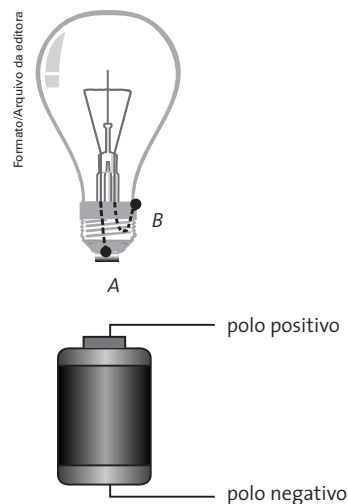
Logo, o disjuntor não desliga, mas como a corrente é superior à corrente máxima suportada pelos fios, há risco de incêndio. Alternativa b.

27 Ao ligar o chuveiro junto com a televisão e os outros dispositivos referidos, a corrente total ultrapassa 30 A e desarma o disjuntor.

Alternativa c.

Retomando

28 O esquema representa uma lâmpada, seus terminais de ligação (A e B) e uma pilha.



Para a lâmpada acender, o terminal A pode ser conectado ao polo positivo da pilha; o terminal B, ao polo negativo (esquemas 1 e 3) ou o terminal A pode ser conectado ao polo negativo, e o terminal B ao polo positivo (esquemas 2 e 7).

Alternativa d.

29 A energia em kWh para cada aparelho.

$$E = P \cdot \Delta t$$

Ar-condicionado

$$E = P \cdot \Delta t \Rightarrow E = 1,5 \cdot 8 \cdot 30 \Rightarrow E = 360 \text{ kWh}$$

Chuveiro elétrico

$$E = P \cdot \Delta t \Rightarrow E = 3,3 \cdot \frac{1}{3} \cdot 30 \Rightarrow E = 33 \text{ kWh}$$

Freezer

$$E = P \cdot \Delta t \Rightarrow E = 0,2 \cdot 10 \cdot 30 \Rightarrow E = 60 \text{ kWh}$$

Geladeira

$$E = P \cdot \Delta t \Rightarrow E = 0,35 \cdot 10 \cdot 30 \Rightarrow E = 105 \text{ kWh}$$

Lâmpadas

$$E = P \cdot \Delta t \Rightarrow E = 0,1 \cdot 6 \cdot 30 \Rightarrow E = 18 \text{ kWh}$$

A energia total utilizada pela casa é de:

$$E_{total} = E_{ar-condicionado} + E_{chuveiro} + E_{freezer} + E_{geladeira} +$$

$$+ E_{lâmpadas} \Rightarrow E_{total} = 360 + 33 + 60 + 105 + 18 = 576 \text{ kWh}$$

Como 1 kWh custa R\$ 0,40, o consumo mensal é de R\$ 230,04.

Alternativa e.

- 30 Na ligação feita pelo motorista, a intensidade da corrente elétrica formada no fusível (i_f) é igual à soma das intensidades das correntes elétricas formadas em cada uma das lâmpadas (i) ligadas em paralelo:

$$i_f = 2 \cdot i$$

A partir da definição de potência elétrica, temos:

$$P = U \cdot i \Rightarrow i = \frac{P}{U}$$

em que:

$$\begin{cases} P: \text{potência elétrica nominal da lâmpada} \\ U: \text{ddp nominal da lâmpada} \end{cases}$$

Dessa forma:

$$i_f = 2 \cdot \frac{P}{U} = 2 \cdot \frac{55}{36} \Rightarrow i_f = 3 \text{ A}$$

Portanto, o motorista deve utilizar o fusível laranja. Alternativa c.

- 31 Cálculo das potências das lâmpadas utilizadas nos ambientes:

Cômodo	Área	Potência da lâmpada
banheiro	$1,5 \cdot 2,1 = 3,15 \text{ m}^2$	60 W
sala	$3 \cdot 2,8 = 8,4 \text{ m}^2$	100 W
cozinha	$3 \cdot 3 = 9 \text{ m}^2$	100 W
corredor	$(3 - 2,1) \cdot 1,5 = 1,35 \text{ m}^2$	60 W

Dessa forma: $P_{\text{lâmpadas}} = 60 + 100 + 100 + 60$

$$P_{\text{lâmpadas}} = 320 \text{ W}$$

Cálculo da potência total:

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} &= P_{\text{lâmpadas}} + P_{\text{geladeira}} + P_{\text{ferro elétrico}} + P_{\text{rádio}} + \\ &+ P_{\text{aparelho de som}} + P_{\text{televisor}} + P_{\text{chuveiro}} = \\ &= 320 + 200 + 500 + 50 + 120 + 200 + 3000 = 4390 \text{ W} \end{aligned}$$

Alternativa d.

CAPÍTULO 3 – Geradores e receptores elétricos

Neste capítulo sugerimos que a meta seja o estudante entender quais são as fontes de energia elétrica que permitem o abastecimento de sua residência, das cidades e das indústrias.

Assim, a discussão pode ser iniciada com a conclusão do raciocínio iniciado com a observação dos bipolos isolados (Capítulo 1), que continuou com as maneiras de ligá-los (Capítulo 2) chegando, agora, às fontes de alimentação dos circuitos.

Caso você considere necessário, pode informar os alunos de que dois pré-requisitos são necessários para um bom entendimento das ideias deste capítulo: um matemático, das funções de primeiro grau, e outro físico, da conservação da energia.

1. Bipolos ativos

A questão apresentada no início do capítulo, ilustrada pela bateria do telefone celular, pode servir para a conceituação de bipo-lo ativo, permitindo distinguir a função de gerador da de receptor.

Mais uma vez, sugerimos que a observação de fatos cotidianos deve nortear o raciocínio. As diversas transformações que envolvem energia elétrica podem ser discutidas, o que leva ao conceito de bipo-lo ativo e de bipo-lo reversível.

2. Geradores elétricos

Uma possível estratégia para iniciar este tópico é a observação do espaço físico ao redor do aluno a fim de interpretar o fato de que a energia, para poder ser distribuída em grandes blocos à população, requer sua transformação em energia elétrica nas chamadas estações geradoras.

Assim, um bom começo é mostrar que três níveis diferentes de observação cotidiana dos fenômenos elétricos se completam:

- que transformações de energia ocorrem nos aparelhos?
- como eles devem ser ligados para que essas transformações ocorram?
- qual é a fonte de energia?

Como consequência, a ideia de que os geradores são a “fonte” de energia elétrica pode aparecer de maneira natural.

O conceito de *ddp*, já discutido, pode servir como ponte para o entendimento do que significa força eletromotriz de um gerador.

A distinção entre geradores ideais e reais pode ser feita pela discussão do fenômeno de dissipação de energia, estabelecendo o modelo para essa dissipação como equivalente a uma resistência interna.

Nesse ponto, você pode distinguir “modelo” de “realidade”, para aprimorar no aluno a competência de interpretação dos fenômenos físicos.

Um fato que pode ser discutido relaciona-se ao sentido da corrente no gerador: ao transformar energia de outra modalidade em elétrica, há um aumento de energia potencial elétrica, o que corresponde a um movimento forçado das partículas portadoras de carga. Por isso, o sentido convencional é do polo negativo para o positivo.

Sugerimos que, nesse ponto, a questão do balanço energético do gerador seja apresentada para permitir a dedução da equação característica do gerador e o desenvolvimento de habilidades de expressar fenômenos do cotidiano por leis físicas.

Essa dedução pode ser feita associando-se a força eletromotriz à energia recebida, por unidade de carga.

Ao completar com a representação da energia dissipada como calor produzido por uma resistência interna, é possível chegar à equação do gerador pelo balanço energético.

Acreditamos que o aluno, ao deparar com a equação característica do gerador, deva ser capaz de distinguir as variáveis *ddp* (U) e corrente (i) que dependem do gerador e do circuito por ele alimentado. A *fem* (ϵ) e a resistência interna (r) devem ser entendidas como constantes dependentes das características construtivas do gerador.

Assim, talvez o aluno possa distinguir realidade de abstração e, ao traçar a curva característica de um **gerador**, que consiste na interpretação de uma função de primeiro grau, possa desenvolver a competência de expressar modelos físicos de maneira matemática.

O conceito de rendimento do gerador, apresentado em seguida, pode ser considerado como opcional. Entretanto, apresentá-lo pode representar uma oportunidade de ligar o estudo da Eletricidade às máquinas já vistas na Mecânica e na Termodinâmica.

3. Associações de geradores

Sugerimos que as associações de geradores sejam estudadas no item **Experimento**, com os alunos fazendo experimentos com pilhas e pequenas lâmpadas, extraindo da prática o conhecimento teórico necessário.

Caso isso não seja possível, esquemas elétricos simples de associações em série e em paralelo podem ser utilizados.

Você pode, em esquemas desenhados, mostrar que a associação em série é útil para a obtenção de maiores *ddps* e a associação em paralelo para a obtenção de maiores correntes e aumentar a durabilidade do conjunto.

Além disso, o exercício resolvido 1 pode auxiliar na discussão das diversas propriedades das associações de geradores de maneira quantitativa.

4. Receptores elétricos

Uma maneira possível de apresentar o receptor é recordar o gerador e discutir as semelhanças e diferenças entre eles:

	Gerador	Receptor
Potência total	Não elétrica	Elétrica
Potência útil	Elétrica	Não elétrica
Potência dissipada	Térmica	Térmica

O balanço energético, adequadamente aplicado, leva à equação do receptor.

Sugerimos que você utilize o mesmo tratamento dos geradores, explicando que a relação entre a *ddp* (U) e a corrente (i) em um receptor gera a equação característica, a qual, além de depender das características do receptor, também depende do circuito em que o receptor é ligado. Lembre aos alunos que as características de construção dos receptores são a *f_{cem}* (ϵ') e a resistência interna (r').

Novamente o aluno pode ser estimulado a traçar a curva característica do receptor ao interpretar a função característica como uma função do primeiro grau, expressando, assim, um modelo físico de maneira matemática.

Este é um momento em que você pode falar das baterias de celular, sua carga e descarga, o que permite a troca de ideias a respeito de bipolos reversíveis.

5. Circuitos elétricos

Sugerimos que este tópico seja iniciado retomando as ideias desenvolvidas no capítulo anterior, no tópico **Associações: série e paralelo**. A lei dos nós, já estudada, pode ter sua justificativa pela conservação das cargas e chamada, de agora em diante, de primeira lei de Kirchhoff.

Dar esse enfoque à lei dos nós permite que o aluno estabeleça relações entre os diversos pontos já estudados.

Nesse momento, acreditamos que vale a pena lembrar que o trabalho das forças conservativas não depende da trajetória, o que liga o enunciado da segunda lei de Kirchhoff ao conhecimento anterior do aluno.

Recordar as funções dos diversos elementos de circuito pode permitir uma ampliação das relações que o aluno fez até agora entre as leis físicas que está estudando e seu cotidiano.

O balanço energético, agora em um circuito, permite que se estabeleça a corrente elétrica em circuitos simples.

Os circuitos de malha única, mais uma vez, enfatizam o balanço energético:

- Geradores: produzem energia elétrica;
- Receptores: usam energia elétrica;
- Resistores: dissipam energia elétrica.

A energia produzida pelos geradores é a soma da utilizada pelos receptores com a dissipada pelos resistores.

Resumidamente, entender este capítulo é transportar a ideia de balanço energético para bipolos e circuitos. Correntes e *ddps* são consequências desse balanço.

A discussão do exercício resolvido 2 permite a transposição dos resultados teóricos das leis físicas para uma situação em que as competências de expressar grandezas físicas por seus valores numéricos possam ser desenvolvidas.

Consideramos que o item “Circuito de várias malhas” é opcional. Caso você opte por apresentá-lo, pode utilizar o exercício resolvido 3.

6. Amperímetro e voltímetro

Uma boa maneira de iniciar este tópico pode ser com uma pergunta: quando usamos um termômetro clínico para medir a temperatura de um paciente, que temperatura está sendo medida?

Os alunos, provavelmente, estranharão a pergunta e considerarão óbvio que a temperatura medida é a do paciente. Este é o momento de mostrar que a temperatura medida é a do próprio termômetro. Como ambos (termômetro e paciente) ficaram em contato, estão em equilíbrio térmico.

Portanto, um medidor de corrente (amperímetro), para medir a corrente em um circuito, deve ser associado em série com ele (mesma corrente). Para não alterar o valor da medida, deve, portanto, ter resistência elétrica pequena em relação ao restante do circuito.

Analogamente, um medidor de *ddp* (voltímetro), para medir a *ddp* em um circuito, deve ser associado em paralelo com o circuito (mesma *ddp*). Para não alterar o valor da medida, deve, portanto, ter resistência elétrica alta em relação ao restante do circuito.

O exercício resolvido 4 proporciona a oportunidade de relacionar uma situação prática (numérica) com o modelo simplificado dos aparelhos de medida e desenvolve a habilidade de interpretação da linguagem esquemática dos circuitos elétricos.

Para refletir

O amperímetro está medindo a corrente no resistor de $3\ \Omega$ e o voltímetro, a tensão da associação em paralelo dos resistores de $9\ \Omega$ e $18\ \Omega$.

Em construção

Neste capítulo prestamos a nossa homenagem ao físico prussiano Gustav Robert Kirchhoff.

Você pode recomendar aos alunos uma pesquisa nos meios de informação para contextualizar seus trabalhos na história e verificar como suas contribuições influenciaram na vida em sociedade. Explique que Kirchhoff trabalhou em espectroscopia, de grande importância para Química.

Experimento

- Com a associação de 2 pilhas, a *ddp* máxima que se pode obter é 3 V.
- Associações possíveis: duas pilhas em paralelo e o conjunto em série com uma das outras pilhas ou duas associações em paralelo de duas pilhas, associadas em série.

- Exemplo de tabela:

Associação	ddp	Brilho
1 pilha	1,5 V	Brilho abaixo do normal
2 pilhas em série	3 V	Brilho normal
2 pilhas em paralelo e o conjunto em série com uma das outras pilhas	3 V	Brilho normal
2 associações em paralelo de 2 pilhas, associadas em série	3 V	Brilho normal

Atividades complementares

A seguir apresentamos alguns exercícios complementares para serem utilizados em avaliações ou como apoio.

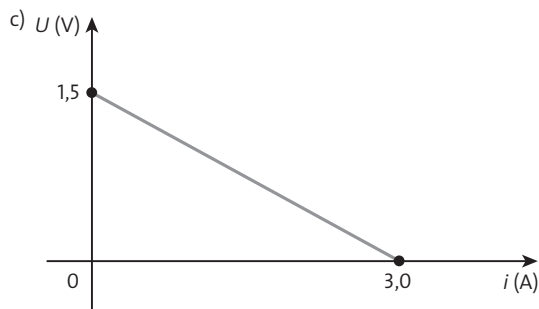
1. Uma pilha comum de lanterna tem resistência interna $r = 0,5 \Omega$ e quando uma carga de 10 C é deslocada entre seus extremos, a diminuição de energia química é de 15 J .

- Calcular a força eletromotriz da pilha.
- Escrever a equação característica da pilha.
- Traçar a curva característica da pilha.

Resolução:

$$\text{a) } \varepsilon = \frac{\Delta E_{\text{não elétrica}}}{|\Delta q|} \Rightarrow \varepsilon = \frac{15}{10} = 1,5 \text{ V}$$

$$\text{b) } U = \varepsilon - r \cdot i = 1,5 - 0,5 \cdot i$$



2. A ddp em aberto de um gerador é de 20 V e sua corrente de curto circuito é de 10 A . Determinar:

- A força eletromotriz e a resistência interna do gerador.
- Escrever a curva característica do gerador.
- Traçar a curva característica do gerador.
- Considerando que o gerador é atravessado por uma corrente de 2 A , calcular a ddp entre os terminais do gerador.
- Nas condições do item d, calcular o rendimento do gerador.
- Nas condições do item d, calcular a energia útil para 20 min de funcionamento.

Resolução:

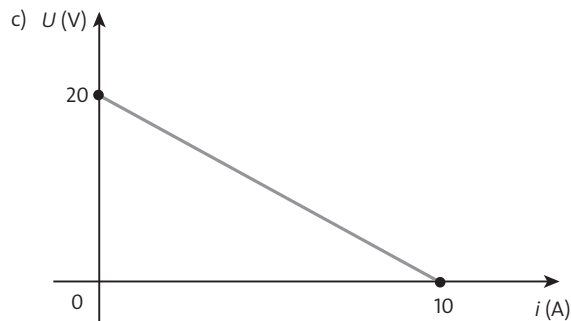
$$\text{a) } U = \varepsilon - r \cdot i.$$

$$\text{Para } i = 0 \text{ (circuito aberto)} \Rightarrow U = \varepsilon = 20 \text{ V}$$

$$\text{e } i_{cc} = \frac{\varepsilon}{r} = 10 \text{ A}$$

$$r = 2 \Omega$$

$$\text{b) } U = 20 - 2 \cdot i$$

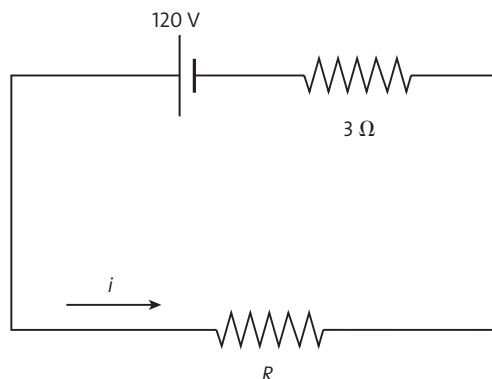


$$\text{d) } U = 20 - 2 \cdot (2) \Rightarrow U = 16 \text{ V}$$

$$\text{e) } \eta = \frac{U}{\varepsilon} \cdot 100\% \Rightarrow \eta = \frac{16}{20} \cdot 100\% = 80\%$$

$$\text{f) } P = U \cdot i = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow \Delta E = \Delta t \cdot U \cdot i \Rightarrow \Delta E = 20 \cdot 60 \cdot 2 \Rightarrow \Delta E = 48000 \text{ J}$$

3. O circuito esquematizado é percorrido por uma corrente elétrica com intensidade de 10 A .



Determine o valor da resistência R e o rendimento do gerador.

Resolução:

$$i = \frac{\varepsilon}{r + R} \Rightarrow 10 = \frac{120}{3 + R} \Rightarrow R = 9 \Omega$$

A ddp no gerador pode ser calculada pela equação do gerador.

$$U = \varepsilon - r \cdot i \Rightarrow U = 120 - 3 \cdot (10) \Rightarrow U = 90 \text{ V}$$

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon} \Rightarrow \eta = \frac{90}{120} \cdot 100\% = 75\%$$

4. Duas baterias idênticas são associadas primeiro em série e depois em paralelo. Qual é a razão entre as correntes de curto-circuito fornecidas na primeira e na segunda associação?

Resolução:

Em série:

$$\varepsilon_{\text{equivalente}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 2\varepsilon$$

$$i_{cc} = \frac{2\varepsilon}{r}$$

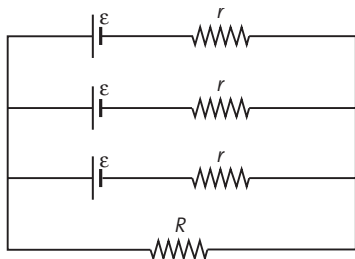
Em paralelo:

$$\varepsilon_{\text{equivalente}} = \varepsilon$$

$$i_{cc} = \frac{\varepsilon}{r}$$

$$f = \frac{2\varepsilon}{\frac{\varepsilon}{r}} = 2$$

5. A figura mostra três pilhas de 1,5 V e 1,5 Ω cada ligadas a um resistor de 9,5 Ω .



Determine:

- a pilha equivalente à associação;
- a intensidade de corrente elétrica através do resistor R ;
- a intensidade de corrente elétrica através de cada pilha.

Resolução:

a) *fem* equivalente: 1,5 V

$$r_{\text{equivalente}} = \frac{r}{N} \Rightarrow r_{\text{equivalente}} = \frac{1,5}{3} = 0,5 \Omega$$

$$b) i_{\text{total}} = \frac{\varepsilon}{r + R} \Rightarrow i_{\text{total}} = \frac{1,5}{0,5 + 9,5} = 0,15 \text{ A}$$

c) Para pilhas idênticas em paralelo a corrente será:

$$i = \frac{i_{\text{total}}}{N_{\text{pilhas}}} = \frac{0,15}{3} = 0,05 \text{ A}$$

6. Um receptor, com uma *fcm* de 24 V e resistência de 2 Ω , está operando com corrente elétrica de 3 A de intensidade. Pede-se:

- a *ddp* nos terminais do receptor;
- a potência total consumida pelo aparelho;
- a potência útil e a potência dissipada;
- o rendimento do aparelho, nas condições do problema;
- a curva característica.

Resolução:

$$a) U = \varepsilon' + r' \cdot i = 24 + 2 \cdot 3 = 30 \text{ V}$$

$$b) P_{\text{total}} = U \cdot i = 30 \cdot 3 = 90 \text{ W}$$

$$c) P_{\text{útil}} = \varepsilon' \cdot i = 24 \cdot 3 = 72 \text{ W}$$

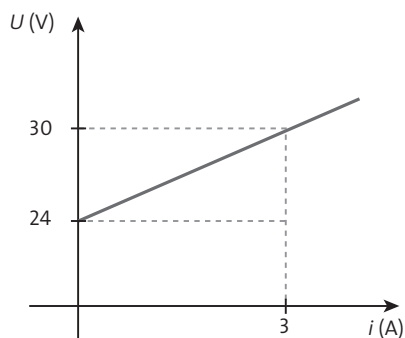
$$P_{\text{dissipada}} = r' \cdot i^2 = 2 \cdot 3^2 = 18 \text{ W}$$

$$d) \eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{total}}} = \frac{72}{90} \cdot 100\% = 80\%$$

$$e) U = \varepsilon' + r' \cdot i \Rightarrow U = 24 + 2 \cdot i$$

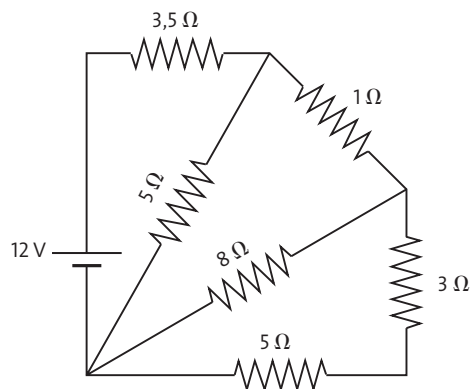
$$i = 0 \Rightarrow U = 24 \text{ V}$$

$$i = 3 \text{ A} \Rightarrow U = 30 \text{ V}$$



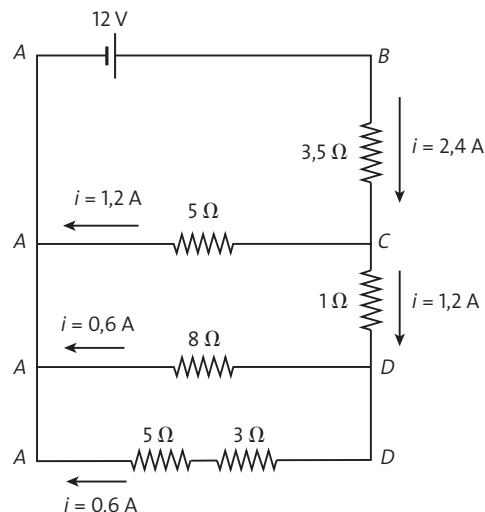
7. (UFRN) No circuito representado calcule:

- a resistência equivalente;
- a energia dissipada no resistor de 8 Ω , durante 5 s.



Resolução:

a) Redesenhando o circuito:



$$R = 5 \Omega$$

$$b) i_{\text{total}} = \frac{\varepsilon}{R_{\text{equivalente}}} = \frac{12}{5} = 2,4 \text{ A}$$

No resistor de $R = 8 \Omega$

$$P = R \cdot i^2 = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow 8 \cdot 0,6^2 = \frac{\Delta E}{5} \Rightarrow \Delta E = 24 \text{ J}$$

Resolução dos exercícios

- I. **Incorreto.** Os bipolos ativos convertem energia química em elétrica.
II. **Correto.**
III. **Incorreto.** A energia se converte de elétrica para mecânica.
IV. **Correto.**
Alternativa d.

- a) $P = U \cdot i \Rightarrow \frac{\Delta E}{\Delta t} = U \cdot i \Rightarrow \frac{\Delta E}{1} = 12 \cdot 0,5 \Rightarrow \Delta E = 6 \text{ Wh ou } 21600 \text{ J}$
b) $P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow 3 = \frac{6}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = 2 \text{ h}$

- 3 I. **Correta.** O dispositivo está funcionando como gerador.
 II. **Correta.** No resistor a energia elétrica converte-se em térmica e, portanto, diminui.
 III. **Correta.** (Equação do gerador).

- 4 a) Quando $i = 0$; $U = E = 12 \text{ V}$. Além disso, $\frac{E}{r} = 6$ e, portanto,
 $\frac{12}{r} = 6$. Desse modo, $r = 2 \Omega$.

Logo, a *fem* é 12 V e a resistência interna é 2 Ω .

b) $U = 12 - 2 \cdot i$ (SI)

c) Como: $U = 12 - 2i$, temos:

$$U = 12 - 2 \cdot (3) \Rightarrow U = 6 \text{ V}$$

d) Como $U = R \cdot i$, temos:

$$6 = R \cdot 3 \Rightarrow R = 2 \Omega$$

- 5 Na situação indicada a lâmpada não acenderá. Alternativa b.

- 6 Equivalente de cada série: $\varepsilon = 3 \text{ V}$; $r = 2 \Omega$.

Duas dessas séries em paralelo: $\varepsilon = 3 \text{ V}$; $r = 1 \Omega$.

- 7 Para obter uma corrente de curto-circuito de 2 A, a resistência interna equivalente deve ser de 1,5 Ω .

Logo, a associação deve ser: duas em paralelo e o conjunto em série com a outra.

Duas em paralelo: $\varepsilon = 1,5 \text{ V}$; $r = 0,5 \Omega$.

Conjunto em série com a outra: $\varepsilon = 3 \text{ V}$; $r = 1,5 \Omega$.

- 8 a) $\Delta E = \Delta q \cdot \varepsilon = 2 \cdot 12 = 24 \text{ J}$

b) Não, pois parte da energia será dissipada.

- 9 a) $U = \varepsilon' + r' \cdot i \Rightarrow 100 = \varepsilon' + 2 \cdot 5 \Rightarrow \varepsilon' = 90 \text{ V}$

b) $P_{\text{útil}} = \varepsilon' \cdot i = 90 \cdot 5 = 450 \text{ W}$

$$P_{\text{total}} = U \cdot i = 100 \cdot 5 = 500 \text{ W}$$

$$P_{\text{dissipada}} = r' \cdot i^2 = 2 \cdot 5^2 = 50 \text{ W}$$

c) Com o eixo do motor bloqueado a *fem* é nula. Portanto:

$$U = \varepsilon' + r' \cdot i \Rightarrow 100 = 0 + 2 \cdot i \Rightarrow i = 50 \text{ A}$$

Toda a energia elétrica é transformada em térmica.

$$P_{\text{dissipada}} = r' \cdot i^2 = 2 \cdot 50^2 = 5000 \text{ W}$$

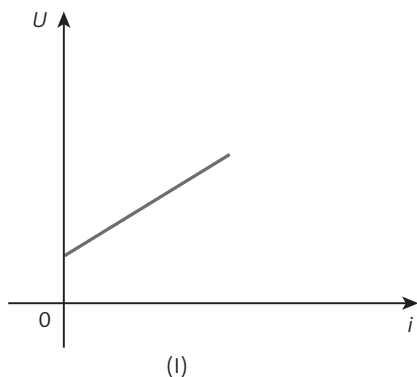
- 10 a) Receptor:

$$U = \varepsilon' + r' \cdot i \Rightarrow U = 25 + 12,5 \cdot 4 \Rightarrow U = 75 \text{ V}$$

b) $\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{total}}} = \frac{\varepsilon' \cdot i}{U \cdot i} = \frac{25}{75} \cdot 100\% = 33,3\%$

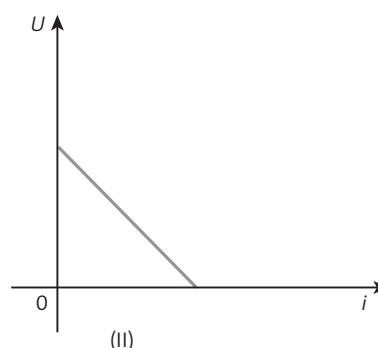
- 11 Receptor – equação e curva característica.

$$U = \varepsilon' + r' \cdot i$$



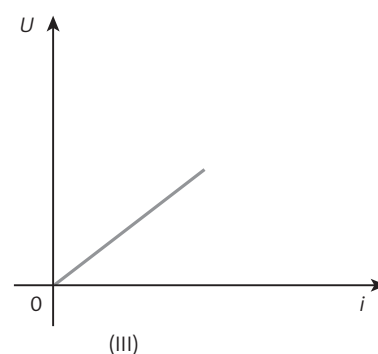
Gerador – equação e curva característica.

$$U = \varepsilon' - r \cdot i$$



Resistor – equação e curva característica.

$$U = R \cdot i$$



- 12 Potência dissipada: $0,3 \cdot (6)^2 = 10,8 \text{ W}$

Potência elétrica fornecida: $15 \cdot 6 = 90 \text{ W}$

Logo, a potência útil é: $90 - 10,8 = 79,2 \text{ W}$

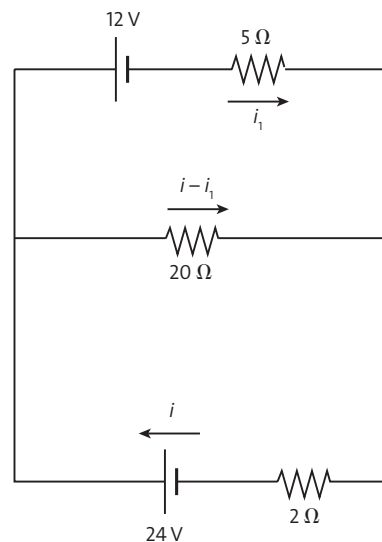
Alternativa c.

- 13 a) No circuito E_1 e E_3 estão funcionando como receptores e E_2 como gerador.

b) $i = \frac{\Sigma \varepsilon - \Sigma \varepsilon'}{\Sigma r} = \frac{18 - 8}{6} = \frac{5}{3} \text{ A}$

Sentido da corrente: anti-horário.

- 14 a)



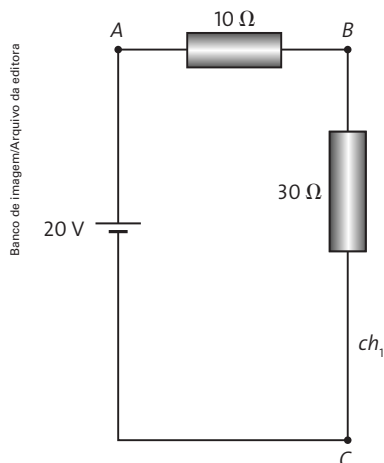
b) $12 + 5i_1 = 24 - 2i$

$12 + 5i_1 = 20(i - i_1)$

$\begin{cases} 5i_1 + 2i = 12 \\ 25i_1 - 20i = -12 \end{cases}$

$$i_1 = \frac{\begin{vmatrix} 12 & 2 \\ -12 & -20 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 5 & 2 \\ 25 & -20 \end{vmatrix}} = \frac{-216}{-150} = 1,44 \text{ A}$$

- 15 a) Com a chave ch_2 aberta o circuito fica como na figura.



A corrente no circuito será:

$$i = \frac{20}{R_{\text{equivalente}}} = \frac{20}{40} = 0,5 \text{ A}$$

Para o resistor de $R = 30 \Omega$, a ddp é de:

$$U_{BC} = R \cdot i$$

$$U_{BC} = 30 \cdot 0,5 = 15 \text{ V}$$

- b) Ao fechar a chave ch_2 , a resistência equivalente fica:

$$R_{\text{equivalente}} = 10 + \frac{30 \cdot 15}{45} = 20 \Omega. \text{ Assim, a corrente no circuito será de:}$$

$$i = \frac{20}{20} = 1 \text{ A e, portanto, a } ddp \text{ entre B e C é igual a}$$

$$U = 10 \cdot 1 = 10 \text{ V.}$$

Logo, a ddp diminuiu.

- 16 Analisando a figura: $\varepsilon = 3 \text{ V}$ e $R_{\text{eq}} = 2,5 \Omega$.

Logo, a indicação do amperímetro é:

$$i = \frac{3}{2,5} = 1,2 \text{ A}$$

A indicação do voltímetro é:

$$U = 2 \cdot 1,2 = 2,4 \text{ V}$$

- 17 A resistência equivalente do circuito é:

$$R_{\text{eq}} = \frac{6 \cdot 12}{18} + 6 = 10 \Omega$$

Assim, a corrente no circuito vale:

$$i = \frac{1,5}{10} = 0,15 \text{ A}$$

- Nessas condições, a indicação do voltímetro é a ddp no resistor de 6Ω :

$$U = 6 \cdot 0,15 = 0,9 \text{ V}$$

- A ddp na associação em paralelo vale, portanto, $U = 1,5 - 0,9 = 0,6 \text{ V}$ e, portanto, a indicação do amperímetro é a corrente nos resistores de 3Ω (dois em série):

$$i = \frac{0,6}{6} = 0,1 \text{ A}$$

Alternativa **b**.

- 18 Como o voltímetro é ideal, com a chave K aberta, sua indicação é a fem e, portanto, $\varepsilon = 1,5 \text{ V}$.

Fechando-se a chave, o amperímetro indica:

$$i = \frac{1,5}{100} = 0,015 \text{ A} = 15 \text{ mA}$$

Alternativa **c**.

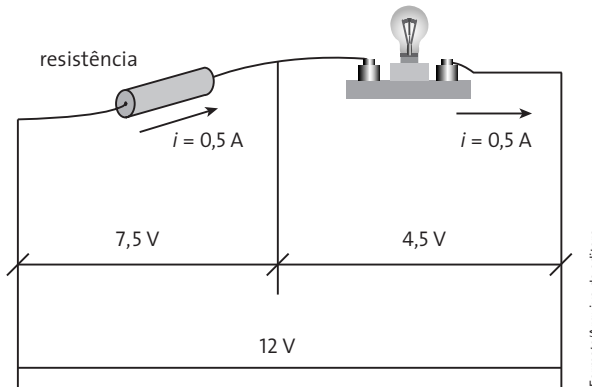
Retomando

- 19 Do gráfico, $\varepsilon = 12 \text{ V}$. Como $\frac{\varepsilon}{r} = 4$, temos: $\frac{12}{r} = 4$ e, portanto, $r = 3 \Omega$. Alternativa **c**.

- 20 O voltímetro mede a ddp nos terminais do gerador, e o amperímetro mede a corrente no circuito.

- 21 Como o circuito está em série, tanto a lâmpada quanto o resistor têm mesmo valor de corrente.

$$P = U \cdot i \Rightarrow 2,25 = 4,5 \cdot i \Rightarrow i = 0,5 \text{ A}$$



$$U_{\text{resistor}} = R_{\text{resistor}} \cdot i \Rightarrow 7,5 = R \cdot 0,5 \Rightarrow R = 15 \Omega$$

Alternativa **e**.

- 22 Cálculo de U :

$$P = U \cdot i \text{ e, portanto, } 360 = U \cdot 2,4; \text{ logo: } U = 150 \text{ V.}$$

Cálculo da indicação do amperímetro com ch em 2:

- com ch em 1: $2,4 = \frac{U}{2R}$ e, portanto, $\frac{U}{R} = 4,8 \text{ A}$.

- com ch em 2: o amperímetro indicará

$$\frac{U}{3R} = \frac{4,8}{3} = 1,6 \text{ A.}$$

- 23 Adicionando resistores em série e mantendo a ddp total: a resistência aumenta, a ddp em cada resistor diminui e a corrente diminui.

Alternativa **e**.

UNIDADE 2 – Ações elétricas a distância

CAPÍTULO 4 – Campo elétrico

Até o presente momento, trabalhamos com fenômenos elétricos relacionados a movimentos de corpos eletrizados e com a transmissão das ações elétricas por meio de fios condutores.

Neste capítulo, um enfoque complementar é apresentado com dois tipos de fenômenos: o acúmulo de cargas elétricas em corpos isolantes e a transmissão das ações elétricas a distância, mesmo não havendo suporte material para isso.

Há, para este capítulo, alguns requisitos teóricos matemáticos, ligados à geometria e à trigonometria, para permitir o entendimento de conceituações que envolvem vetores, que representam grandezas físicas vetoriais.

Você pode indicar para os alunos os pontos a serem recordados, antes de começar o assunto. Outra opção é, sempre que necessário, recordá-los e contextualizá-los.

Ressaltamos que este é um capítulo bastante propício para trabalhar as competências relacionadas à expressão matemática das leis físicas.

Sobre os conceitos de Física anteriormente desenvolvidos, os princípios da dinâmica de trabalho e de energia devem ter seus princípios básicos solidamente sedimentados para o bom entendimento do assunto.

Da Química, precisamos de algum conhecimento rudimentar da estrutura atômica dos condutores e dos isolantes.

Sugerimos que a exposição do assunto se inicie pelo texto apresentado em **Física tem história**. Os estudantes podem ser divididos em equipes, para pesquisar as partes específicas do texto e apresentar um seminário.

1. Processos de eletrização

A observação de fatos cotidianos deve nortear o raciocínio e diversos experimentos simples podem ser feitos com canudinhos de plástico, pentes, bolinhas de isopor e papel. Além disso, acreditamos que um gerador de Van der Graaf didático, de baixo custo, pode proporcionar experimentos e discussões de riqueza qualitativa e quantitativa.

Esses experimentos permitem um bom entendimento dos processos de eletrização. Feitos em tom lúdico, atraem os alunos para o estudo do assunto e desenvolvem suas competências para descrever fenômenos do dia a dia por leis físicas.

Para refletir

A pergunta inicial do capítulo pode dar origem às ideias de eletricidade estática e de corpos isolantes. Caso considere adequado, você pode discutir, então, as características da eletrização por atrito e por contato.

Ao ser esfregada no cabelo ou na roupa, a caneta esferográfica sofre eletrização por atrito, ficando com carga elétrica positiva. Carregada, a caneta passa a atrair, por indução eletrostática, os pedaços de papel inicialmente neutros e os eletriza por contato. Finalmente, como os pedaços de papel adquirem cargas com o mesmo sinal da caneta, eles sofrem repulsão e caem.

Acreditamos que a metodologia a ser empregada parte da observação do espaço físico ao redor do aluno, para interpretar

experiências cotidianas e explicar a diferença entre isolar (reter carga) e conduzir (transmitir carga).

Assim, eletrizar por atrito requer pelo menos um corpo isolante para ser eficiente e eletrizar por contato, por ser um processo de transmissão de cargas, requer condutores para ser eficiente. Os diversos experimentos descritos no texto podem ser desenvolvidos em aula.

Em seguida, com base em experimentos com o gerador de Van der Graaf, é possível mostrar qualitativamente o fenômeno da indução, insistindo no fato de se tratar, a rigor, de uma redistribuição de cargas.

Física explica

Sugerimos que os experimentos sejam explorados ao máximo, principalmente os descritos no texto dessa seção.

Quando aproximamos um corpo eletrizado negativamente da cabeça do eletroscópio (sem encostar), há indução de cargas positivas na cabeça, e as folhas localizadas na outra extremidade ficam eletrizadas negativamente. Como resultado, as folhas do eletroscópio se afastam.

2. Lei de Coulomb

Este é um tópico a ser desenvolvido de maneira conceitual. O ponto de partida pode ser a ênfase no fato de que as forças elétricas são de ação a distância e de que podem ser de atração ou repulsão. Como são forças, isto é, são resultado de interações, suas intensidades dependem do par de cargas, de maneira direta. Além disso, formam sempre um par ação e reação e têm, portanto, sempre a mesma intensidade.

Aqui o gerador de Van der Graaf é muito útil para mostrar como a distância e o meio mudam a intensidade da força elétrica. Qualitativamente, está enunciada a lei de Coulomb. Escrevê-la transforma-se em ato natural.

Além disso, parece natural que a direção da força elétrica, cuja intensidade é dada pela lei de Coulomb, seja a direção da reta que une os pontos nos quais as cargas estão localizadas. O sentido depende dos sinais das cargas, de acordo com a lei de Du Fay.

3. Campo elétrico

Chegamos a um dos conceitos mais sofisticados e importantes da Física contemporânea: o conceito de campo. Apesar de já termos alguma familiaridade com o campo gravitacional, ao estudar o campo elétrico as ideias gerais são sedimentadas, uma vez que as ações elétricas podem ser de atração e repulsão e complementam os conceitos desenvolvidos para o campo gravitacional, responsável por forças somente de atração.

Acreditamos que uma boa sequência de trabalho para este tópico começa com uma aula sobre uma discussão qualitativa, sem equações, que pode começar com a pergunta: Como a presença de uma carga elétrica fixa muda as propriedades do espaço em volta dela, produzindo força de natureza elétrica em qualquer corpo eletrizado colocado na região?

O passo seguinte pode ser: tendo um gerador de Van der Graaf, pergunte o que há de diferente no espaço em volta dele quando está ligado e desligado. Não dá para responder sem outro corpo: carga de prova.

Você pode distinguir, então, carga geradora de campo de carga de prova e concluir, sem cálculos, que o campo elétrico é dependente do meio, da carga fixa e da distância.

A finalização do raciocínio pode ser a caracterização (intensidade, direção e sentido) do campo elétrico de uma carga puntiforme. O campo elétrico criado por várias cargas fixas pode ser naturalmente apresentado pelo princípio da superposição (soma vetorial dos campos elétricos criados individualmente).

Fazer as deduções, após o desenvolvimento intuitivo, pode ser opcional.

Uma vez compreendida a ideia de superposição para campos criados por várias cargas puntiformes fixas, você pode considerar duas cargas puntiformes, de sinais opostos, fixas nas extremidades de um segmento de reta.

Ao mostrar como se determina o vetor campo elétrico em um ponto próximo a uma carga, em um sistema com duas cargas fora do segmento que as une, podemos mostrar ao aluno que o procedimento de caracterizar os campos criados pelas cargas, isoladamente, e somá-los vetorialmente é trabalhoso e precisa ser executado para cada ponto.

Isto é, determinar o vetor campo elétrico é fazer uma análise local (ponto por ponto) que, entretanto, é rica em detalhes (intensidade, direção e sentido), com precisão.

As linhas de campo a serem discutidas nesse ponto permitem um traçado aproximado e fornecem, para um conjunto de pontos (global), a ideia de intensidade, direção e sentido. Os diversos traçados apresentados no livro do aluno reforçam essa descrição.

Para completar o tópico, mostre aos alunos que o conceito de campo elétrico uniforme vale apenas em algumas regiões limitadas.

4. Potencial elétrico e energia potencial elétrica

Ao iniciar este tópico, é possível considerar, por simplicidade, um campo elétrico uniforme e, usando o trabalho de uma força elétrica, expressar a *ddp* e o potencial elétrico, para mostrar que este depende de uma referência adotada.

O tópico pode ser objeto de uma discussão para comparar grandezas escalares com vetoriais e grandezas diretamente mensuráveis com grandezas originárias de construções matemáticas.

Nesse ponto, vale a pena mostrar que a Física tem dois modelos diferentes para descrever seus fenômenos: um vetorial, fundamentado na caracterização das forças e seus efeitos, e outro escalar, fundamentado na energia e sua conservação. Ambos interligam-se pela ideia de trabalho.

Na eletricidade isso se repete: do modelo vetorial e das forças elétricas emerge o conceito de campo elétrico; do modelo escalar e da energia potencial elétrica emerge o conceito de potencial elétrico.

Esses fatos podem ser resumidos pelo quadro a seguir, que pode, caso você considere interessante, ser apresentado.

	Grandeza diretamente mensurável	Grandeza originária de construção matemática
Modelo vetorial	Força elétrica	Campo elétrico
Modelo escalar	Energia potencial elétrica	Potencial elétrico

5. Relação entre as representações do campo elétrico

O tópico final deste capítulo pode ser abordado com base na discussão de que os conceitos de campo elétrico e potencial elétrico interligam-se pelas propriedades das linhas de força e das superfícies equipotenciais.

Acreditamos que o entendimento desse tópico será maior se for apresentado da maneira mais visual possível, com desenhos de linhas de força e superfícies equipotenciais nos diversos campos. O quadro a seguir resume esses principais fatos e pode ser apresentado caso você considere adequado.

	Ponto a ponto quantitativo	Global qualitativo
Modelo vetorial	Campo elétrico	Linhas de campo
Modelo escalar	Potencial elétrico	Superfícies equipotenciais

Física explica

Apresentamos os perigos da eletricidade estática, principalmente em climas secos. Os alunos podem ser divididos em equipes e, com base no texto apresentado, pesquisar quais são as medidas que as indústrias, principalmente as têxteis e as de papel, tomam para a prevenção dos efeitos negativos da eletricidade estática.

Os resultados das pesquisas podem ser apresentados na forma de seminário ou de pôster. Além disso, as duas questões apresentadas ao final do texto, embora tenham respostas simples, devem ser discutidas pelas diversas equipes.

1. Alternativa **d**.
2. Alternativa **b**.

Em construção

Neste capítulo, prestamos a nossa homenagem ao físico americano Robert Andrews Millikan. Você pode recomendar aos alunos uma pesquisa nos meios de informação para contextualizar seus trabalhos na História e verificar como suas contribuições influenciaram na vida em sociedade. Explique que Millikan recebeu o prêmio Nobel por seus trabalhos em Estrutura da Matéria.

Experimento

Esta seção pode ser explorada para trabalhos em equipe. Cada equipe, utilizando materiais diferentes, pode construir sua série triboelétrica. Uma atividade lúdica e divertida é construir a série triboelétrica da classe, partindo das séries obtidas pelas equipes.

Atividades complementares

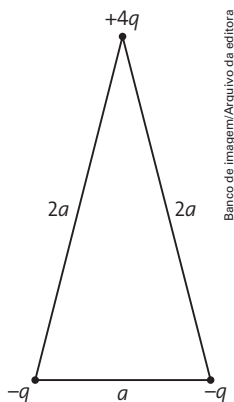
1. Um bastão de vidro inicialmente neutro é atritado a um pedaço de lã, também inicialmente neutro. No processo, $1,0 \cdot 10^{20}$ elétrons são transferidos do vidro para a lã. Sendo a carga elementar $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, determinar:
 - a) a carga final do bastão de vidro;
 - b) a carga final do pedaço de lã.

Resolução:

a) Vidro: $1,0 \cdot 10^{20} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = +16 \text{ C}$

b) Lã: -16 C

2. (UFPA) Um triângulo isósceles tem seus vértices ocupados por cargas elétricas pontuais, como mostra a figura.



O módulo da força coulombiana entre cargas de mesmo sinal é F_1 , e o módulo da força coulombiana entre cargas de sinais opostos é F_2 . A razão entre os módulos de quaisquer duas forças coulombiana do sistema será igual a:

- a) a .
b) 2.
c) $\frac{a}{2}$
d) $2a$.
e) 1.
f) I.R.

Resolução:

$$F_1 = \frac{Kq^2}{a^2}; F_2 = \frac{K4q^2}{(2a)^2} = F_1. \text{ Como todas as forças têm mesma}$$

intensidade, todas as relações são iguais a 1.

Alternativa **e**.

3. Nos extremos de um segmento de reta AB , distanciados por 6 cm, no vácuo, colocam-se cargas de $+2\mu\text{C}$ e $-2\mu\text{C}$, respectivamente. Uma terceira carga $q = +1\mu\text{C}$ é colocada no ponto médio do segmento AB . Determine a força elétrica resultante sobre a carga q .

Resolução:

As duas cargas dos extremos exercem sobre o ponto médio forças de mesma intensidade, direção e sentido.

Logo:

$$F = 2 \cdot k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = 2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-6}}{3^2} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ N, de A para B}$$

4. Em uma região em que existe um campo elétrico de intensidade $1,0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$, um corpúsculo de massa $1,0 \text{ g}$ e carga $1,0 \mu\text{C}$ é abandonado em repouso. Calcular:
- a) a intensidade da força elétrica;
b) o módulo da aceleração escalar;
c) a velocidade escalar depois de percorrer 1 m no campo;
d) a velocidade escalar após movimentar-se durante $5,0 \text{ s}$ no campo.

Resolução:

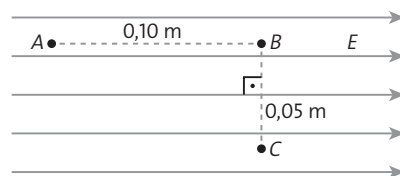
a) $F = qE = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5 = 0,1 \text{ N}$

b) $a = \frac{F}{m} = \frac{0,1}{10^{-3}} = 100 \text{ m/s}^2$

c) $v^2 = 2a\Delta s = 2 \cdot 100 \cdot 1 = 200$, portanto: $v = 10\sqrt{2} \text{ m/s}$

d) $v = a\Delta t = 100 \cdot 5 = 500 \text{ m/s}$

5. (Ufop-MG) O campo elétrico em uma dada região é uniforme e tem módulo $E = 100 \text{ N/C}$, como mostra a figura.



- a) Determine a diferença de potencial entre os pontos A e B, B e C e A e C.
b) Determine a força elétrica que age sobre uma carga puntual $q = 1 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, colocada no ponto A deste campo.

Resolução:

a) $V_A - V_B = Ed = 100 \cdot 0,1 = 10 \text{ V}$

$$V_B = V_C, \text{ logo: } V_B - V_C = 0$$

$$\text{Consequentemente: } V_A - V_C = 10 \text{ V}$$

b) $F = |q| \cdot E = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ N}$

Resolução dos exercícios

1. **I. Correta** (eletrização por contato).

- II. **Correta** (clima seco facilita o armazenamento de cargas).

- III. **Incorreta**.

Alternativa **b**.

2. I. A esfera A e o pano de seda eletrizam-se com sinais opostos. Da série triboelétrica, A fica negativa e o pano de seda fica positivo. Isto é, A fica com $-8 \mu\text{C}$ e o pano com $+8 \mu\text{C}$.

- II. A esfera B adquire carga de mesmo sinal de A. Como as esferas são idênticas, A fica com $-4 \mu\text{C}$ e B fica com $-4 \mu\text{C}$.

- III. A esfera C adquire carga de mesmo sinal de A. Como as esferas são idênticas, A fica com $-2 \mu\text{C}$ e C fica com $-2 \mu\text{C}$.

$$\text{Situação final: } Q_A = -2 \mu\text{C}; Q_B = -4 \mu\text{C}; Q_C = -2 \mu\text{C}; Q_{\text{pano}} = +8 \mu\text{C}.$$

3. Os corpos ficam eletrizados quando aproximados na horizontal, pois, nesse caso, o conjunto sofre indução com B_1 próximo (carga negativa) e B_2 distante (carga positiva). Ao retirar a barra, B_1 e B_2 ficam isoladas, mantendo as cargas adquiridas.

A aproximação com a barra na vertical produz indução igual nas duas esferas e cada uma delas permanece neutra.

4. A aproximação das esferas R e S produz indução em ambas que, apesar de terem as cargas separadas, permanecem neutras. Quando S é tocada (terra), a carga de mesmo sinal que a indutora é neutralizada e ela, portanto, fica positiva. Logo, ao final, R está neutra e S está positiva.

Alternativa **d**.

5 I. **Correta** (ação e reação).

II. **Incorreta.** Dobrar uma carga e reduzir a outra à metade não muda o produto das cargas. Logo, não mudando D , a força é a mesma.

III. **Correta.** A força é inversamente proporcional ao quadrado da distância.

IV. **Incorreta.** Quando a distância aumenta 3 vezes, a força diminui 9 vezes (quadrado da distância).

V. **Correta.**

$$6 \text{ a) } F = K \cdot \frac{Q^2}{r^2} \Rightarrow 20 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q^2}{(60 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow Q^2 = 20 \cdot \frac{36 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^9} = 8 \cdot 10^{-10}$$

$$\text{Então: } Q = 2\sqrt{2} \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

b) Ao dividir a constante eletrostática por 4, a força também fica dividida por 4, passando a valer 5 N.

7 a) A partícula eletrizada com $-Q$ é atraída com $2F$ por $+2Q$ e com $F \cdot \frac{4Q}{(2r)^2}$ por $+4Q$. Assim, a resultante terá intensidade $3F$.

b) A carga $+2Q$ é atraída com $2F$ por $-Q$ e repelida com $8F \cdot (2Q \cdot 4Q)$ por $+4Q$. Pela disposição das cargas, essas forças têm mesmo sentido e a resultante terá, portanto, intensidade $10F$.

c) A carga $+4Q$ é atraída com F por $-Q$ e repelida com $8F$ por $+2Q$. Pela disposição das cargas, essas forças têm sentidos opostos e a resultante terá, portanto, intensidade $7F$.

8 O ponto de equilíbrio deve ficar entre as cargas, pois elas têm mesmo sinal. A distância do ponto até a carga $+4q$ deve ser o dobro da distância até a carga $+q$. Logo, deve ser o ponto B.

Alternativa b.

Ampliando a justificativa:

$$\frac{Kq(q')}{r_1^2} = \frac{K4q(q')}{r_2^2} \text{ (para haver equilíbrio, as forças devem ter mesma intensidade).}$$

$$\text{Logo, } \frac{1}{r_1^2} = \frac{4}{r_2^2} \text{ e, portanto, } r_2 = 2r_1.$$

9 Como q_1 é positiva, em A o vetor campo elétrico tem a mesma direção e sentido da força.

Como q_2 é negativa, em B o vetor campo elétrico tem a mesma direção e sentido oposto ao da força.

$$10 \text{ Intensidade: } E = \frac{F}{q} = \frac{10}{2 \cdot 10^{-6}} \text{ e, portanto, } E = 5 \cdot 10^6 \text{ N/C.}$$

Direção e sentido: como q é positiva, a direção e sentido do campo coincidem com a direção e sentido da força (para o norte).

11 a) Para um ponto situado 1 m à direita de Q_B , $r_A = 3$ m e $r_B = 1$ m. Logo:

$$E_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6}}{9} \Rightarrow E_A = 4 \cdot 10^3 \text{ N/C (horizontal para a esquerda)}$$

$$E_B = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{9 \cdot 10^{-6}}{1} \Rightarrow E_B = 81 \cdot 10^3 \text{ N/C (horizontal para a direita)}$$

Logo, o campo elétrico resultante é de $7,7 \cdot 10^4$ N/C, horizontal para a direita.

b) Para um ponto situado 4 m à direita de Q_A , $r_A = 4$ m e $r_B = 6$ m. Logo:

$$E_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6}}{16} \Rightarrow E_A = 2,25 \cdot 10^3 \text{ N/C (horizontal para a direita)}$$

$$E_B = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{9 \cdot 10^{-6}}{36} \Rightarrow E_B = 2,25 \cdot 10^3 \text{ N/C (horizontal para a esquerda)}$$

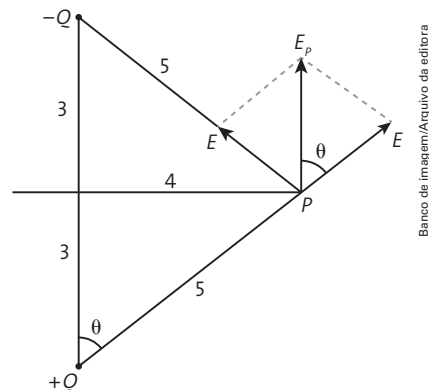
Logo, o campo elétrico resultante é nulo.

12 A intensidade do campo criado pelas cargas, individualmente, vale:

$$E = \frac{KQ}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6}}{(5 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow E = 1,8 \cdot 10^8 \text{ N/C}$$

Logo, conforme mostra a figura,

$$E_p = 2 \cdot E \cdot \cos \theta = 2 \cdot 1,8 \cdot 10^8 \cdot \frac{3}{5} = 2,16 \cdot 10^8 \text{ N/C, vertical, para cima.}$$



13 A apresenta carga elétrica positiva (linhas de campo de afastamento); B apresenta carga elétrica negativa (linhas de campo de aproximação); C apresenta carga elétrica positiva (linhas de campo de afastamento).

Alternativa b.

14 Para atingir o ponto P, os elétrons devem ser defletidos para cima pela força elétrica. Logo, como os elétrons apresentam cargas negativas, devem estar sob a ação de um campo elétrico vertical, para baixo.

Alternativa a.

15 a) Como o campo elétrico é uniforme, a força aplicada à carga será constante. Como ela está inicialmente em repouso, entrará em movimento.

b) Como a força é constante e a carga está inicialmente em repouso, executará movimento retilíneo uniformemente acelerado.

16 Chamamos de A o polo positivo e de B o polo negativo.

$$\text{a) } V_A - V_B = 12 \text{ V. Como } V_B = 0, \text{ temos: } V_A = +12 \text{ V}$$

$$\text{b) } V_A - V_B = 12 \text{ V. Como } V_A = 0, \text{ temos: } V_B = -12 \text{ V}$$

$$\text{c) } V_A - V_B = 12 \text{ V. Como } V_B = 3 \text{ V, temos: } V_A = +15 \text{ V}$$

- 17 a) Considerando o campo elétrico uniforme, $E \cdot d = U$ e, portanto, $E \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 250$. Logo, $E = 5 \cdot 10^3 \text{ N/C}$.

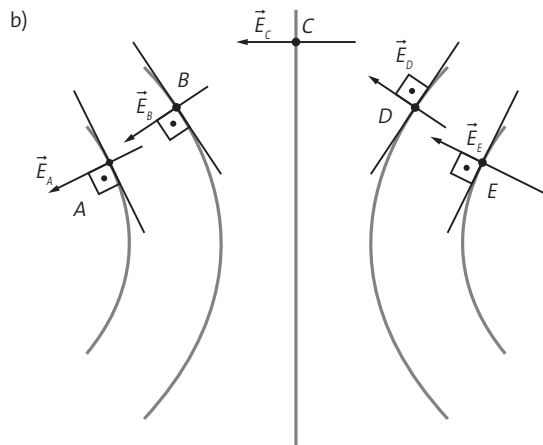
b) $F = q \cdot E = 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3 \Rightarrow F = 5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$

c) $\tau = F \cdot d = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \Rightarrow \tau = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

Outra forma de resolver é:

$$\tau = q \cdot U = 10^{-6} \cdot 250 \Rightarrow \tau = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

- 18 a) $\tau = q(V_A - V_B) = 2 \cdot 10^{-6} \cdot [-20 - (-10)] \Rightarrow \tau = -2 \cdot 10^{-5} \text{ J}$



Banco de Imagem/Arquivo da editora

- 19 $E \cdot d = V_A - V_B \Rightarrow V_A - V_B = 120 \cdot 4 \Rightarrow V_A - V_B = 480 \text{ V}$

Retomando

- 20 Como nas etapas I e III o pêndulo e o bastão repeliram-se, eles detinham cargas de mesmo sinal. Logo, as cargas do pêndulo nas etapas I e III devem ser de mesmo sinal.

Na etapa II, o pêndulo está neutro.

Logo, as duas únicas possibilidades são 2 e 5.

Alternativa e.

- 21 I. **Verdadeira.**

II. **Falsa.** A ligação à terra deve ser desfeita em presença do indutor.

III. **Falsa.** Os elétrons é que vão da terra para o induzido.

IV. **Verdadeira.** A carga final tem sinal oposto à carga do indutor.

Alternativa c.

- 22 No contato de E_1 e E_2 , cada esfera fica com carga $\frac{Q}{2}$

A esfera E_2 , inicialmente com $\frac{Q}{2}$, em contato com E_3 , resulta nas cargas finais

$$E_2 = \frac{Q}{4} \text{ e } E_3 = \frac{Q}{4}.$$

Logo, as cargas em E_1 , E_2 e E_3 serão: $\frac{Q}{2}$, $\frac{Q}{4}$ e $\frac{Q}{4}$.

Alternativa a.

- 23 A mão da pessoa está neutra, e os balões têm mesmos sinais.

Alternativa b.

- 24 Para haver corrente elétrica, é necessário diferença de potencial.

Alternativa e.

CAPÍTULO 5 – Cargas elétricas em condutores

Neste capítulo, a eletricidade sem fio dos campos elétricos encontra a eletricidade dos fios condutores e as situações-limite entre o armazenamento de cargas e as correntes elétricas são discutidas.

Por isso, começamos o texto com as perguntas sobre relâmpagos e descargas elétricas na atmosfera. O aluno chegará às respostas durante o desenvolvimento dos modelos teóricos.

Não há, para o estudo deste assunto, pré-requisito matemático específico. Apenas a física dos capítulos anteriores, que envolve os conceitos de campo, potencial e corrente elétrica, é necessária para o bom entendimento das propriedades dos condutores em equilíbrio eletrostático.

1. Propriedades gerais dos condutores em equilíbrio eletrostático

Sugerimos que seja empregada uma metodologia que parta da observação do espaço físico ao redor do aluno para interpretar experiências cotidianas relacionadas às descargas elétricas na atmosfera e à blindagem eletrostática.

A abordagem inicial pode ser feita por meio de perguntas do tipo:

- O que acontece com um carro durante uma tempestade?
- Como funciona o para-raios?

As respostas aparecem naturalmente da conceituação de condutor eletrizado em equilíbrio eletrostático e de suas propriedades gerais.

Cabe uma discussão inicial sobre a estrutura atômica dos condutores, mostrando que eles são constituídos por átomos com poucos elétrons no último nível de energia; elétrons, portanto, livres.

Assim, você pode explicar que um corpo condutor neutro não tem excesso ou falta de elétrons e que, embora o número total de elétrons seja igual ao número total de prótons, muitos desses elétrons estão livres e em movimento desordenado por todo o corpo.

Esse pode ser o momento para a conceituação de equilíbrio eletrostático, ou seja, ausência de correntes elétricas, pois não há movimento ordenado de elétrons livres.

Ao eletrizarmos esse condutor, inicialmente neutro e em equilíbrio eletrostático, criamos uma situação transitória de desequilíbrio e, decorrido um tempo curto, o campo elétrico fica nulo no interior e o potencial elétrico fica constante.

O movimento dos elétrons livres torna-se, novamente, desordenado, com o excesso de cargas distribuído pela superfície externa.

O fato de o campo elétrico ser perpendicular à superfície sobre a região da superfície externa do condutor pode ser explicado pela não realização de trabalho pela força elétrica quando uma carga elétrica se move sobre ela.

Nesse ponto, o texto inicial de Richard Feynmann, da **Física explica**, pode ser lido e discutido para desenvolver as competências relativas à expressão de fenômenos cotidianos por leis físicas.

2. Condutor esférico eletrizado

Para iniciar este tópico você pode optar por retomar conceitos de gravitação e dos campos gravitacionais criados pelos planetas. Uma analogia entre esse campo e o campo elétrico permite expressar a intensidade do campo elétrico criado por uma esfera eletrizada, em pontos de seu exterior.

Como nos pontos do interior do condutor, independentemente da forma geométrica, esse campo é nulo, o problema fica com o modelo matemático completo.

Este é, entretanto, um ponto delicado. O aluno pode perguntar: O que acontece sobre a superfície? Há uma descontinuidade?

Consideramos essa discussão difícil e que pode ser opcional. Ela está muito bem apresentada no artigo: “Campo elétrico na superfície de um condutor: uma questão a ser esclarecida”, de Gustavo Elia Assad e publicado pela *Revista Brasileira de Ensino de Física*. Disponível em: <www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/344701.pdf>. Acesso em: abr. 2016.

3. Indução eletrostática e condensação de carga

O fenômeno da indução eletrostática, visto no Capítulo 2, pode ser retomado e explicado de maneira mais detalhada com os diagramas de potencial elétrico relativo ao campo elétrico criado por um condutor eletrizado, em equilíbrio eletrostático.

O diagrama qualitativo do potencial elétrico, que você pode traçar para cada etapa do processo, pode ser utilizado para explicar os movimentos de cargas, que leva ao fenômeno da condensação de cargas elétricas.

Você pode questionar quais seriam as condições para a condensação ideal (induzido ligado à terra e indução total) e, em discussão com os alunos, concluir que isso ocorre em dois casos: placas planas paralelas e induzido envolvendo totalmente o indutor.

O estudo pode continuar com a definição de capacitor (condensador ideal), e o conceito de capacitância pode aparecer de maneira natural: maior *ddp* entre indutor e induzido, maior carga armazenada.

Ao definir as unidades de capacitância, a ideia de que um farad é uma unidade muito grande pode surgir da definição: 1 V (*ddp* pequena) implica carga 1 C (carga grande). A explicação para o uso de submúltiplos (mili, micro, nano e pico) completa a troca de ideias.

Trabalho em equipe

Este tópico pode ser finalizado com a leitura do texto “Origem das correntes atmosféricas” e a resolução das atividades, cujas respostas seguem:

1. Alternativa **b**.
2. a) $\text{Carga} = 1800 \cdot 15 \cdot 60 = 1,62 \cdot 10^6 \text{ C}$
b) número de elétrons = carga/carga elementar = 10^{25}

É possível complementar o trabalho em equipe com uma pesquisa bibliográfica e na internet. Esse trabalho pode ser apresentado em forma de seminário ou pôster. Para realizar o trabalho, você pode sugerir ao aluno que acesse o *site* <www.inpe.br> (acesso em: abr. 2016) e procure as seguintes informações:

- Quantos raios caem, em média, por dia, sobre a superfície da Terra.
- Quantos raios caem, em média, por dia, sobre o território brasileiro.

Com base nos dados pesquisados, estime a carga elétrica total transportada em cada caso.

4. Energia de um capacitor

Este tópico pode ser iniciado com algumas perguntas sobre o processo de condensação de cargas:

- Para os processos de eletrização do indutor, de separação de cargas do induzido, de troca de cargas com a terra, foi necessária energia?
- Qual foi a fonte dessa energia?
- Essa energia foi dissipada ou armazenada?
- O que aconteceria se, uma vez carregados, ligássemos o indutor ao induzido por um fio condutor?

Essa discussão pode ser utilizada para explicar que capacitores são elementos de circuitos armazenadores de energia. O raciocínio dedutivo apresentado no Livro do Aluno permite calcular o valor da energia armazenada.

O *flash* de uma câmera fotográfica pode servir de exemplo para explicar a carga e descarga de capacitores.

Seguir este caminho pode ajudar o aluno a aprimorar sua competência de observar fenômenos físicos e associá-los a modelos matemáticos aplicáveis a situações tecnológicas.

5. Associações e circuitos com capacitores

Você pode iniciar o estudo com a ideia de equivalência, presente em todo o raciocínio científico e necessária para o entendimento das associações de capacitores. Explique que equivalência, aqui, é relativa ao ponto de vista energético. Isto é, capacitores equivalentes armazenam a mesma quantidade de energia elétrica.

Para falar da associação em série, você pode começar com a pergunta: Tenho uma bateria de 12 V e preciso ligar um capacitor de *ddp* nominal 3 V. O que devo fazer?

Acreditamos que, a partir dessa pergunta, será natural explicar a associação em série de capacitores. Recorde ainda, sem muitos detalhes, que a associação em série de resistores poderá servir para mostrar que ambas são totalmente análogas, diferindo, apenas, no cálculo do elemento equivalente.

Para falar da associação em paralelo, você pode começar com a pergunta: Como faço para ligar todos os capacitores a uma *ddp* de 12 V?

Assim, é possível explicar a associação em paralelo de capacitores. Recorde ainda, sem muitos detalhes, que a associação em paralelo de resistores poderá servir para mostrar que ambas são totalmente análogas, diferindo, apenas, no cálculo do elemento equivalente.

Você pode encerrar este capítulo com o estudo de circuito RC (resistor/capacitor) em série, que integra todos os pontos desenvolvidos no capítulo, de maneira qualitativa.

Caso considere interessante, você pode comentar que este é um caso de corrente e *ddp* variáveis no tempo. As principais expressões para o circuito proposto no livro são:

- Corrente no circuito: $i = \left(\frac{E}{R}\right) \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$;
- *ddp* no resistor: $UR = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$;
- *ddp* no capacitor: $UC = E - E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$.

Em construção

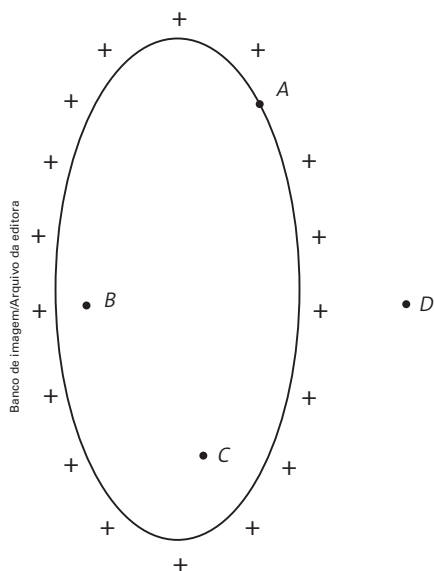
Neste capítulo, prestamos a nossa homenagem ao físico francês André-Marie Ampère. Você pode recomendar aos alunos uma pesquisa nos meios de informação para contextualizar seus trabalhos na história e verificar como suas contribuições influenciaram na vida em sociedade. Esclareça que Ampère foi um grande matemático, além de trabalhar como físico e químico, e que parte de sua formação foi autodidata. Os resultados da pesquisa podem ser apresentados na forma de seminário ou de pôster.

Experimento

O tópico apresenta a blindagem eletrostática, com a construção de uma gaiola de Faraday. Os alunos podem ser divididos em equipes e, com base no roteiro apresentado, realizar os diversos experimentos. Os resultados da pesquisa podem ser apresentados na forma de seminário ou de pôster.

Atividades complementares

1. (UPM-SP) O condutor ao lado está carregado positivamente e em equilíbrio eletrostático. O ponto A está localizado na superfície do condutor, o B está no interior e próximo à superfície, o C mais no interior e o D é externo.



Com relação ao potencial elétrico desses pontos, podemos afirmar que:

- a) $V_C = V_B = V_A = V_D$
- b) $V_C > V_B > V_A > V_D$
- c) $V_C = V_B > V_A > V_D$
- d) $V_C = V_B = V_A < V_D$
- e) $V_C = V_B = V_A > V_D$

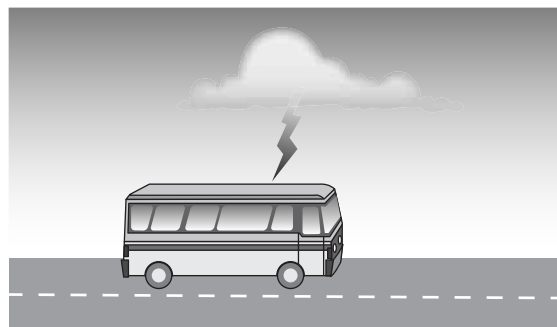
Resolução:

Os potenciais elétricos de A, B e C são iguais e o do ponto D é menor (ponto externo e carga positiva).

Logo: $V_A = V_B = V_C > V_D$.

Alternativa e.

2. (UFV-MG) Durante uma tempestade, um raio atinge um ônibus que trafega por uma rodovia.



Pode-se afirmar que os passageiros:

- a) não sofrerão dano físico em decorrência deste fato, pois os pneus de borracha asseguram o isolamento elétrico do ônibus.
- b) não sofrerão dano físico em decorrência deste fato, pois a carroceria metálica do ônibus atua como blindagem.
- c) serão atingidos pela descarga elétrica, em virtude de a carroceria metálica ser boa condutora de eletricidade.
- d) serão parcialmente atingidos, pois a carga será homoganeamente distribuída na superfície interna do ônibus.
- e) não serão atingidos, pois os ônibus interurbanos são obrigados a portar um para-raios em sua carroceria.

Resolução:

O ônibus funciona como uma gaiola de Faraday.

Alternativa b.

3. (UFG-GO) Podemos entender, simplificadamente, a descarga elétrica entre duas nuvens, supondo que elas se comportem como um capacitor ideal de placas paralelas, com cargas iguais e de sinais opostos. Considere que a distância entre essas duas nuvens seja de 150 m e que a capacitância do sistema formado pelas nuvens seja igual a $1,6 \cdot 10^{-8}$ F.

- a) Qual a carga elétrica acumulada em cada uma dessas nuvens, para provocar uma descarga elétrica entre elas, sabendo-se que um campo elétrico de intensidade igual $3 \cdot 10^6$ V/m ioniza o ar entre as nuvens?
- b) Supondo que toda a energia fornecida pela descarga elétrica fosse armazenada, quantas lâmpadas de 60 W poderiam ficar acesas durante uma hora, utilizando essa energia?

Resolução:

- a) $Q = ?$

$$E = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

$$U = E \cdot d \Rightarrow U = 3 \cdot 10^6 \cdot 150 \Rightarrow U = 450 \cdot 10^6 \text{ V}$$

$$Q = C \cdot U \Rightarrow Q = 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot 450 \cdot 10^6 \Rightarrow Q = 7,2 \text{ C}$$

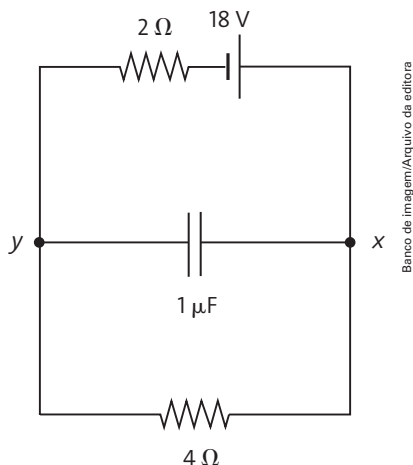
$$\text{b) } E_p = \frac{C \cdot U^2}{2} \Rightarrow E_p = \frac{1,6 \cdot 10^{-8} \cdot (450 \cdot 10^6)^2}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_p = 1,62 \cdot 10^9 \text{ J}$$

$$n \cdot P \cdot \Delta t = E_p \Rightarrow n \cdot 60 \cdot 3600 = 1,62 \cdot 10^9 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n = 7500 \text{ lâmpadas}$$

4. A figura abaixo representa um circuito elétrico em regime estacionário.



- Qual é a intensidade e o sentido da corrente no gerador?
- Qual é a intensidade da corrente no ramo de circuito que contém o capacitor?
- Determine a energia potencial elétrica armazenada no capacitor e os sinais das cargas em cada uma das armaduras.

Resolução:

- Para o cálculo da intensidade de corrente, aplicamos a lei de Pouillet, ignorando o trecho em que está inserido o capacitor, pois nesse trecho o circuito está aberto:

$$\varepsilon = \Sigma Ri \Rightarrow 18 = (2 + 4) \cdot i \Rightarrow i = 3 \text{ A}$$

O sentido da corrente é determinado pela polaridade do gerador, sendo, portanto, de sentido horário.

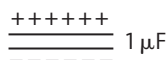
- Em regime estacionário, não circula corrente pelo ramo que contém o capacitor. Logo, $i = 0$.
- A tensão entre os terminais do capacitor (pontos X e Y) é a mesma que se tem, por exemplo, no resistor de 4 V.

$$U_{XY} = R \cdot i \Rightarrow U_{XY} = 3 \cdot 4 \Rightarrow U_{XY} = 12 \text{ V}$$

A energia potencial elétrica armazenada no capacitor pode ser obtida por:

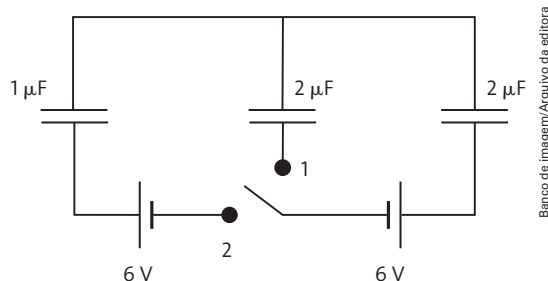
$$E_p = \frac{C \cdot U^2}{2} \Rightarrow E_p = \frac{10^{-6} \cdot (12)^2}{2} \Rightarrow E_p = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

Pelo sentido da corrente no resistor, vemos que o potencial do ponto X é maior que o do ponto Y. Nos capacitores, a armadura que fica eletrizada positivamente está ligada ao maior potencial, enquanto a armadura eletrizada negativamente está ligada ao menor potencial. Dessa forma, concluímos que a polaridade das armaduras é a esquematizada abaixo.



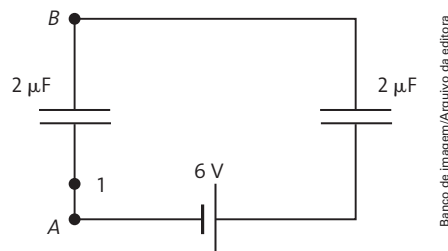
5. (UPM-SP) No esquema da figura, os três capacitores encontram-se neutros: desprezam-se as resistências internas dos geradores. Leva-se a chave para a posição 1 e aguarda-se o equilíbrio elétrico; a seguir, leva-se a chave para a posição 2.

Atingindo o equilíbrio elétrico após essa operação, qual será a carga do capacitor de capacitância $1 \mu\text{F}$?



Resolução:

Como a chave na posição 1, o circuito é equivalente ao apresentado a seguir:



Os dois capacitores de $2 \mu\text{F}$ estão em série: $C = 1 \mu\text{F}$

Temos, então $V_1 = V_A$ e $V_B - V_A = 3,0 \text{ V}$, pois, como os dois capacitores de $2 \mu\text{F}$ estão em série, a tensão em cada um é metade da total.

Ao mudarmos a posição da chave, o potencial V_1 não se altera, pois a carga na armadura inferior permanece a mesma. Como nos capacitores há indução total, a carga na armadura superior também se mantém. Dessa forma, o potencial V_B também permanece o mesmo.

Com a chave na posição 2, os capacitores de $1 \mu\text{F}$ e o de $2 \mu\text{F}$ ficam em paralelo.

A carga total antes desse contato é $Q = CU$. Então:

$$Q = 2\mu \cdot 3 = 6 \mu\text{C}.$$

A carga do capacitor de $1 \mu\text{F}$ será, então: $Q_1 = \frac{Q}{3} = 2 \mu\text{C}.$

Resolução dos exercícios

- Verdadeira.**
 - Verdadeira.** O trabalho da força elétrica é nulo entre quaisquer dois pontos da superfície, pois ela é equipotencial.
 - Falsa.**
 - Falsa.**
- Por causa da blindagem eletrostática, o campo elétrico no interior do carro é nulo. Alternativa **d**.
- Em uma tempestade, as árvores podem funcionar como para-raios, graças ao poder das pontas. Alternativa **b**.
- O bastão pode tocar a esfera interna ou externamente. Nos dois casos, a esfera ficará eletrizada com a carga localizada na superfície externa.

- 5 a) Em todos os pontos do interior da peça metálica, o vetor campo elétrico é nulo. Logo, no ponto A, $E = 0$.
- b) Todos os pontos do interior e da superfície da peça metálica têm o mesmo potencial elétrico. Logo, o potencial elétrico do ponto B é -30 V .

- 6 a) No interior da esfera, $E = 0$.

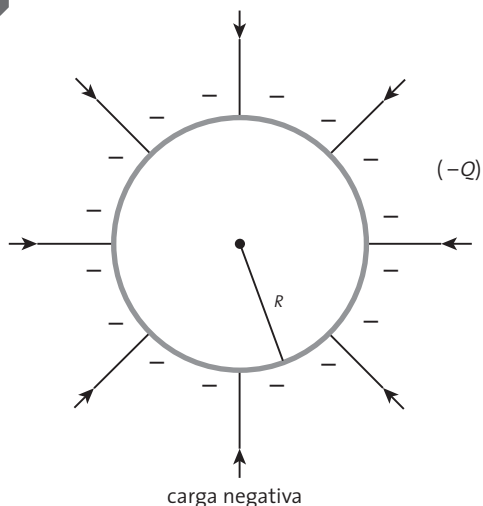
- b) No interior da esfera, $Q = 0$.

- 7 a) Não há diferença. Essa propriedade vale para condutores ocos e maciços.

- b) Ponto do exterior:

$$E = K \cdot \frac{Q}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{(5,0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow E = 7,2 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

8



- 9 $V_A = V_B$. Logo, $\tau = 0$.

- 10 Ponto do exterior:

$$E = K \cdot \frac{Q}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{(5,0 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow E = 7,2 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

- 11 a) $C = 1000 \cdot 10^{-6} \Rightarrow C = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ F}$

- b) $Q = C \cdot U = 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \Rightarrow Q = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ C}$

- 12 $Q = C \cdot U = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \Rightarrow Q = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ C}$

- 13 a) $U = E \cdot d = 3 \cdot 10^6 \cdot 150 \Rightarrow U = 4,5 \cdot 10^8 \text{ V}$

- b) $Q = C \cdot U = 1,0 \cdot 10^{-8} \cdot 4,5 \cdot 10^8 \Rightarrow Q = 4,5 \text{ C}$

- 14 a) $C = \frac{Q}{U} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{100} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ F}$

- b) Descrição do gráfico: reta que passa pela origem, passando pelo ponto (0,1; 1). No eixo vertical Q (μC) e no eixo horizontal U (V).

- 15 a) $Q = C \cdot U = 1 \cdot 8 \Rightarrow Q = 8 \mu\text{C}$

- b) Descrição do esboço: duas placas paralelas - uma com carga $+8 \mu\text{C}$ e outra com $-8 \mu\text{C}$.

- 16 I. **Correto.** A intensidade do campo elétrico é de 10^7 V/m .

- II. **Incorreto.** $Q = C \cdot U = 1,26 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-3} \Rightarrow Q = 88,2 \cdot 10^{-6} \Rightarrow Q = 88,2 \mu\text{C}$

17 $W = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 10}{2} \Rightarrow W = 5 \cdot 10^{-5} \text{ J}$

18 a) $W = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2}{2} \Rightarrow W = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

b) $P = \frac{W}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{7,2 \cdot 10^{-5}}{72} \Rightarrow \Delta t = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}$

c) $P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{6^2}{72} \Rightarrow R = 0,5 \Omega$ (Foi adotada uma *ddp* média de 6 V, uma vez que a *ddp* variou entre 12 V e 0 V, no intervalo de tempo considerado.)

19 a) $Q = C \cdot U = 100 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \Rightarrow Q = 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ C}$

b) $W = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{1,5 \cdot 10^{-1} \cdot 1,5}{2} \Rightarrow W = 1,125 \cdot 10^{-1} \text{ J}$

c) $P = \frac{W}{\Delta t} \Rightarrow P = \frac{1,125 \cdot 10^{-1}}{0,5} \Rightarrow P = 0,25 \text{ W}$

20 a) $W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(4,5)^2}{2 \cdot 10^{-8}} \Rightarrow W = 1,0 \cdot 10^9 \text{ J}$

b) $\tau = F \cdot d \Rightarrow 1 \cdot 10^9 = F \cdot 150 \Rightarrow F = 6,7 \cdot 10^6 \text{ N}$

- c) A energia potencial acumulada dobrará de valor.

- d) A energia potencial acumulada quadruplicará de valor.

- 21 Energia liberada pelo capacitor ao se descarregar:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{22 \cdot 10^{-3} \cdot 25}{2} \Rightarrow W = 6,875 \text{ J}$$

Essa energia foi utilizada para elevar o tijolo de massa 0,5 kg a uma altura h , a qual vale:

$$W = m \cdot g \cdot h \Rightarrow h = \frac{W}{m \cdot g} = \frac{6,875}{0,5 \cdot 10} \Rightarrow h = 1,375 \text{ m} \approx 1,4 \text{ m}$$

Alternativa c.

22 a) $C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{6}{5} \Rightarrow C_{eq} = 1,2 \mu\text{F}$

b) $Q = Q_1 = Q_2 = C_{eq} \cdot U = 1,2 \cdot 18 \Rightarrow Q = 21,6 \mu\text{C}$

c) $U_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{21,6}{3} \Rightarrow U_1 = 7,2 \text{ V}$

$$U_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{21,6}{2} \Rightarrow U_2 = 10,8 \text{ V}$$

d) $W_1 = \frac{Q_1 U_1}{2} = \frac{21,6 \cdot 7,2}{2} \Rightarrow W_1 = 77,76 \mu\text{J}$

$$W_2 = \frac{Q_2 U_2}{2} = \frac{21,6 \cdot 10,8}{2} \Rightarrow W_2 = 116,64 \mu\text{J}$$

Obs.: Neste exercício é importante notar que:

$$\mu\text{F} \cdot \text{V} = \mu\text{C}; \frac{\mu\text{C}}{\mu\text{F}} = \text{V} \text{ e } \mu\text{C} \cdot \text{V} = \mu\text{J}.$$

23 a) $C_{eq} = C_1 + C_2 = 5 \mu\text{F}$

b) $U = \frac{Q}{C_{eq}} = \frac{30}{5} \Rightarrow U = 6 \text{ V}$

c) $Q_1 = C_1 \cdot U = 3 \cdot 6 \Rightarrow Q_1 = 18 \mu\text{C}$

$$Q_2 = C_2 \cdot U = 2 \cdot 6 \Rightarrow Q_2 = 12 \mu\text{C}$$

$$d) W_1 = \frac{Q_1 U_1}{2} = \frac{18 \cdot 6}{2} \Rightarrow W_1 = 54 \mu\text{J}$$

$$W_2 = \frac{Q_2 U_2}{2} = \frac{12 \cdot 6}{2} \Rightarrow W_2 = 36 \mu\text{J}$$

Obs.: Neste exercício é importante notar que:

$$\mu F \cdot V = \mu C; \frac{\mu C}{\mu F} = V \text{ e } \mu C \cdot V = \mu J.$$

- 24 a) Na situação de regime permanente, $U = E = 20 \text{ V}$.

$$b) W = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{30 \cdot 10^{-3} \cdot 400}{2} \Rightarrow W = 6 \text{ J}$$

Retomando

- 25 O para-raios se fundamenta na indução eletrostática e no poder das pontas.

Alternativa e.

26 I. $E = \frac{6 \cdot 10^9}{1600} \Rightarrow E = 3,75 \cdot 10^6 \text{ V/m (SIM)}$

II. $E = \frac{4,2 \cdot 10^9}{2200} \Rightarrow E = 1,9 \cdot 10^6 \text{ V/m (NÃO)}$

III. $E = \frac{2,4 \cdot 10^9}{1200} \Rightarrow E = 2 \cdot 10^6 \text{ V/m (NÃO)}$

IV. $E = \frac{3,6 \cdot 10^9}{900} \Rightarrow E = 4 \cdot 10^6 \text{ V/m (SIM)}$

Alternativa a.

27 $W = \frac{C \cdot U^2}{2} \Rightarrow W = \frac{10^{-4} \cdot 60^2}{2} \Rightarrow W = 0,18 \text{ J}$

Alternativa b.

- 28 I. Verdadeira.

II. Verdadeira.

III. Verdadeira.

IV. Falsa. (O vidro é isolante.)

Alternativa b.

CAPÍTULO 6 – Campos e forças de natureza magnética

Neste capítulo, apresentamos os campos magnéticos criados por ímãs e por correntes elétricas, bem como sua ação sobre cargas elétricas em movimento e sobre condutores atravessados por correntes elétricas.

Há uma dificuldade natural nesta exposição, em razão da natureza tridimensional dos fenômenos a serem estudados, o que requer visão espacial para o bom entendimento das explicações.

Por essa razão, aconselhamos que você construa **triedros triortogonais** com palitos de sorvete e os distribua aos alunos. Essa talvez seja uma maneira divertida de desenvolver as competências relativas às representações espaciais, habituando-os aos eixos e planos necessários para as representações de campos e forças.

Alguns conceitos simples de geometria espacial são necessários: retas ortogonais, perpendicularismo entre retas e planos, e

teorema das três perpendiculares podem ser revistos sem formalismo axiomático, mas com visualização.

1. Campos magnéticos criados por ímãs

Pode ser interessante iniciar o capítulo falando de ímãs e bússolas. Um aspecto que pode ser bem explorado em uma atividade multidisciplinar (Física, Geografia e História) é a importância da bússola na História da humanidade.

O livro *Bússola: a invenção que mudou o mundo*, escrito por Amir D. Ackzel, da Editora Zahar (2002), pode ser recomendado para leitura. Os alunos, divididos em equipes, podem elaborar resenhas dos capítulos e explorar os diversos aspectos apresentados.

Você pode convidar o aluno a observar o espaço físico ao redor para interpretar experiências cotidianas relacionadas às bússolas e ao campo magnético da Terra.

Trabalho em equipe

Nesta seção, é proposta a construção de uma bússola. Pode ser organizada uma pequena exposição dos resultados.

Sugerimos que você leve para a sala de aula pequenos ímãs, bússolas e limalha de ferro para fazer as experiências possíveis, com simplicidade.

Talvez seja um momento interessante para desenvolver o entendimento do conceito de modelo: um fenômeno cotidiano, interpretado de maneira científica, colaborou para as grandes navegações, fato de relevância histórica e geopolítica.

Os pontos teóricos adicionais, discutidos no livro, podem, então, ser apresentados com naturalidade.

O conhecimento de senso comum sobre polos de ímãs e a construção de bússolas podem ser utilizados de maneira efetiva para a explicação dos fenômenos. Explique que pequenos ímãs, limalha de ferro e bússolas podem funcionar como corpos de prova para a constatação da existência dos campos magnéticos.

2. Campos magnéticos criados por correntes elétricas

Física tem História

Sugerimos que este tópico seja iniciado pela análise da experiência de Ørsted. Como se trata de uma experiência simples, basta uma bateria, uma chave, um fio e um ímã. Ela pode ser feita em caráter de demonstração por você ou por equipes de alunos em local adequado.

1. Sim. O campo magnético criado por uma corrente tem direção ortogonal ao condutor responsável pela corrente.
2. Sim, uma vez que esse formato altera distâncias e direções.

Em seguida, o ponto a ser discutido é a conclusão a respeito da experiência que, em última análise, é: “correntes elétricas produzem campos magnéticos”.

Deste ponto em diante, acreditamos que há duas opções de trabalho, de acordo com as disponibilidades de tempo de cada turma.

A primeira delas é apresentar, de maneira global, os aspectos qualitativos dos campos magnéticos criados por espiras, fios e solenoides. Isto é, mostrar que, de maneira geral, os campos magnéticos são representados por vetores ortogonais às correntes que os criam, com sentido dado pela regra da mão direita.

A segunda opção é fazer uma análise separada dos três dispositivos: fio reto, espira circular e solenoide. Explicar detalhadamente a intensidade, direção e sentido do campo criado, em cada caso.

Qualquer que seja a opção adotada, espera-se que o aluno assimile que o campo magnético criado por uma corrente elétrica, em um dado ponto, depende da intensidade dessa corrente e do formato geométrico do condutor que lhe dá suporte.

Isto é, espera-se que o aluno desenvolva suas habilidades de interpretação e expressão dos fenômenos magnéticos em linguagem física.

Física explica

O texto “O magnetismo das moscas” pode ser usado para atividade de pesquisa em equipe e pretende desenvolver as competências de contextualização da Física com as outras ciências.

Respostas das atividades:

1. Alternativa d.
2. Alternativa b.

3. Forças magnéticas sobre cargas elétricas

O conhecimento das funções trigonométricas (seno e cosseno), para ângulos compreendidos entre 0 e 180° é necessário para o bom entendimento das características da força magnética sobre cargas em movimento e sobre condutores.

Recordar esse ponto pode ser útil, aproveitando um momento da aula ou por meio de uma atividade a ser realizada pelo aluno, individualmente.

A argumentação relativa à força magnética pode citar o princípio da ação e reação: cargas em repouso não geram campos magnéticos e, portanto, não produzem forças magnéticas. Se não produzem, não sofrem forças de natureza magnética.

Esse raciocínio pode ser interessante para desenvolver no aluno a competência relativa à integração dos diversos capítulos da Física e ressaltar o fato de que a força de natureza magnética aparece quando corpos eletrizados movimentam-se nos campos magnéticos.

Talvez por isso a força magnética tenha sido a última a ser compreendida na Física clássica, uma vez que sua observação depende de cuidadosos experimentos de laboratório.

As características da força magnética (intensidade, direção e sentido) podem ser apresentadas, e o uso do triedro com palitos de sorvete pode ser útil para o desenvolvimento da visão espacial dos alunos.

4. Movimentos de cargas em campos magnéticos uniformes

O tópico pode ser iniciado com uma pequena revisão da dinâmica dos movimentos retilíneos e curvilíneos e do relacionamento entre as acelerações dos movimentos circulares com as grandezas periódicas.

Acreditamos que essa recordação é mais produtiva se feita em aula, por meio de perguntas:

- Que tipo de movimento executa uma partícula se a resultante das forças é nula?
- O movimento circular uniforme tem aceleração?
- Como se expressa o período de um movimento circular uniforme?

Uma abordagem para o problema do lançamento de cargas em campos magnéticos pode ser global e integrada, considerando os três ângulos de lançamento e explicando qualitativamente os movimentos possíveis.

Essa abordagem pode ser complementada com os aspectos quantitativos dos movimentos, nos casos circulares e helicoidais.

5. Força magnética sobre condutores

O tópico final deste capítulo é relativamente curto, embora seja de grande importância, pois trata do princípio básico da construção de um motor elétrico.

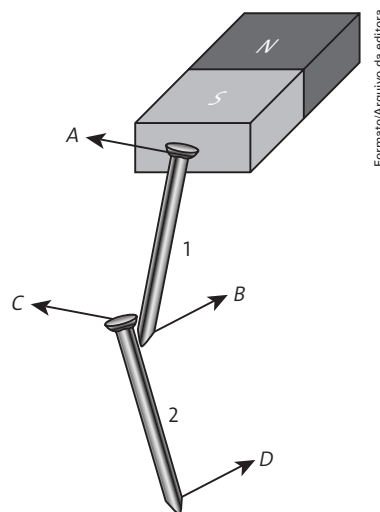
O raciocínio dedutivo pode ser obtido a partir da força magnética sobre uma carga em movimento (microscópica), ampliando o raciocínio para a força magnética sobre um fio reto (macroscópica), como explicado no Livro do Aluno.

Em construção

Neste capítulo prestamos a nossa homenagem ao físico dinamarquês Hans Christian Oersted. Você pode recomendar aos alunos uma pesquisa nos meios de informação para contextualizar seus trabalhos na história e verificar como suas contribuições influenciaram na vida em sociedade. Os resultados da pesquisa podem ser apresentados na forma de seminário ou de pôster.

Atividades complementares

1. (UFPA) Na figura, um ímã natural, cujos polos magnéticos norte, N, e sul, S, estão representados, equilibra dois pregos, 1 e 2. Os pontos A e B pertencem a 1 e os pontos C e D pertencem a 2.



Nessa situação:

- a) B e C são polos norte.
- b) A é um polo norte e D um polo sul.
- c) A e D são polos sul.
- d) A é um polo sul e B um polo norte.
- e) B é um polo sul e D um polo norte.

Resolução:

Alternativa b.

Formato/Arquivo da editora

2. (UFSM-RS) Considere as afirmações a seguir, a respeito de ímãs.
- Convencionou-se que o polo norte de um ímã é aquela extremidade que, quando o ímã pode girar livremente, aponta para o norte geográfico da Terra.
 - Polos magnéticos de mesmo nome se repelem e polos magnéticos de nomes contrários se atraem.
 - Quando se quebra ao meio um ímã em forma de barra, obtêm-se dois novos ímãs, cada um com apenas um polo magnético.

Está(ão) correta(s):

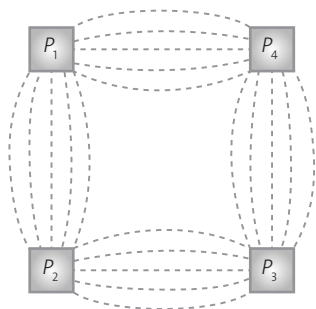
- apenas I.
- apenas II.
- apenas III.
- apenas I e II.
- apenas II e III.

Resolução:

III. Incorreto. Obtêm-se dois novos ímãs com polos norte e sul.

Alternativa **d**.

3. (UFU-MG) A figura mostra os polos (P_1 , P_2 , P_3 e P_4) de dois ímãs (tipo ferradura) e o esboço de suas linhas de indução magnética.



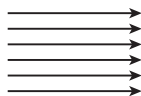
Se o polo P_1 é um polo Norte, as polaridades dos polos P_2 , P_3 e P_4 são respectivamente:

- Norte, Norte e Sul.
- Sul, Norte e Sul.
- Sul, Sul e Norte.
- Norte, Sul e Norte.
- Norte, Sul e Sul.

Resolução:

Alternativa **b**.

4. (Uerj) As linhas de indução de um campo magnético uniforme são mostradas abaixo.



Designado por N o polo norte e por S o polo sul de um ímã colocado no mesmo plano da figura, é possível concluir que o ímã permanecerá em repouso se estiver na posição:

-
-
-

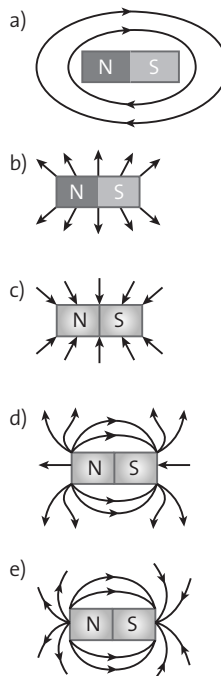


Resolução:

O polo norte se orientará com o mesmo sentido das linhas de campo.

Alternativa **a**.

5. (UFF-RJ) Assinale a opção em que as linhas de indução do campo magnético de um ímã estão mais bem representadas.



Resolução:

As linhas de indução magnéticas estão mais bem representadas na alternativa **e**, na qual saem do polo norte e chegam ao polo sul do ímã.

Alternativa **e**.

6. (Ufop-MG) Uma agulha magnética (bússola) se orienta numa direção preferencial sobre a superfície da Terra. Na tentativa de explicar tal fenômeno, o cientista inglês W. Gilbert apresentou a seguinte ideia:

“[...] a orientação da agulha magnética se deve ao fato de a Terra se comportar como um grande ímã. Segundo Gilbert, o polo norte geográfico da Terra seria também um polo magnético que atrai a extremidade norte da agulha magnética”.

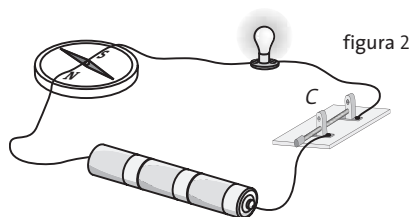
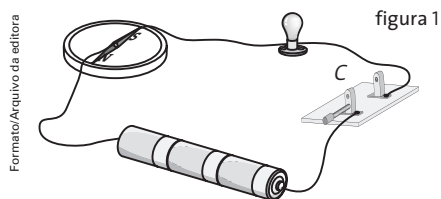
Em vista da explicação apresentada, é correto afirmar que as linhas de indução do campo magnético da Terra se orientam externamente no sentido:

- leste-oeste.
- sul-norte.
- oeste-leste.
- norte-sul.
- para o centro da Terra.

Resolução:

Alternativa **d**.

7. (PUC-SP) Na experiência de Oersted, o fio de um circuito passa sobre a agulha de uma bússola. Com a chave *C* aberta a agulha alinha-se como mostra a figura 1. Fechando-se a chave *C*, a agulha da bússola assume nova posição (figura 2).



A partir desse experimento, Oersted concluiu que a corrente elétrica estabelecida no circuito:

- gerou um campo elétrico numa direção perpendicular à da corrente.
- gerou um campo magnético numa direção perpendicular à da corrente.
- gerou um campo elétrico numa direção paralela à da corrente.
- gerou um campo magnético numa direção paralela à da corrente.
- não interfere na nova posição assumida pela agulha da bússola que foi causada pela energia térmica produzida pela lâmpada.

Resolução:

A corrente elétrica estabelecida no circuito em questão cria um campo magnético ortogonal à corrente.

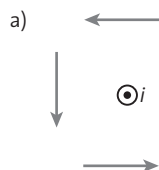
Alternativa **b**.

8. (Fuvest-SP) A figura indica quatro bússolas que se encontram próximas a um fio condutor, percorrido por uma intensa corrente elétrica.



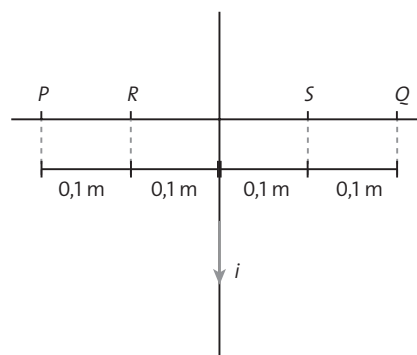
- Represente, na figura, a posição do condutor e o sentido da corrente.
- Caso a corrente cesse de fluir, qual será a configuração das bússolas? Faça a figura correspondente.

Resolução:



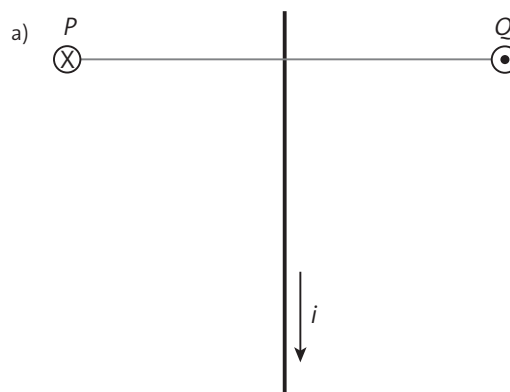
- Orientar-se-iam conforme o campo magnético terrestre indicado na figura do enunciado.

9. (Ufop-MG) Um fio retilíneo transporta uma corrente *i* com o sentido indicado na figura abaixo.



- Indique na figura a direção e o sentido do campo magnético criado pela corrente nos pontos *P* e *Q*.
- Se o módulo do campo magnético nos pontos *P* e *Q* é $B = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ T}$, qual é o módulo, a direção e o sentido do campo magnético nos pontos *R* e *S*?

Resolução:



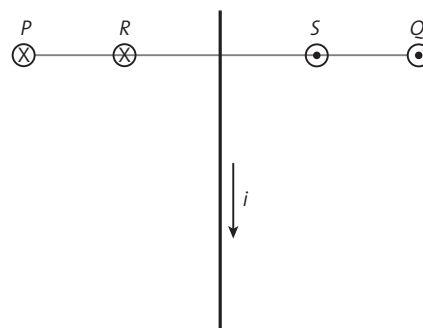
$$b) B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \Rightarrow B \cdot r = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \Rightarrow 5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2 = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\mu_0 i}{2\pi} = 1 \cdot 10^{-4} \rightarrow \text{constante para a situação dada}$$

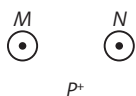
Como os pontos *R* e *S* estão à mesma distância do fio condutor, os campos magnéticos têm mesmo módulo.

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{0,1} \Rightarrow B = 1 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

Direção e sentido, indicados na figura.



10. (UFMG) Esta figura mostra dois fios, M e N , paralelos, percorridos por correntes de mesma intensidade, ambas saindo da folha de papel. O ponto P está à mesma distância dos dois fios.

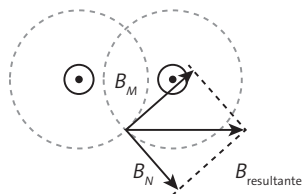


A opção que melhor representa a direção e o sentido corretos para o campo magnético que as correntes criam em P é:

- a) b) c) d)

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

Resolução:

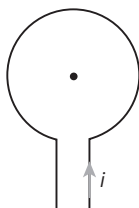


Conforme a figura, o campo magnético criado pelos fios M e N cria um campo horizontal e para a direita.

Alternativa **b**.

11. (Unicube-MG) Uma espira circular de raio 10 cm, conforme a figura, é percorrida por uma corrente de intensidade 6 A. Considerando-se $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, as características do vetor indução magnética no centro da espira são:

- a) $1,2 \cdot \pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$; $\otimes$
 b) $1,2 \cdot \pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$; $\odot$
 c) $1,2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$; $\odot$
 d) $1,2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$; $\otimes$
 e) $1,2 \cdot \pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$; $\odot$



Resolução:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 6}{2 \cdot 0,1} \Rightarrow B = 1,2 \cdot \pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

Lembrando-se da regra da mão direita, o vetor campo de indução magnética no centro da espira está saindo do plano do papel.

Alternativa **b**.

12. (UEL-PR) Uma partícula com carga elétrica $1 \mu\text{C}$ penetra num campo magnético de 5 T, com velocidade de

$2 \cdot 10^4 \text{ m/s}$, perpendicular ao campo de indução magnética. A partícula descreverá uma trajetória circular, ficando sujeita a uma força magnética de módulo:

- a) $1 \cdot 10^{-1} \text{ N}$
 b) $1 \cdot 10^{-2} \text{ N}$
 c) $1 \cdot 10^{-3} \text{ N}$
 d) $1 \cdot 10^{-4} \text{ N}$
 e) $1 \cdot 10^{-5} \text{ N}$

Resolução:

$$F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta = 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow F_m = 1 \cdot 10^{-1} \text{ N}$$

Alternativa **a**.

13. (UFMS) Uma partícula eletricamente carregada e com uma energia cinética K , ao incidir perpendicularmente sobre um campo magnético uniforme, sofre a ação de uma força magnética de intensidade F , descrevendo uma circunferência de raio R . É correto afirmar que:

- a) a força magnética terá a mesma direção do campo magnético.
 b) a força magnética fará com que a energia cinética da partícula aumente.
 c) $R \cdot F = 2 \cdot K$
 d) o trabalho da força magnética será negativo.
 e) $F = 0$

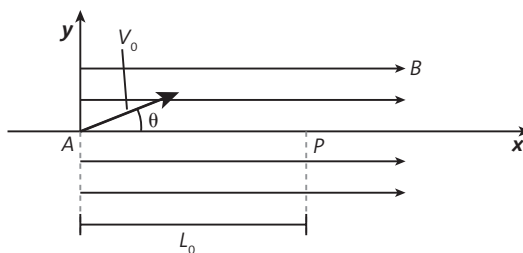
Resolução:

Considerando que a força magnética seja a resultante centrípeta, temos:

$$F_m = R_c \Rightarrow F_m = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow F_m \cdot R = mv^2 \Rightarrow F_m \cdot R = \frac{2}{2} m \cdot v^2 \Rightarrow R \cdot F = 2 \cdot K$$

Alternativa **c**.

14. (Fuvest-SP) Um próton de massa $M = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, com carga elétrica $Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, é lançado em A, com velocidade v_0 , em uma região onde atua um campo magnético uniforme B , na direção x . A velocidade v_0 , que forma um ângulo θ com o eixo x , tem componentes $v_{0x} = 4,0 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ e $v_{0y} = 3,0 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. O próton descreve um movimento em forma de hélice, voltando a cruzar o eixo x , em P , com a mesma velocidade inicial, a uma distância $L_0 = 12 \text{ m}$ do ponto A.



Desconsiderando a ação do campo gravitacional e utilizando $\pi = 3$, determine:

- a) o intervalo de tempo Δt , em segundos, que o próton leva para ir de A a P;
 b) o raio R , em metros, do cilindro que contém a trajetória em hélice do próton;
 c) a intensidade do campo magnético B , em tesla, que provoca esse movimento.

Resolução:

- a) Na direção x , o movimento é uniforme, o próton não sofre ação da força magnética.

$$v_{0x} = \frac{L_0}{\Delta t} \Rightarrow 4,0 \cdot 10^6 = \frac{12}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

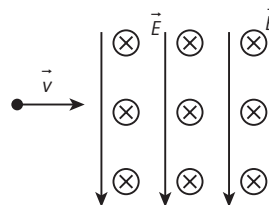
- b) No mesmo intervalo de tempo anteriormente calculado, o próton descreve uma circunferência de raio R , com velocidade v_{0y} :

$$v_{0y} = \frac{2\pi R}{\Delta t} \Rightarrow 3,0 \cdot 10^6 = \frac{2 \cdot 3 \cdot R}{3,0 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow R = 1,5 \text{ m}$$

- c) No movimento circular uniforme a força magnética é centrípeta.

$$F_m = R_c \Rightarrow |Q| \cdot v_{0y} \cdot B = m \cdot v_{0y}^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow B = \frac{m \cdot v_{0y}}{Q \cdot R} = \frac{1,6 \cdot 10^{-27} \cdot 3,0 \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5} \Rightarrow \\ \Rightarrow B = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

15. (UFMG) Um elétron entra com velocidade $\vec{v}$ em uma região onde existem um campo elétrico $\vec{E}$ e um campo magnético $\vec{B}$ uniforme e perpendiculares entre si, como mostra a figura. A velocidade $\vec{v}$ é perpendicular aos dois campos.



O elétron não sofre nenhum desvio ao cruzar a região dos campos. As forças elétricas, $\vec{F}_e$, e magnética, $\vec{F}_m$, que atuam sobre o elétron, nessa situação, são mais bem representadas por:

- a)
- b)
- c)
- d)

Resolução:

A força elétrica no elétron é contrária ao sentido do campo elétrico, ou seja, a força elétrica é vertical e para cima.

Pela regra da mão direita concluímos que a força magnética é vertical e para cima.

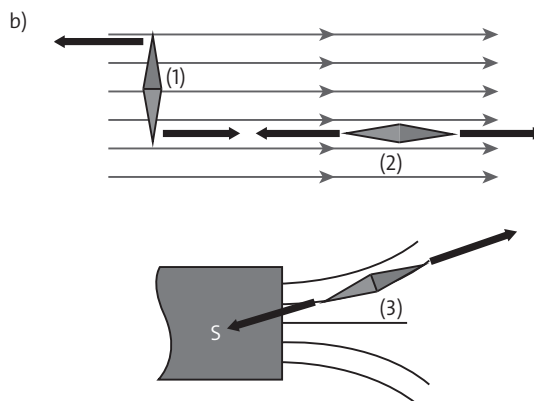
Alternativa a.

Resolução dos exercícios

- 1 a) Pedro poderia pendurar o prego com um fio muito fino, por exemplo, linha de costura, e verificaria que sua ponta (polo norte do prego) apontaria para o norte geográfico da Terra, que corresponde ao sul magnético da Terra.

- b) O prego A está imantado. Caso não ocorresse a atração, somente o prego B estaria imantado ou nenhum dos dois pregos estaria imantado.

- 2 a) A extremidade apresentada é o polo sul. O polo norte da bússola é atraído pelo polo sul do ímã.



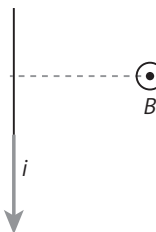
- c) Nas bússolas 1 e 2, pois estão inseridas em campos magnéticos uniformes.

- 3 O campo magnético é mais intenso nas extremidades dos ímãs. Alternativa d.

- 4 Alternativa b.

- 5 Descrição da imagem: as partes serão novos ímãs. Na secção de corte aparecem polos contrários aos das extremidades das partes.

- 6 Direção: perpendicular ao plano do papel. Sentido: Saindo do plano do papel.



Intensidade:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4}{2\pi \cdot 0,5} \Rightarrow B = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

- 7 a) O campo na parte externa de um solenoide é nulo.

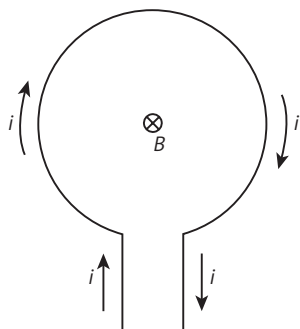
$$b) B_{\text{ext.}} = \frac{n}{L} \cdot \mu_0 \cdot i = \frac{2000}{0,1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10 \Rightarrow B_{\text{ext.}} = 8\pi \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

$$c) B_{\text{int.}} = \frac{n}{L} \cdot \mu_{\text{ferro}} \cdot i = \frac{2000}{0,1} \cdot 100 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10 \Rightarrow B_{\text{int.}} = 8\pi \text{ T}$$

8 Intensidade do vetor campo magnético:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2R} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,5}{2 \cdot 0,02} \Rightarrow B = 5\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

Direção e sentido do vetor campo magnético indicados na figura abaixo.



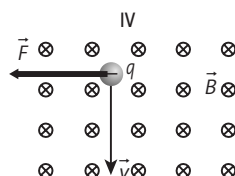
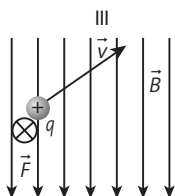
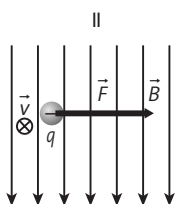
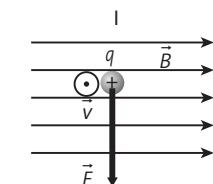
9 Como as correntes têm mesmo sentido, nos pontos equidistantes dos fios, isto é, entre os fios, os campos criados têm mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos. Logo, o campo é nulo nesse ponto.

10 a) $B = \frac{n}{2r} \cdot \mu_0 \cdot i = \frac{1000}{0,1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10 \Rightarrow B = 4\pi \cdot 10^{-2} \text{ T}$

b) $B = \frac{n}{L} \cdot \mu_0 \cdot i = \frac{1000}{1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10 \Rightarrow B = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ T}$

11 Alternativa b.

12



13 Intensidade:

$$F_{mag.} = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin 30^\circ = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,0 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot \frac{1}{2} \Rightarrow F_{mag.} = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ N}$$

Direção: perpendicular ao plano do papel.

Sentido: entrando no plano do papel.

14

Para que o feixe não sofra desvios, a força magnética deve ter a mesma intensidade que a força elétrica.

$$F_{mag.} = F_{el.} \Rightarrow |q| \cdot v \cdot B = |q| \cdot E \Rightarrow v = \frac{E}{B} = \frac{4,0 \cdot 10^3}{2,0 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow v = 2,0 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

15 a) $F_{mag.} = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta \Rightarrow F_{mag.} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 \cdot 2 \cdot \sin 30^\circ \Rightarrow F_{mag.} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ N}$

b) $F_{mag.} = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta \Rightarrow F_{mag.} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 \cdot 2 \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow F_{mag.} = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ N}$

16 Para a força ser nula, o seno deve ser nulo. Logo, o ângulo de lançamento deve ser 0° ou 180° .

17 A velocidade pode ser determinada com o auxílio da energia cinética.

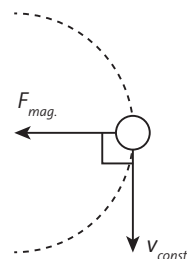
$$E_c = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow 1,6 \cdot 10^{-16} = \frac{8,0 \cdot 10^{-27} \cdot v^2}{2} \Rightarrow v = 2,0 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

A distância de A até B é de duas vezes o raio.

$$\frac{D}{2} = \frac{mv}{|q|B} \Rightarrow \frac{D}{2} = \frac{8,0 \cdot 10^{-27} \cdot 2,0 \cdot 10^5}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,0 \cdot 10^{-1}} \Rightarrow D = 0,01 \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

Alternativa b.

18 O ângulo formado entre a força e o deslocamento é de 90° , portanto o trabalho é zero.



19 Conhecendo a relação entre as grandezas indicadas, temos:

$$r = \frac{mv}{|q|B}$$

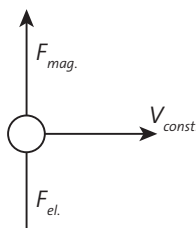
Portanto, a partícula de maior massa é aquela que percorre o maior raio.

20 Para executar um movimento retilíneo e uniforme a somatória das forças sobre a partícula deve ser nula.

$$F_{mag.} = F_{el.}$$

$$|q| \cdot v \cdot B = |q| \cdot E$$

$$v = \frac{E}{B}$$

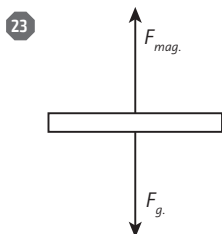


- 21 Para calcular o raio da hélice, devemos obter a componente da velocidade na direção perpendicular ao campo.

$$\text{Neste caso, } v' = v \cdot \sin 30^\circ = v \cdot \cos 30^\circ = \frac{v}{2}.$$

$$\text{Logo, o raio da hélice será: } R = \frac{mv}{2qB}.$$

- 22 $F_{mag.} = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta \Rightarrow F_{mag.} = 0,5 \cdot 3 \cdot 0,02 \cdot \sin 30^\circ \Rightarrow$
 $\Rightarrow F_{mag.} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$



Intensidade:

$$F_{mag.} = F_g.$$

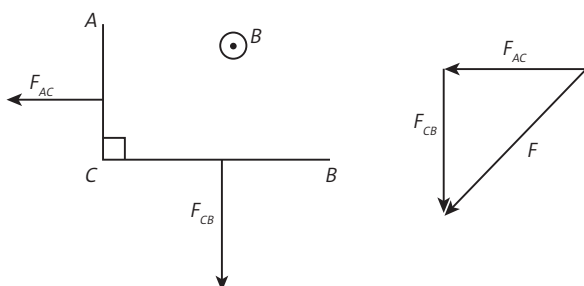
$$B \cdot i \cdot L = P$$

$$2 \cdot i \cdot 0,6 = 6$$

$$i = 5 \text{ A}$$

Sentido: da esquerda para a direita (regra da mão direita).

- 24 As forças podem ser representadas da seguinte forma:



$$F_{AC} = 0,5 \cdot 2 \cdot 3 \Rightarrow F_{AC} = 3 \text{ N}$$

$$F_{CB} = 0,5 \cdot 2 \cdot 4 \Rightarrow F_{CB} = 4 \text{ N}$$

$$F = 5 \text{ N}$$

Alternativa a.

- 25 $F_{mag.} = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta$

$$F_{mag.} = 0,5 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot \sin 0^\circ \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{mag.} = 0 \text{ N}$$

- 26 $B \cdot i \cdot L = m \cdot g \Rightarrow i = \frac{mg}{BL}$

- 27 Alternativa b.

Retomando

- 28 Alternativa c.

Observação: a placa de alumínio é fracamente atraída e o fio de cobre é repelido.

- 29 Pela regra da mão direita, o campo magnético criado pela corrente opõe-se ao campo criado pela Terra e corresponde ao alinhamento das bússolas como da figura da alternativa d.

- 30 I. **Incorreta.** À esquerda de i_1 os campos individuais têm sentidos opostos e, como $i_1 < i_2$, a maior proximidade do fio 1 implica existir nessa região um ponto em que as intensidades dos campos individuais são iguais. Logo, nesse ponto o campo resultante é nulo.

II. **Correta** (regra da mão direita).

- III. **Incorreta.** À direita de i_2 os campos individuais têm sentidos opostos e, como $i_1 < i_2$, a maior proximidade do fio 2 implica não existir nessa região um ponto em que as intensidades dos campos individuais são iguais.

- IV. **Incorreta.** Esse ponto é entre os fios e, portanto, os campos individuais têm mesmo sentido.

Alternativa d.

- 31 I. **Incorreta.** Trata-se do sul magnético (linhas de campo entrando).

- II. **Incorreta.** O polegar apontará na direção de um paralelo (rotação da Terra).

- III. **Incorreta.** Lançada paralelamente, a força é nula e o desvio também.

- 32 I. **Correta**, pois a força magnética é centrípeta e a velocidade é tangente à trajetória. Pela regra da mão direita, o campo magnético é perpendicular ao plano da figura e aponta para dentro.

- II. **Incorreta.** O campo deve ser perpendicular ao plano da velocidade e da força.

- III. **Correta** (análoga a I).

Alternativa c.

Compreendendo o mundo

- 1 Com a bússola foi possível estabelecer novas rotas comerciais para lugares antes inacessíveis.

- 2 A agulha da bússola, um material magnético, orienta-se no campo magnético da Terra apontando sempre para o norte geográfico.

- 3 A agulha da bússola deve ser feita com um material ferromagnético, ou seja, que sofre influência do campo magnético da Terra.

- 4 A rosa dos ventos permite a identificação de todas as direções, não só o norte e o sul.

- 5 A utilização de bússolas aperfeiçoou o modo como se navegava, promovendo o comércio entre os continentes ("conectou as economias do mundo umas às outras").

- 6 Antes da utilização da bússola magnética, navegadores orientavam-se pelas constelações.

UNIDADE 3 – Fenômenos eletromagnéticos e a sociedade moderna

CAPÍTULO 7 – Indução eletromagnética

Neste capítulo, estudamos o fenômeno da indução eletromagnética, responsável pelo progresso tecnológico experimentado pela humanidade, pois transformou a tarefa de distribuição de energia e de informação em algo quase corriqueiro para o mundo contemporâneo. Sugerimos trabalhar a imagem de abertura de capítulo sobre o tema geração de energia, questionando: Como o movimento da turbina gera eletricidade? O funcionamento da turbina de uma usina elétrica pode ser um bom início para o trabalho com o eletromagnetismo.

A descoberta do fenômeno da indução eletromagnética por Faraday permitiu a construção dos chamados geradores. A formalização, a partir dessa descoberta, das equações de Maxwell permitiu a descoberta das ondas eletromagnéticas, essenciais para as comunicações no mundo atual.

1. Faraday e a indução eletromagnética

Física explica

Acreditamos que um elemento motivador para este assunto é a leitura do texto desta seção, que destaca alguns aspectos importantes da vida de Faraday: sua origem humilde, sua educação quase autodidata e sua extrema habilidade experimental.

Essas qualidades, aliadas ao conhecimento teórico de Maxwell, levaram a um desenvolvimento tecnológico extraordinário. Os questionamentos subjacentes às equações de Maxwell permitiram o desenvolvimento da teoria da relatividade.

Por essas razões, você pode sugerir trabalhos em equipe, em conjunto com o professor de História, sobre esses acontecimentos e sobre as vidas de Faraday e Maxwell, que podem ser apresentados na forma de pôster ou de seminários.

Exemplo de resposta para a questão apresentada na seção:

- A segunda Revolução Industrial implicou o aparecimento de operações automatizadas nos ambientes industriais e o advento da energia elétrica proporcionou instalações de trabalho mais limpas e seguras.

Assim, as melhores condições da vida doméstica aumentaram as possibilidades de lazer familiar.

Jornadas de trabalho foram reduzidas, mas a contrapartida é a necessidade crescente de qualificação e atualização constante dos trabalhadores.

Um desenvolvimento possível para a discussão dos tópicos tem como base a descrição simplificada dos experimentos realizados por Faraday em seu laboratório. Para o entendimento das ideias desenvolvidas nos experimentos, os conceitos de *ddp* e de corrente, vistos em capítulos anteriores, podem ser revisados.

Tratando-se do fenômeno propriamente dito, a metodologia pode partir da descrição dos experimentos realizados por Faraday (descritos no Livro do Aluno), quando da formulação do fenômeno da indução eletromagnética. Esses experimentos podem ser feitos em sala de aula com fios e ímãs, desde que você disponha de um amperímetro ou voltímetro de boa sensibilidade.

Assim, podemos dizer que, toda vez que um dado circuito estiver imerso em um campo magnético, que a partir de agora chamaremos de campo original (*B_{orig}*), o aparecimento de corrente elétrica induzida (circuito fechado) ou de *ddp* induzida (circuito aberto) ocorre em três situações diferentes:

- o campo original varia com o tempo;
- a área do circuito, exposta ao campo original, varia com o tempo;
- o ângulo formado entre o campo original e o circuito varia com o tempo.

É importante ressaltar que o campo original pode ter sido criado por um ímã ou por uma corrente elétrica.

Um fato histórico importante é que os experimentos de Faraday pareciam, inicialmente, confusos e de pouca utilidade. Coube a Maxwell colocar os experimentos em um modelo teórico coerente que, para ser entendido, requer conhecimento das funções trigonométricas (seno e cosseno), para ângulos compreendidos entre 0° e 180°, pois utiliza conceito de fluxo, inspirado na ideia de movimentos de fluidos.

Assim, o diagrama em blocos da figura 7.8 busca integrar e resumir o fenômeno da indução eletromagnética, dadas suas múltiplas facetas e a genial generalização proposta por Maxwell. Segui-lo é desenvolver a importante habilidade de expressar fenômenos físicos em linguagem esquemática, integrando os conhecimentos discutidos.

2. Lei de Lenz

O passo seguinte é o conceito de variação de fluxo e a lei de Lenz. A sequência de raciocínios, que envolve ora grandezas escalares, ora vetoriais, e o conceito de “compensar a variação” podem ser difíceis em uma primeira abordagem.

Em seguida, essa ideia pode ser retomada e trabalhada com o exemplo de um ímã se aproximando ou se afastando de uma espira. Você pode ressaltar que as duas ideias fundamentais são as de campo original e de campo induzido.

A verificação de como o **fluxo** do campo original varia (aumenta ou diminui) leva à conclusão do sentido do campo induzido (oposto ao original ou no sentido original). A regra da mão direita finaliza o raciocínio e relaciona o campo induzido com a possível corrente induzida. A sistematização proposta no diagrama em blocos da aplicação da lei de Lenz pode ser proveitosa. Segui-lo é desenvolver a importante habilidade de expressar fenômenos físicos em linguagem esquemática e integrar os conhecimentos discutidos.

3. Força eletromotriz induzida

Este é o tópico que integra as ideias aqui desenvolvidas: fenômeno da indução, causas e expressão quantitativa. Acreditamos que seja um bom momento para desenvolver as competências de estabelecer relações entre grandezas físicas, leis que regem fenômenos e suas expressões matemáticas.

Há várias maneiras diferentes de falar sobre a lei de Faraday-Neumann e o artigo “A indução eletromagnética: análise conceitual e fenomenológica”, de R. T. da Silva e H. B. Carvalho, publicado pela *Revista Brasileira de Ensino de Física*, disponível em: <www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/344314.pdf> (acesso em: abr. 2016), pode enriquecer seu trabalho.

Entretanto, optamos pela abordagem mais simples para tratar do exemplo do condutor retilíneo.

Complementando, o diagrama em blocos da figura 7.10 expõe diversos aspectos do fenômeno da indução eletromagnética. Segui-lo ajuda a desenvolver a importante habilidade de expressar fenômenos físicos em linguagem esquemática e integrar os conhecimentos discutidos.

4. Gerador de corrente alternada

Uma vez compreendidos os experimentos de Faraday e as ideias expressas pela lei de Faraday-Neumann, uma pergunta a ser feita é: Como é possível converter os diversos tipos de energia em energia elétrica?

O entendimento de como “movimento” pode se converter em “*ddp*” pode ser utilizado para mostrar o modelo mundial de distribuição de energia. Os diversos tipos de energia convertem-se em elétrica a partir do movimento de peças em campos magnéticos.

Aparece, então, o gerador de corrente alternada, cujo entendimento requer a capacidade de formular a variação temporal do ângulo de fase em um movimento circular uniforme (habilidade de expressar uma lei física matematicamente).

Esses movimentos geram as *fem* induzidas que são adequadamente aplicadas aos circuitos de distribuição de energia, conforme discutido no texto de abertura do capítulo, que pode ser retomado por você.

Para refletir

Uma vez deduzida a expressão da *fem* para um gerador de corrente alternada, a pergunta desta seção pode ser objeto de uma atividade individual ou em equipe. A seguir, a resposta sugerida.

- Pela facilidade de obtenção de correntes alternadas a partir da energia mecânica ou térmica, que produzem movimentação de peças em campos magnéticos.

Física explica

Este item (usinas elétricas) pode ser utilizado de várias maneiras: simples leitura, discussão em classe, trabalho em equipe e preparação de seminários.

- A resposta da atividade dessa seção encontra-se nos itens do próprio texto.

5. Transformadores

Aparece, então, uma pergunta natural: Como transportar a energia dos centros de geração aos centros de consumo? Um modelo simplificado pode ser apresentado, acompanhado da necessidade natural de aumentar e diminuir tensões alternadas.

Para essa tarefa, o transformador, cujo funcionamento se explica pela proporcionalidade entre o fluxo concatenado e o número de espiras, completa o raciocínio iniciado no Capítulo 1:

- como os eletrodomésticos usam energia elétrica (Capítulo 1);
- como a energia elétrica é distribuída entre eles em uma residência (Capítulo 2);
- qual a procedência da energia elétrica (Capítulo 3);
- como a força elétrica atua à distância (Capítulo 4);
- como a energia elétrica pode ser armazenada (Capítulo 5);
- como correntes elétricas movimentam corpos (Capítulo 6);
- como funcionam os geradores e como a energia elétrica é distribuída (Capítulo 7).

Aqui cabe a explicação do modelo que os engenheiros chamam de GTD (Geração – Transmissão – Distribuição) de energia e a consequente necessidade dos transformadores.

Ao deduzir as relações de transformação (tensões e correntes) entre primária e secundária (número de espiras), é importante notar que os transformadores alteram tensões e correntes e conservam a potência (energia).

Em construção

Neste capítulo prestamos a nossa homenagem ao cientista inglês Michael Faraday, cujo trabalho foi decisivo para a Física e para a Química. Você pode recomendar aos alunos uma pesquisa nos meios de informação para contextualizar os trabalhos de Faraday na História e verificar como suas contribuições influenciaram na vida em sociedade. Os resultados da pesquisa podem ser apresentados na forma de seminário ou de pôster.

Experimento

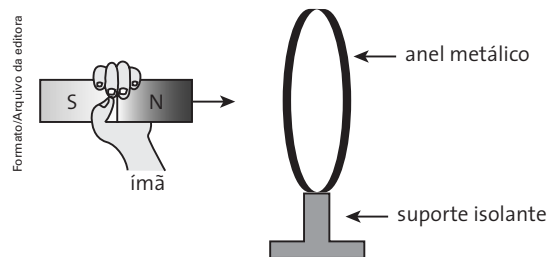
O tópico apresenta a construção de uma usina hidrelétrica, em escala reduzida. A tarefa não é simples, mas os alunos podem ser divididos em equipes e trabalhar com o intuito de apresentar o resultado em uma pequena exposição.

A seguir, as respostas sugeridas para as questões apresentadas na seção.

1. O ímã permanente gera um campo magnético. Com o movimento do ímã, há variação do fluxo magnético na bobina, gerando tensão elétrica.
2. Sim, pois isso aumenta a diferença de potencial pelo aumento de velocidade de rotação do ímã.

Atividades complementares

1. Aproxima-se um ímã a um anel metálico fixo em um suporte isolante, como mostra a figura. O movimento do ímã, em direção ao anel,



- a) não causa efeitos no anel.
- b) produz corrente alternada no anel.
- c) faz com que o polo sul do ímã vire polo norte e vice-versa.
- d) produz corrente elétrica no anel, causando uma força de atração entre anel e ímã.
- e) produz corrente elétrica no anel, causando uma força de repulsão entre anel e ímã.

Resolução:

A aproximação do ímã provoca uma variação de fluxo magnético através do anel, levando à formação de uma corrente elétrica induzida no anel. De acordo com a lei de Lenz, o vetor campo de indução magnética, em razão da corrente elétrica induzida no anel, terá sentido contrário ao vetor campo de indução magnética, por causa do ímã, produzindo uma repulsão entre o anel e o ímã. Alternativa e.

2. O inglês Michael Faraday (1791-1867) pode ser considerado um dos mais influentes cientistas de todos os tempos, e seus trabalhos científicos ainda hoje têm repercussão na sociedade científico-tecnológica. Um dos mais importantes trabalhos é a lei de indução eletromagnética – lei de Faraday –, que trata de uma situação experimental que envolve o ímã e uma espira. Essa lei pode ser enunciada como: “A força eletromotriz induzida em uma espira fechada é proporcional à variação do fluxo magnético que a atravessa e inversamente proporcional ao intervalo de tempo em que ocorre essa variação”.



Hulton-Deutsch Collection/Corbis/Latinstock

Em relação à lei referida no texto, é correto afirmar que a força eletromotriz induzida na espira:

- a) depende do produto da variação do fluxo magnético através da espira pelo intervalo de tempo.
- b) não depende do movimento relativo entre o ímã e a espira.
- c) depende do movimento relativo entre o ímã e a espira.
- d) não depende da razão entre a variação do fluxo magnético através da espira pelo intervalo de tempo.

Resolução:

Alternativa c.

Resolução dos exercícios

- 1 I. Não há variação de fluxo, pois não variam nem o campo magnético, nem a área da espira nem a posição relativa entre o campo e a espira.
II. Há variação de fluxo, pois, à medida que a espira se afasta do ímã, a intensidade do campo magnético na espira diminui.
III. Há variação de fluxo, pois a área correspondente diminui.
- 2 (1) Há corrente induzida, pois a espira está penetrando no campo e, portanto, o fluxo está aumentando.
(2) Não há corrente induzida, pois a espira está totalmente imersa no campo e o fluxo é constante.
(3) Há corrente induzida, pois a espira está saindo do campo e, portanto, o fluxo está diminuindo.
- 3 a) Há corrente induzida no anel, pois, nessa condição, a espira entra e sai do campo, havendo variação de fluxo.
b) Não haveria corrente induzida, pois não haveria variação de campo, área ou ângulo formado entre o campo e a normal ao plano da espira.
- 4 O fenômeno da indução eletromagnética permitiu que a conversão de energia mecânica em elétrica se tornasse simples de ser implementada, bastando para isso o movimento relativo entre um campo magnético e uma peça condutora.
Esse movimento (energia mecânica) pode ter origens diferentes: térmica, química, nuclear, mecânica de um fluxo de água. Assim, obtém-se energia elétrica de maneira econômica, viabilizando o atendimento das necessidades energéticas do mundo atual.

- 5 O diagrama indica que se deve iniciar observando o fluxo do campo magnético do campo original, que pode ser constante ou variável.
Caso ele seja constante, a *fem* induzida é nula.
Caso ele seja variável, a *fem* induzida é não nula, havendo dois casos a considerar: circuito aberto ou fechado.
Para o circuito aberto, a *fem* se manifesta como uma *ddp*; para o fechado, como uma corrente elétrica.
- 6 Usando a regra da mão direita, o campo (original), criado pelo fio na espira, aponta para dentro do plano da figura.
 - a) Caso a corrente aumente com o tempo, a intensidade do campo original aumentará e, portanto, o fluxo também. Assim, pela lei de Lenz, o sentido do campo induzido deve apontar para fora do plano da figura (oposto ao original). Usando a regra da mão direita, o sentido da corrente na espira será anti-horário.
 - b) Caso a corrente diminua com o tempo, a intensidade do campo original diminuirá e, portanto, o fluxo também. Assim, pela lei de Lenz, o sentido do campo induzido deve apontar para dentro do plano da figura (mesmo do original). Pela regra da mão direita, o sentido da corrente na espira será horário.
- 7 a) Quando o condutor se movimenta no sentido do eixo *y*, o fluxo do campo original aumenta (aumento de área). Logo, o campo induzido deve ter sentido oposto ao original (oposto a *z*). Pela regra da mão direita, o sentido da corrente no condutor será do eixo *x*.
b) Quando o condutor se movimenta no sentido oposto ao eixo *y*, o fluxo do campo original diminui (diminuição de área). Logo, o campo induzido deve ter o sentido do original (eixo *z*). Pela regra da mão direita, o sentido da corrente no condutor será oposto ao eixo *x*.
- 8 a) Quando o campo original não varia, nas condições do problema o fluxo também não varia. Logo, não há *fem* induzida no solenoide.
b) Quando o campo original diminui e o fluxo também. Assim, aparecerá uma *fem* induzida com uma polaridade tal que geraria uma corrente que criaria o campo no sentido do campo original.
c) Quando o campo original aumenta e o fluxo também. Assim, aparecerá uma *fem* induzida com uma polaridade tal que geraria uma corrente que criaria o campo no sentido oposto ao campo original.
- 9 a) O campo original é para dentro da espira (saindo do polo norte) e aumenta (aproximação do ímã). Logo, o campo induzido sai da espira e, pela regra da mão direita, o sentido da corrente induzida é anti-horário. (Situação correta.)
b) O campo original é para dentro da espira (saindo do polo norte) e diminui (afastamento do ímã). Logo, o campo induzido entra na espira e, pela regra da mão direita, o sentido da corrente induzida é horário. (Situação correta.)
c) O campo original é para fora da espira (entrando no polo sul) e aumenta (aproximação do ímã). Logo, o campo induzido entra na espira e, pela regra da mão direita, o sentido da corrente induzida é horário. (Situação incorreta.)

d) O campo original é para fora da espira (entrando no polo sul) e diminui (afastamento do ímã). Logo, o campo induzido sai da espira e, pela regra da mão direita, o sentido da corrente induzida é anti-horário. (Situação correta.)

10 a) $B = 2 \text{ T}, A = \pi R^2 = \pi \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2 = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

$\theta = 60^\circ$ (complementar de 30°).

Logo: $\phi = 2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m}^2$

b) $\mathcal{E} = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{7,8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} = 3,9 \text{ V}$ (A variação do fluxo, em módulo, é igual ao fluxo inicial, pois o fluxo final é zero.)

11 a) Ao dobrar a corrente, dobram os campos e, portanto, dobram os fluxos. Isto é:

Espira quadrada: $\Delta \phi = \phi_f - \phi_i = 4 - 2 = 2 \text{ Wb}$.

Espira circular: $\Delta \phi = \phi_f - \phi_i = 8 - 4 = 4 \text{ Wb}$.

Como a variação do fluxo na espira circular é maior e o intervalo de tempo é o mesmo, a espira circular será percorrida por corrente mais intensa.

b) Pela regra da mão direita, os sentidos dos campos originais são:

- espira quadrada: entrando no plano da página;
- espira circular: saindo do plano da página.

Como o fluxo aumenta, os sentidos dos campos induzidos são opostos aos originais.

Logo:

- espira quadrada: saindo do plano da página;
- espira circular: entrando no plano da página.

Pela regra da mão direita, os sentidos das correntes induzidas são:

- espira quadrada: anti-horário;
- espira circular: horário.

12 Para haver corrente induzida, deve ocorrer variação de fluxo em um circuito fechado.

13 a) (1) A espira está penetrando no campo e, portanto, o fluxo está aumentando.

(2) A espira está totalmente imersa no campo e o fluxo é constante.

(3) A espira está saindo do campo e, portanto, o fluxo está diminuindo.

b) $\mathcal{E} = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B \cdot \int \cdot x}{\Delta t} = B \cdot l \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow$

$\Rightarrow \mathcal{E} = B \cdot l \cdot v = 0,5 \cdot 10 \cdot 10^{-2} \cdot 10$

Logo, $\mathcal{E} = 0,5 \text{ V}$

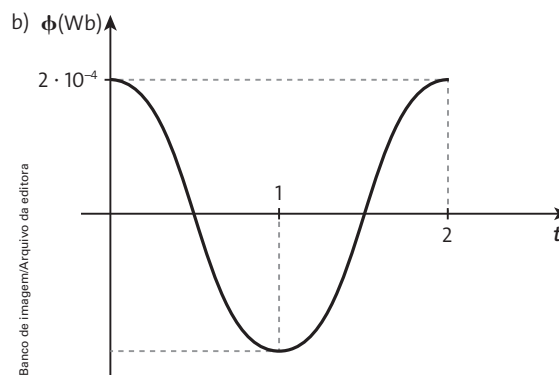
c) Os sentidos são diferentes porque:

(1) Há corrente induzida, pois a espira está penetrando no campo e, portanto, o fluxo está aumentando. Logo, a corrente induzida deve criar campo de sentido oposto ao original.

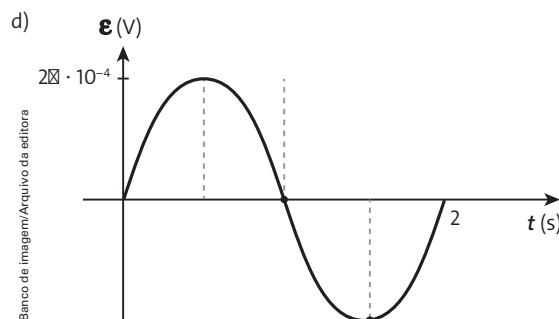
(3) Há corrente induzida, pois a espira está saindo do campo e, portanto, o fluxo está diminuindo. Logo, a corrente induzida deve criar campo no mesmo sentido do original.

14 a) $\phi = B \cdot A \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) = 2 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot \cos(\pi \cdot t) \Rightarrow$

$\Rightarrow \phi = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \cos(\pi \cdot t) \text{ Wb}$



c) $\mathcal{E} = -\omega \cdot B \cdot A \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) \Rightarrow \mathcal{E} = -2 \cdot 10^{-4} \pi \cdot \sin(\pi \cdot t) \text{ (V)}$



15 a) $\omega = 2\pi \cdot f = 120\pi \text{ rad/s}$

Logo: $U = 110 \cdot \sin(120\pi \cdot t) \text{ (V)}$

Como $P = \frac{U^2}{R}$, $R = 110 \Omega$.

Assim, $i = \frac{U}{R} = \sin(120\pi \cdot t) \text{ (A)}$.

b) O tempo entre o “apagar-acender” é muito menor do que o limite de resolução de nossa visão.

16 I. **Incorreta** (o vento movimentava as pás que giram a turbina).

II. **Incorreta**.

III. **Incorreta**.

17 Se a corrente for contínua, não há variação de campo e, portanto, não há variação de fluxo para produzir corrente ou ddp. Como curiosidade: um transformador ligado à corrente contínua funciona como um curto-circuito.

18 N_1 : número de espiras do primário ($U_1 = 138\,000 \text{ V}$);

N_2 : número de espiras do secundário ($U_2 = 380 \text{ V}$);

$\frac{N_1}{N_2} = \frac{138\,000}{380} = 364 \Rightarrow N_1 = 364 \cdot N_2$

19 a) $i_1 = 1 \text{ A}$ e $P_1 = 100 \text{ W}$, logo, $U_1 = 100 \text{ V}$

b) $P_2 = P_1 = 100 \text{ W}$

20 a) Sim, pois é um adaptador projetado para ambas as tensões, segundo suas especificações.

b) A tensão de saída é contínua. Logo, trata-se de um adaptador que possui um retificador.

Retomando

- 21 As três afirmativas estão corretas. A explicação é idêntica à apresentada na solução do exercício 2. Alternativa **e**.
- 22 As cordas de náilon apresentam magnetização desprezível. Alternativa **c**.
- 23
- A melhora das propriedades condutoras dos materiais utilizados nas linhas de transmissão leva a uma diminuição da resistência elétrica destas, o que reduz as perdas de energia e aumenta a eficiência geral.
 - Para uma mesma intensidade luminosa, lâmpadas fluorescentes consomem menos energia elétrica que lâmpadas incandescentes, o que resulta em melhora da eficiência geral.
- Alternativa **e**.
- 24 As ações sugeridas nas alternativas **a**, **b** e **c** afetariam a capacidade de geração da usina.
- Considerando que a alternativa **d** queira expressar: “Melhorar a capacidade dos dutos com vapor de conduzir calor para o ambiente”, essa ação diminuiria o rendimento da usina.
- Portanto, a ação sugerida na alternativa **e** melhoraria o rendimento da usina sem afetar a sua capacidade de geração. Alternativa **e**.
- 25
- a) $\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} \Rightarrow \frac{110}{300} = \frac{U_2}{600} \Rightarrow U_2 = 220 \text{ V}$
- b) $U_1 \cdot i_1 = U_2 \cdot i_2 \Rightarrow 110 \cdot 6 = 220 i_2 \Rightarrow i_2 = 3 \text{ A}$
- c) A tensão no circuito primário desse transformador é sempre a metade da tensão no secundário.
- Portanto, teríamos: $U_1 = 90 \text{ V}$
- 26 Entre 1 s e 2 s: $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{10}{1} \Rightarrow \mathcal{E} = -10 \text{ V}$
- Entre 2 s e 4 s: $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{10}{2} \Rightarrow \mathcal{E} = -5 \text{ V}$
- Entre 4 s e 5 s: $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{0}{1} \Rightarrow \mathcal{E} = 0 \text{ V}$
- Entre 5 s e 6 s: $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{-20}{1} \Rightarrow \mathcal{E} = -20 \text{ V}$
- Alternativa **a**.
- 27 Em Q , o fluxo magnético através da espira aumenta; em R , o fluxo magnético é constante; e, em S , o fluxo magnético diminui. Então a corrente induzida é nula em R (não há variação de fluxo) e possui sentidos opostos em Q e S . Alternativa **a**.

CAPÍTULO 8 – Ondas eletromagnéticas

Uma boa opção para iniciar este capítulo consiste em apresentar um painel em sala de aula com as seguintes notícias e questionar os alunos sobre o que elas apresentam em comum.

1897. *Scientific American* publica imagens obtidas por meio da nova técnica de raios X.

1903. Num promontório árido situado no cabo Breton, Canadá, alguns dias antes do Natal, Guglielmo Marconi trocou mensagens de congratulações, pelo telégrafo sem fio, com algumas cabeças coroadas da Europa.

1910. Numa discussão sobre os sistemas de televisão de Rignoux e Fournier, *Scientific American* especula sobre a transmissão de imagem a distância.

1953. À medida que o céu passou a ser mapeado com detalhes cada vez mais minuciosos, graças aos radiotelescópios de resolução mais alta, ficou claro que as regiões com maiores concentrações de estrelas geram ondas de rádio mais intensas.

2005. Câmera infravermelha, projetada para policiais, é capaz de detectar o calor corporal de fugitivos e caminhan-tes perdidos.

Todas elas se referem às ondas eletromagnéticas, que, ao longo dos anos, têm contribuído para o progresso da ciência e da tecnologia e afetam profundamente a vida das pessoas.

Em seguida, sugerimos um levantamento das principais dúvidas dos alunos em relação ao tema. Para isso, além das três questões propostas no livro, na abertura do capítulo, apresentamos outras questões que devem ser respondidas pelos alunos:

- O que você entende por “espectro eletromagnético”?
- Qual é a característica comum a todas as radiações eletromagnéticas?
- O que diferencia a radiação infravermelha da radiação ultravioleta?
- Cite uma aplicação tecnológica das micro-ondas.
- A luz é uma radiação eletromagnética? E o som?
- Os raios X são prejudiciais à saúde das pessoas?
- Todas as radiações eletromagnéticas possuem a mesma energia?

Certamente, você acrescentará outras questões a essa lista. Solicite aos alunos que guardem suas respostas e no final do capítulo verifiquem quais devem ser modificadas.

1. O espectro eletromagnético

Iniciamos este tópico sobre o espectro eletromagnético, desenvolvimento histórico sobre as ondas eletromagnéticas, que nos remete ao século XIX. Procuramos mostrar a importância de Young, Ørsted e Faraday no trabalho teórico de Maxwell, que culminou na teoria eletromagnética da luz, a previsão das ondas eletromagnéticas e a posterior comprovação experimental de Hertz.

Física tem História

Nesta seção, sugerimos que você solicite a leitura do texto. Em seguida, os alunos podem responder às questões propostas. O objetivo é desenvolver a habilidade de leitura e interpretação de texto. A seguir, sugestões de respostas para as questões.

1. Éter.
2. Utilizaram um interferômetro para comprovar a existência do éter. A não detecção do éter provou que as ondas eletromagnéticas necessitam de um meio para a sua propagação.

É possível produzirmos com as mãos ondas eletromagnéticas do mesmo modo como produzimos ondas mecânicas?

Para responder a essa questão, sugerimos que você utilize o exercício resolvido 1, que mostra em números a inviabilidade de se produzir ondas eletromagnéticas com as mãos, como acontece com as ondas mecânicas.

Na sequência, sugerimos que você comente o espectro eletromagnético e destaque as frequências, comprimentos de onda e velocidade para cada uma das radiações eletromagnéticas.

2. Ondas de rádio

Sempre que possível, devemos citar a história da ciência para discussão da relação entre ciência e tecnologia. Nesse sentido,

antes de iniciar este tópico, sugerimos que você solicite aos alunos a pesquisa que consta na seção **Trabalho em equipe** sobre um brasileiro desconhecido do grande público, o padre Landell de Moura.

Pontos que normalmente atraem a atenção dos alunos são a conversão de ondas sonoras em ondas eletromagnéticas e vice-versa e a discussão sobre as emissoras AM e FM.

Neste tópico, os nossos objetivos visam à compreensão do desenvolvimento histórico da tecnologia e suas consequências para o cotidiano e as relações sociais.

3. Micro-ondas

Para início deste tópico, sugerimos a seguinte questão: O que os celulares têm a ver com o forno micro-ondas?

Os celulares passaram a fazer parte da vida da maioria das pessoas; poucos os associam às micro-ondas. Em relação aos celulares, dois pontos merecem destaque. Primeiro, o número de aparelhos que são habilitados por dia no Brasil; segundo, a substituição de atividades físicas por atividades de jogos e mensagens nos celulares.

Sugerimos que você faça um levantamento, em sala de aula, sobre a quantidade de horas diárias que cada um dedica ao celular e solicite uma pesquisa sobre os possíveis riscos à saúde devido ao uso excessivo do aparelho.

4. Outras ondas eletromagnéticas

Englobamos, neste tópico, a radiação infravermelha e a luz visível. Embora a radiação infravermelha possua frequência próxima à região visível, nós não conseguimos enxergá-la, somente sentir sua presença.

A discussão de cada uma das situações propostas no livro do aluno permitirá que ele amplie seus horizontes de interpretação e possa entender a relação entre ciência e tecnologia e suas implicações no cotidiano.

Em relação à radiação que corresponde à luz visível, sugerimos que você comente brevemente os fenômenos de reflexão e de refração luminosos para, em seguida, discutir a polarização, a difração e a interferência de ondas luminosas.

Julgamos importante destacar que a polarização é um fenômeno que só ocorre com as ondas transversais, como as ondas eletromagnéticas. Assim, o som não é passível de polarização.

5. Radiações e fisiologia

Iniciamos o tópico com a radiação ultravioleta, que tem energia suficiente para provocar queimaduras na pele e esterilizar instrumentos cirúrgicos. É importante conscientizar os alunos da necessidade de protetores solares para exposições prolongadas ao Sol. É possível bronzear a pele sem correr riscos desnecessários.

O desenvolvimento do texto procura estabelecer relações entre os fenômenos no binômio Física/Biologia, no sentido de propiciar aos alunos uma visão sistemática das implicações das radiações ultravioleta no cotidiano das pessoas.

Raios X

A descoberta dos raios X por Röntgen em 1895 pode ser considerada o marco inicial das pesquisas que culminaram com a energia nuclear. Essa descoberta provocou aplicações tecnológicas imediatas, principalmente na medicina, com as radiografias.

Neste tópico, procure enfatizar a utilização dos raios X nos diagnósticos médicos, o que deu à população uma melhor qualidade de vida.

Radioatividade

Trata-se aqui das radiações gama – as radiações mais energéticas do espectro eletromagnético –, com destaque especial para o trabalho do casal Curie, Pierre e Marie. Nesse sentido, sugerimos que você leia o livro *Gênio obsessivo: o mundo interior*, de Marie Curie, da escritora e historiadora Bárbara Goldsmith (Companhia das Letras, 2006), que certamente contribuirá para o desenvolvimento de sua aula.

Embora a radioatividade seja retomada no Capítulo 10 deste volume, julgamos importantes os comentários neste momento em função da estreita relação com os raios X.

Física explica

Nessa seção, destacamos uma aplicação prática da radiação gama na preservação do patrimônio brasileiro. Em relação às duas questões sobre o entendimento do texto, temos:

1. De acordo com o texto, os fungos e as bactérias são os maiores vilões para os livros, documentos e obras de arte.
2. A grande vantagem do uso de radiação gama, em relação aos processos químicos, está relacionada ao período de quarentena, obrigatória no caso de produtos químicos, mas não no caso de radiação gama.

Em construção

Neste tópico, prestamos homenagem ao físico e matemático escocês James Clerk Maxwell, que, além das muitas contribuições à Física e à Matemática, foi o responsável pela teoria eletromagnética da luz, que culminou com a previsão das ondas eletromagnéticas, tema central do capítulo.

Para que os alunos possam compreender a construção do conhecimento físico como um processo histórico, em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de determinada época, sugerimos que você solicite a leitura do livro *Faraday & Maxwell: luz sobre os campos*, de Frederico Firmo de Souza Cruz (Odysseus Editora, 2005), que faz parte da coleção *Imortais da Ciência*, sob a coordenação do físico Marcelo Gleiser.

Atividades complementares

1. (UEFS-BA) Com base em conhecimentos sobre o espectro das radiações eletromagnéticas, a alternativa que apresenta as ondas eletromagnéticas na ordem crescente dos seus comprimentos de onda é a:
 - a) raios γ , raios X e micro-ondas.
 - b) luz visível, ultravioleta e raios X.
 - c) micro-ondas, ultravioleta e raios γ .
 - d) ondas de rádio, luz visível e infravermelho.
 - e) ondas de rádio, infravermelho e ultravioleta.

Resolução:

Os comprimentos de onda das radiações apresentadas nas alternativas, do menor para o maior, obedecem à sequência:

Raios γ – raios X – ultravioleta – luz visível – infravermelho – micro-ondas e ondas de rádio (alternativa a).

2. (IF-SP) Ondas eletromagnéticas só podem ser percebidas pelos nossos olhos quando dentro de determinada faixa de frequência. Fora dela não podem ser vistas, apesar de ainda poderem ser detectadas por outros meios. Numeradas por

I, II e III, são apresentadas algumas características ou aplicações de determinadas ondas eletromagnéticas. Em seguida, estão identificados pelos números de 1 a 5 os nomes usuais de certas radiações.

- I. É emitido por corpos aquecidos e é através deste tipo de radiação que recebemos o calor do Sol. Permite a fabricação de óculos para visão noturna, dentre outras aplicações tecnológicas.
- II. É um fator importante na produção de melanina, o pigmento que bronzeia a pele, mas o excesso de exposição a este tipo de radiação pode provocar câncer de pele.
- III. Produzidos pela rápida desaceleração de elétrons que incidem num alvo metálico, são largamente utilizados em medicina na realização de exames de imagens.

- 1) Ultravioleta
- 2) Micro-ondas
- 3) Infravermelho
- 4) Raios gama
- 5) Raios X

A alternativa que contém os números relacionados aos nomes das radiações correspondentes a I, II e III, nessa ordem é:

- a) 1, 3 e 5.
- b) 2, 5 e 4.
- c) 3, 1 e 5.
- d) 3, 4 e 2.
- e) 2, 1 e 5.

Resolução:

- I. Trata-se da radiação infravermelha.
- II. O texto se refere à radiação ultravioleta.
- III. Trata-se dos raios X.

Alternativa **c**.

3. (Enem) Nossa pele possui células que reagem à incidência de luz ultravioleta e produzem uma substância chamada melanina, responsável pela pigmentação da pele. Pensando em se bronzear, uma garota vestiu um biquíni, acendeu a luz de seu quarto e deitou-se exatamente abaixo da lâmpada incandescente. Após várias horas ela percebeu que não conseguiu resultado algum.

O bronzeamento não ocorreu porque a luz emitida pela lâmpada incandescente é de:

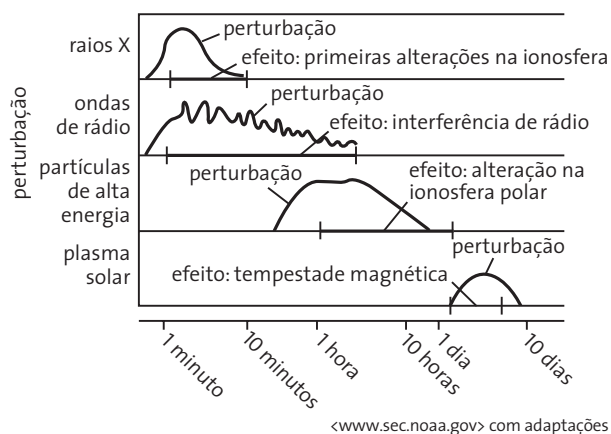
- a) baixa intensidade.
- b) baixa frequência.
- c) um espectro contínuo.
- d) amplitude inadequada.
- e) curto comprimento de onda.

Resolução:

Uma lâmpada incandescente emite principalmente radiação infravermelha e luz visível. Essas radiações, que possuem frequências menores que as das radiações ultravioleta, não contribuem para o bronzeamento da pele. Alternativa **b**.

4. (Enem) Explosões solares emitem radiações eletromagnéticas muito intensas e ejetam, para o espaço, partículas carregadas de alta energia, o que provoca efeitos danosos na Terra.

O gráfico abaixo mostra o tempo transcorrido desde a primeira detecção de uma explosão solar até a chegada dos diferentes tipos de perturbação e seus respectivos efeitos na Terra.

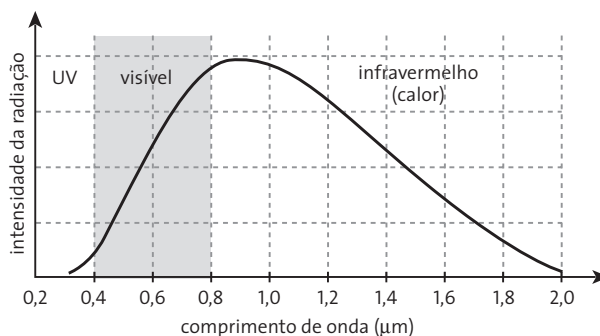


Considerando-se o gráfico, é correto afirmar que a perturbação por ondas de rádio geradas em uma explosão solar:

- a) dura mais que uma tempestade magnética.
- b) chega à Terra dez dias antes do plasma solar.
- c) chega à Terra depois da perturbação por raios X.
- d) tem duração maior que a da perturbação por raios X.
- e) tem duração semelhante à da chegada à Terra de partículas de alta energia.

Resolução:

- a) **Incorreta.** A duração das ondas de rádio é maior que 1h e menor que 10h, enquanto a tempestade magnética tem duração de 10 dias.
 - b) **Incorreta.** A diferença de chegada à Terra é um pouco maior que 1 dia.
 - c) **Incorreta.** As ondas de rádio e os raios chegam praticamente juntos.
 - d) **Correta.**
 - e) **Incorreta.** A duração das ondas de rádio é maior do que a das partículas de alta energia.
5. (Enem) A passagem de uma quantidade adequada de corrente elétrica pelo filamento de uma lâmpada deixa-o incandescente, produzindo luz. O gráfico abaixo mostra como a intensidade da luz emitida pela lâmpada está distribuída no espectro eletromagnético, estendendo-se desde a região do ultravioleta (UV) até a região do infravermelho.

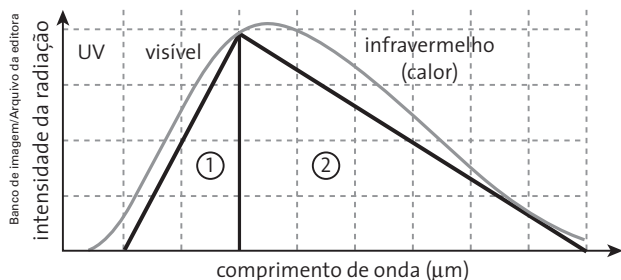


A eficiência luminosa de uma lâmpada pode ser definida como a razão entre a quantidade de energia emitida na forma de luz visível e a quantidade total de energia gasta para o seu funcionamento. Admitindo-se que essas duas quantidades possam ser estimadas, respectivamente, pela área abaixo da parte da curva correspondente à faixa de luz visível e pela área abaixo de toda a curva, a eficiência luminosa dessa lâmpada seria de aproximadamente:

- 10%.
- 15%.
- 25%.
- 50%.
- 75%.

Resolução:

Observe na figura seguinte que a área ① corresponde à parcela da luz visível e a área ② corresponde ao infravermelho. Praticamente não temos emissão de radiação ultravioleta. Como as alturas dos triângulos são iguais, as respectivas áreas são proporcionais às bases. Assim, podemos dizer que a área ② é 3 vezes a área ①, pois a área ② possui uma base constituída por seis unidades de comprimento e a área ① por duas unidades. Nessas condições, a área total, ① + ②, é proporcional a oito unidades de comprimento. Portanto, a relação entre a quantidade de energia emitida na região do visível é $\frac{1}{4}$ ou 25% da quantidade total de energia emitida. Alternativa c.



Resolução dos exercícios

- Dois pontos são importantes: primeiro, todas as ondas eletromagnéticas movimentam-se no vácuo com a velocidade da luz, ou seja, 300 000 km/s ($3 \cdot 10^8$ m/s); segundo, para a sintonização das ondas, a frequência do receptor deve ser igual à frequência da onda. Assim, a frequência é dada por:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$3 \cdot 10^8 = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot f \Rightarrow f = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$$

- As transmissões das duas estações de rádio têm algo em comum: as ondas utilizadas propagam-se com a mesma velocidade. Assim, temos:

$$v = \lambda_A \cdot f_A \text{ e } v = \lambda_B \cdot f_B$$

Dessas relações, concluímos que:

$$\frac{f_A}{f_B} = \frac{\lambda_B}{\lambda_A}$$

$$\frac{f_A}{f_B} = \frac{400}{40} \Rightarrow \frac{f_A}{f_B} = 10$$

Portanto, a frequência da estação A é 10 vezes a frequência da estação B.

- Na mudança do meio de propagação – refração –, a frequência da onda eletromagnética permanece constante, mas sua velocidade e seu comprimento de onda variam. Alternativa d.

- Precisamos comparar os dois intervalos de frequências: emissores AM e emissores FM. A frequência das emissores AM varia de 550 kHz a 1550 kHz e, nas emissores FM, a variação é de 88 MHz (88 000 kHz) a 108 MHz (108 000 kHz). Observe que os dois intervalos são bem distintos, ou seja, não há superposição de frequência. Assim, com o botão na opção AM **não** é possível sintonizar uma emissora FM.

- Lembrando que $v = \lambda \cdot f$ e que a velocidade vale $3 \cdot 10^8$ m/s para todas as ondas eletromagnéticas, o comprimento de onda correspondente à menor e à maior frequência de cada intervalo é dado por:

Emissores AM

$$\lambda_{\text{menor}} = \frac{v}{f_{\text{maior}}} \Rightarrow \lambda_{\text{menor}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1550 \cdot 10^3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda_{\text{menor}} = 193,5 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{maior}} = \frac{v}{f_{\text{menor}}} \Rightarrow \lambda_{\text{maior}} = \frac{3 \cdot 10^8}{550 \cdot 10^3} \Rightarrow \lambda_{\text{maior}} = 545,5 \text{ m}$$

Emissores FM

$$\lambda_{\text{menor}} = \frac{3 \cdot 10^8}{108 \cdot 10^6} \Rightarrow \lambda_{\text{menor}} = 2,8 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{maior}} = \frac{3 \cdot 10^8}{88 \cdot 10^6} \Rightarrow \lambda_{\text{maior}} = 3,4 \text{ m}$$

- Esta questão explora o princípio de funcionamento das rádios AM e FM: a **onda** eletromagnética é modulada pelo sinal de áudio. Assim, a afirmativa é **falsa**, pois as **ondas de rádio são ondas eletromagnéticas**.
- De acordo com o texto, as radiações consideradas ionizantes possuem frequências acima de 10^{15} Hz. E, de acordo com o espectro eletromagnético, as radiofrequências utilizadas na televisão estão localizadas na faixa de frequências de 10^5 a 10^8 Hz. Portanto, essas radiofrequências **não** são ionizantes.
- A função da onda portadora é transmitir o som. Para isso, ela precisa ser modulada pelo sinal de áudio.
 - A onda portadora é uma onda eletromagnética.
- A função do modulador é, como o nome indica, modular a onda eletromagnética (onda portadora) pelo sinal de áudio (onda sonora) para que a transmissão do som possa ocorrer por meio de ondas eletromagnéticas. Nas transmissões AM, a modulação ocorre na amplitude da onda e, nas transmissões FM, a modulação ocorre na frequência da onda.
- No fenômeno da difração é fundamental que o comprimento de onda da radiação seja da ordem da fenda ou do obstáculo. Assim, radiações com comprimentos de onda maiores sofrem mais os efeitos da difração. Por esse motivo, percebemos muito mais facilmente a difração do som do que a da luz. Portanto, como as ondas de rádio possuem comprimentos de onda maiores do que as micro-ondas, com elas (ondas de rádio) é mais fácil demonstrar o fenômeno.

10 Ao colocarmos uma caneca com leite no forno micro-ondas, a radiação interage com as moléculas da água presentes no leite, provocando o seu aquecimento. Materiais não hidratados (que não possuem água), como a caneca, não são aquecidos pela radiação. O pequeno aquecimento da caneca é explicado pelo fato de ela estar em contato com o leite.

11 Nesta questão, a resposta deve ser dada com base nas informações constantes do texto (interpretação do texto). Assim, a alternativa que está de acordo com o texto é: Uma pessoa exposta à radiação micro-ondas poderá sofrer queimaduras internas sem que nenhuma transformação visível possa ser diagnosticada em sua pele.

Alternativa **a**.

12 a) Para uma temperatura de 300 K, a lei de Wien nos fornece:

$$\lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T} \Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{300} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = 9,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Para um comprimento de onda de $9,7 \cdot 10^{-6}$ m, a energia irradiada pela pele humana é máxima.

b) Como o comprimento de onda é da ordem de 10 milionésimos de metro, a radiação é **infravermelha**, pois, de acordo com o espectro eletromagnético, os comprimentos de onda do infravermelho variam de 1 milionésimo de metro a 1 milímetro.

13 a) Para o cálculo aproximado da porcentagem da energia que é emitida na região infravermelha, basta comparar os dois triângulos mostrados na figura. Como os dois possuem a mesma altura, suas áreas são diretamente proporcionais à base. O primeiro triângulo possui área proporcional a 3, e o segundo triângulo, que corresponde ao infravermelho, possui área proporcional a 13. Então, a parcela de infravermelho, em relação ao total é de:

$$\% \text{ de infravermelho} = \frac{13}{13 + 3} \cdot 100\% = 81\%$$

b) Como o restante (19%) é emitido na forma de luz visível, essa lâmpada rende mais como aquecedor.

14 Na primeira figura desta questão, observamos que a luz refletida e que atinge os olhos da pessoa é polarizada horizontalmente. Essa luz é a que caracteriza o brilho das superfícies. Portanto, se você pretende utilizar óculos escuros polarizados, deve optar pelos óculos que apresentam polarização vertical. Dessa forma, eles vão bloquear a luz polarizada e evitar o ofuscamento.

15 A polarização só é possível para ondas transversais como as ondas eletromagnéticas, nas quais a luz se encaixa. Já o som, por ser uma onda longitudinal, não pode ser polarizado.

16 Quando a fenda é grande, como na figura **a**, os efeitos de difração praticamente não existem. Isso provoca uma sombra com os contornos bem definidos. Por outro lado, diminuindo-se o tamanho da fenda, como na figura **b**, os efeitos de difração passam a ser acentuados e os contornos da sombra não são bem definidos, pois o efeito borrado nas bordas aumenta.

17 Das três radiações ultravioleta mostradas na tabela 8.1 do texto, a radiação ultravioleta C é a que apresenta menor comprimento de onda. Quanto menor o comprimento de onda, maior a frequência da radiação e, portanto, maior a energia transportada pela onda. Assim, a **radiação C** é a mais energética.

18 Em virtude de os olhos serem órgãos muito sensíveis à radiação ultravioleta, é aconselhável que as pessoas utilizem óculos protetores quando expostas ao Sol. Devemos lembrar que alguns óculos escuros funcionam simplesmente como estética. É preciso que eles funcionem como bloqueadores de radiação ultravioleta.

19 De acordo com o texto, podemos concluir que se uma pessoa usar um filtro solar com FPS-30, ela poderá ficar exposta ao Sol por um tempo até 30 vezes maior do que se não estivesse usando o protetor. Alternativa **c**.

20 Os procedimentos indicados na questão têm como objetivo produzir um contraste para que os tecidos biológicos sejam destacados na radiografia.

21 Não se pode negar a importância das radiografias nos diagnósticos médicos. Mas elas devem ser usadas com moderação e com uma frequência que permita ao organismo humano se recuperar. Sempre que possível, deve-se utilizar outros meios para diagnóstico. Sugerimos que você convide um médico ou um técnico especializado para uma palestra na escola sobre as formas mais utilizadas de diagnósticos médicos.

22 Um elemento químico radioativo é aquele que espontaneamente emite radiação.

23 Os raios X são produzidos na eletrosfera dos átomos devido à desaceleração brusca de elétrons, e os raios gama são radiações emitidas pelo núcleo dos átomos. Além disso, os raios gama possuem frequência maior que os raios X, portanto, são mais energéticos.

24 Entre 12 h e 14 h, o IUV é acima de 8. Nessas condições, o máximo tempo desprotegido (TPD) é 20 min. Como a pessoa pretende ficar exposta ao Sol (TPP), por 2 h (120 min) temos:

$$\text{FPS} = \frac{\text{TPP}}{\text{TPD}} \Rightarrow \text{FPS} = \frac{120}{20} = 6$$

Alternativa **b**.

25 No filme, na parte escura, houve incidência de radiação e, na parte clara, não, sendo absorvida pelo pescoço. Assim, houve maior absorção de radiação eletromagnética pelos átomos de cálcio do que por outros tipos de átomos. Alternativa **b**.

Retomando

26 O aquecimento é devido à absorção pelos tecidos da orelha de ondas eletromagnéticas emitidas pelo celular. Alternativa **c**.

- 27) Analisando as alternativas, obtemos:
- Incorreta.** O fato de usar filtro solar não isenta uma pessoa de queimaduras.
 - Correta.** Na tabela, estão indicados todos os tipos de pele.
 - Incorreta.**
 - Incorreta.** De acordo com a tabela, as peles morena e amarela estão incluídas no mesmo tipo.
 - Incorreta.**
- Alternativa **b**.
- 28) A opinião do pai está incorreta, pois o filho de 4 anos também precisa de protetor solar. Alternativa **e**.

Compreendendo o mundo

- 1) A luz ultravioleta entre 290 nm e 315 nm (UVB) conjuga duplas pontes de hidrogênio nos carbonos C_5 e C_7 , produzindo vitamina D.
- 2) Além da luz solar é necessário a ingestão de certos alimentos, mas o texto não fornece justificativas para a insuficiência de vitamina D. Assim, um trabalho de pesquisa pode ser bem explorado nesse ponto.
- 3) Com o uso de protetor solar e expondo-se ao Sol entre 7 h e 10 h e entre 14 h e 18 h.
- 4) Diversos estudos recentes têm associado a deficiência da vitamina D a riscos de doenças como hipertensão, gripe ou problemas cardiovasculares.
- 5) Estimule os alunos a pesquisar sobre a produção de vitamina D pelo Sol e, se possível, peça ao professor de Química que auxilie os alunos com as reações.
- 6) Sugerimos como fontes de pesquisa sobre o assunto (acessos em: maio 2016):
Gold Analisa. *Publicações*. Disponível em: <www.goldanalisa.com.br/arquivos/%7BD4F8E4AC-2920-4F00-A518-DA4187B6CCC4%7D_Analisando_2[1].pdf>.
CASTRO, L. C. G. O sistema endocrinológico: vitamina D. In: *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia e Metabologia*, v. 55, n. 8, p. 566-575. 2011. Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-27302011000800010>.

UNIDADE 4 – O muito pequeno e o muito grande

CAPÍTULO 9 – Os pilares da Física moderna

Neste capítulo iniciamos a chamada Física moderna com seus dois pilares: a teoria da relatividade e a Física quântica. Como ponto de partida, sugerimos que você solicite aos alunos a leitura do tópico 1 (A Física no final do século XIX). Eles podem anotar suas dúvidas e responder à pergunta de abertura do capítulo. Esses dados serão importantes para o desenvolvimento de suas aulas.

1. A Física no final do século XIX

Antes de comentar sobre os postulados da teoria da relatividade e suas consequências, sugerimos um destaque para aquele que é considerado um dos maiores físicos do século XX: Albert Einstein. Como na seção **Em construção** apresentamos uma pequena biografia de Einstein, sugerimos que você comente sobre os acontecimentos de 1905, o chamado “ano miraculoso”. Além do texto apresentado na seção **Física tem História**, indicamos três referências que poderão auxiliá-lo nessa tarefa:

1. MOREIRA, I. de C. 1905. Artigo do livro *Física Hoje – Uma aventura pela natureza: dos átomos ao Universo*. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje: Centro Brasileiro de Pesquisas, 2007, p. 6.
2. BRENNAN, R. *Gigantes da Física: uma história da Física moderna através de oito biografias*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998.
3. MOURÃO, R. R. de F. *Nas fronteiras da intolerância: Einstein, Hitler, a bomba e o FBI*. São Paulo: A Girafa, 2007.

Desta última referência, apresentamos dois trechos para que você possa ressaltar alguns aspectos da vida de Einstein e do contexto em que se deu sua obra:

[...] A família Einstein, apesar da origem judia, estava a caminho de se germanizar, assim como a maioria dos judeus alemães. Ela rompera por completo com sua tradição e só reconhecia a cidadania alemã. Até os 35 anos, Einstein acompanhava, em todos os pontos, essa evolução. Ignorava sua natureza judaica e não queria ser mais apenas judeu, acreditando que essa ruptura faria desaparecer o antissemitismo. Durante a Primeira Guerra Mundial, fez parte de um pequeno número de universitários alemães que se opunha de maneira pública a qualquer forma de militarismo, inclusive o germânico. Mas foi exatamente o contrário que aconteceu. No dia seguinte à derrota da Alemanha na Primeira Guerra Mundial houve um brutal ressurgimento do antissemitismo no país, justamente no momento em que Einstein se tornava celebridade. O engajamento em favor das teses pacifistas e sionistas fez dele alvo privilegiado dos antissemitas e da extrema direita alemã. Até mesmo suas teorias científicas foram objetos de ataques públicos, em particular a teoria da relatividade.

[...] Durante a ditadura nacional-socialista de Hitler, na Alemanha, desenvolveu-se a ideia de uma física alemã denominada física ariana, fundamentada exclusivamente em resultados experimentais. A base das ciências exatas era a experiência. Todo modelo axiomático era considerado falso, como a teoria da relatividade ou a física quântica. Com a ascensão do regime nazista ao poder, o movimento liderado por Philip Lenard – físico (alemão) experimental que forneceu os resultados que permitiram a compreensão da estrutura do átomo – durante a República de Weimar desenvolveu uma aversão contra os ingleses, os judeus e, por fim, os físicos teóricos. Ao longo da guerra, esse panorama se modificou, pois o programa da bomba nuclear necessitava dos teóricos e, em consequência, a física teórica passou a ser defendida pelos militares. Na realidade, os nazistas e a atividade de Lenard e de seus correligionários causaram perda inacreditável à física, quando uma massa crítica de físicos notáveis deixou as instituições de pesquisas alemãs. Felizmente, a intolerância nazista e a luta pela física ariana tiveram uma vantagem: atrasaram o desenvolvimento da física teórica alemã bem no início da Segunda Guerra Mundial, impedindo, assim, que Hitler tivesse a bomba atômica.

Certamente este trabalho de introdução ao capítulo pode ser intensamente enriquecido se realizado com a participação do professor de História, de modo a contextualizar histórica e socialmente o desenvolvimento científico e, particularmente, a obra de Einstein.

2. Postulados da teoria da relatividade especial

Julgamos importante iniciar o tópico discutindo o movimento relativo dentro da visão newtoniana, que pautou praticamente todo o estudo da mecânica clássica. É esperado que os alunos apresentem habilidades com as regras de composição de velocidades, estudadas no primeiro ano do Ensino Médio e também vivenciadas em seus cotidianos. Os exemplos no Livro do Aluno ilustram o conceito de relatividade do movimento (da velocidade), mas se necessário você pode pedir e/ou propor outros.

Após esses comentários, sugerimos propor a questão que preocupava Einstein desde a adolescência, e ouvir as respostas dos alunos: O que verei se correr atrás de um feixe de luz, na mesma velocidade da luz?

Alguns alunos, baseando-se na experiência do cotidiano ou mesmo na relatividade de Galileu, podem afirmar que Einstein veria a luz em repouso, pois, se ambos se movimentam com a mesma velocidade, a velocidade relativa entre eles é zero. O cenário está pronto para se introduzir os postulados da relatividade especial.

Não é raro acontecer que a apresentação dos dois postulados da teoria da relatividade cause certo desapontamento nos alunos. A impressão, muitas vezes, é que gostariam de perguntar: mas a teoria da relatividade não é aquela que diz que tudo é relativo?

Há duas questões importantes a serem enfatizadas aqui, sobre a constância da velocidade da luz: a primeira é chamar a atenção para o fato de que inerente a esse postulado está a ideia de que a luz tem uma velocidade finita e não se propaga instantaneamente, como o senso comum ou a observação cotidiana nos faz admitir; a segunda refere-se à importante decorrência da teoria da relatividade, de que a velocidade da luz é absoluta, o que põe abaixo essa propalada frase ao se referir a Einstein e à sua teoria, de que “tudo é relativo”.

Também é importante ressaltar as consequências, principalmente do 2º postulado, discutida no Livro do Aluno, de que sendo a velocidade da luz sempre a mesma, quer observada por alguém em repouso ou em movimento, então o deslocamento e o intervalo de tempo devem ser relativos. O que isso significa? Esse é o assunto dos dois tópicos seguintes.

3. Dilatação do tempo

Este assunto geralmente interessa aos alunos, principalmente quando discutimos o paradoxo dos gêmeos.

O ponto fundamental deste tópico consiste no entendimento de que o tempo passa mais lentamente para um observador quando o objeto de medida está em movimento em relação a ele. Se os alunos entenderem o raciocínio físico, a prova matemática pode ser dispensada. Mas se você julgar necessário demonstrar a relação entre os intervalos de tempo próprio e relativo, sugerimos a consulta à seção 37.3, página 146, do livro *Física IV: Ótica e Física Moderna*, 12ª edição, de Young & Freedman, publicado pela editora Addison Wesley, em 2009.

O exercício resolvido 1 está relacionado à sua importância histórica. Trata-se de uma das primeiras comprovações da dilatação do tempo e, consequentemente, da teoria da relatividade. Nesse sentido, ele funciona muito bem como justificativa matemática. É bem provável que a grande maioria dos alunos desconheça o que sejam *múons*. Se for o caso, sugerimos uma consulta em sites espe-

cializados na internet ou nas referências bibliográficas indicadas no final do livro.

Antes de discutir o paradoxo dos gêmeos, sugerimos que você apresente a questão para os alunos e dê um tempo para que eles discutam entre si e apresentem suas conclusões.

Física explica

Nesta seção apresentamos dois artigos sobre as consequências da dilatação do tempo e suas aplicações no cotidiano, que têm como objetivo desenvolver habilidades de leitura e compreensão de texto. As respostas às duas questões propostas encontram-se no próprio texto.

4. Contração da distância

Como ponto de partida deste tópico, sugerimos a seguinte questão: Sabendo-se que a velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor em todas as direções e em todos os referenciais inerciais e não depende da velocidade da fonte, e que o tempo passa mais lentamente para um observador quando o objeto de medida está em movimento em relação a ele, o que dizer das dimensões de um corpo em movimento?

Após a resolução do exercício resolvido 2, que ilustra a influência da velocidade nas medidas de comprimento, proponha a seguinte questão: Afinal, ocorre encolhimento da nave ou não? A resposta é não! Os resultados dos itens **a** e **b** corroboram esse fato. A nave possui um comprimento próprio de 10 m, mas, estando em movimento, apresenta um comprimento relativo de 6,0 m.

5. Dinâmica relativística

Ao colocarmos que a inércia (medida da massa) de um corpo aumenta com a velocidade, enfatizamos o fato de que o aumento de massa não significa aumento de quantidade de matéria, mas sim, aumento de inércia. A ideia está centrada na relação massa-energia. Veja o que diz o físico inglês Stephen Hawking, em seu livro *O Universo numa casca de noz*:

[...] Uma consequência muito importante da relatividade é a relação entre massa e energia. O postulado de Einstein de que a velocidade da luz deveria parecer a mesma para todos implicava que nada poderia mover-se mais rápido que a luz. Acontece que quando a energia é utilizada para acelerar qualquer coisa, seja uma partícula, seja uma espaçonave, a sua massa aumenta, tornando ainda mais difícil acelerá-la. Acelerar uma partícula até a velocidade da luz seria impossível porque consumiria uma quantidade infinita de energia. Massa e energia são equivalentes, conforme sintetizado na famosa equação de Einstein $E = mc^2$.

A equação $E = mc^2$, apesar de constituir um conhecimento novo para os alunos, é muito popular. A maioria já a conhece, mesmo sem compreender muito bem seu significado. Por isso, é um assunto instigante, em geral. Nesse sentido, sugerimos um levantamento com os alunos sobre como eles a entendem e a interpretam. Solicite que redijam, com suas palavras, uma tradução dessa fórmula.

Sobre o tema, sugerimos que você consulte as referências indicadas a seguir e verifique a possibilidade de indicação para os alunos:

BODANIS, D. $E = mc^2$: uma biografia da equação que mudou o mundo e o que ela significa. Rio de Janeiro: Ediouro, 2001.

LEMONS, N. A. $E = mc^2$: origem e significado. In: *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n. 1, mar. 2001.

MARTINS, R. de A. A relação massa-energia e energia potencial. In: *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 6 (número especial): 56-80. Florianópolis, jun. 1989.

OSTERMANN, F. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de Física. In: *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 21, n. 1. p. 83-102. 2004.

Se houver tempo disponível, você poderá realizar com os alunos o cálculo da variação da massa em situações cotidianas, de objetos com velocidades muito inferiores à da luz e comparar com os resultados quando a velocidade é próxima à da luz.

Sugerimos, ainda, os comentários sobre algumas aplicações ou desdobramentos importantes da teoria da relatividade e, particularmente, da relação massa-energia. Por exemplo, o desenvolvimento da Física nuclear, como veremos no capítulo seguinte, as aplicações tecnológicas, como a produção de energia elétrica a partir da nuclear nos reatores de fissão, e os aceleradores de partículas, como o recente e divulgado LHC.

6. Teoria quântica

Sugerimos que você inicie este tópico com a frase sobre Física quântica do físico nuclear de origem russa e naturalizado norte-americano, George Gamow (1904-1968), que participou de importante trabalho sobre Cosmologia a respeito dos elementos que compõem o Universo:

É como se uma pessoa pudesse tomar ou uma garrafa de água ou água nenhuma, mas fosse impedida por uma lei da natureza de tomar qualquer quantidade de água entre zero e uma garrafa.

Nessa frase, Gamow faz uma analogia a um aspecto fundamental da Física quântica. Sugerimos que você solicite aos alunos que façam interpretações dessa frase, propondo paralelos com conhecimentos da Física de que já ouviram falar, já leram em algum lugar ou tenham alguma ideia do que se trata.

Outro ponto que pode ser abordado neste contato inicial é solicitar aos alunos que apresentem explicações próprias para o significado da palavra “quântico(a)”. Peça exemplos de coisas do cotidiano que seriam “quânticas” ou “quantizadas”.

No final do capítulo, você pode voltar a essas questões, para que os alunos possam, com base no que foi estudado, corrigir suas respostas, se necessário.

Física tem História

O texto de abertura da seção (*Energia em pacotes*) apresenta um breve relato histórico sobre o nascimento da Física Quântica na passagem do século XIX para o século XX. O personagem central deste acontecimento é Max Planck (1858-1947), físico alemão.

A seguir, sugestões de respostas para as questões propostas na seção.

- Na teoria eletromagnética clássica os valores de energia podem assumir valores contínuos, isto é, qualquer valor expresso por um número real. Na teoria eletromagnética quântica, somente valores discretos e bem determinados de energia podem ocorrer.
- O menor “pacote” de energia possível, relacionado com a energia eletromagnética de uma radiação.

No ano 2000, a comunidade científica comemorou os 100 anos do trabalho apresentado por Planck à Sociedade Alemã de Física. Dentre as diversas publicações referentes ao evento, indicamos o texto de H. Moysés Nussenzveig, do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, publicado pela revista *Ciência Hoje*, no vo-

lume 28, n. 167, de dezembro de 2000, e que certamente será útil para você na apresentação do capítulo. Veja alguns trechos desse artigo.

Uma revolução na Física

Há 100 anos, Max Planck lançava a teoria quântica. Uma comunicação apresentada em 14 de dezembro de 1900 numa reunião da Sociedade Alemã de Física originou uma revolução na física, que afetou profundamente a história do século 20. Essa comunicação é, em geral, considerada o marco inicial da teoria quântica.

O problema abordado por Max Planck era o de explicar o espectro da radiação térmica, a energia emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas por qualquer corpo aquecido a uma dada temperatura. A emissão ocorre em todos os comprimentos de onda (espectro contínuo), mas com intensidade variável, passando por um máximo em um dado comprimento de onda, que depende da temperatura do corpo. À medida que a temperatura aumenta, o máximo de intensidade da radiação emitida desloca-se para comprimentos de onda cada vez menores.

O espectro da radiação que recebemos do Sol é o exemplo mais familiar. Na faixa da luz visível, esse espectro, analisado por Isaac Newton (1642-1727) em seus experimentos com prismas, abrange do vermelho ao violeta (cada cor equivale a um comprimento de onda diferente). O espectro estende-se além dessa faixa, incluindo comprimentos de onda maiores (infravermelho, que sentimos calor) e menores (ultravioleta). O máximo de intensidade, no espectro solar, está na região entre o amarelo e o verde.

A variação da cor aparente na radiação emitida com a temperatura do corpo nos é familiar em outras fontes de radiação térmica. Assim, à temperatura de 600 °C (elemento térmico de um fogão elétrico, por exemplo), um metal está aquecido “ao rubro”, emitindo uma fraca luminosidade avermelhada. Já o filamento de uma lâmpada elétrica (2000 °C) emite luz amarelada. A luz do Sol provém de sua superfície, onde a temperatura atinge 6000 °C.

[...] Uma lei empírica para a energia total emitida, com função da temperatura, já havia sido proposta em 1879 por Josef Stefan (1835-1893). Foi demonstrada em 1884 por Ludwig Boltzmann (1844-1906) usando argumentos termodinâmicos. Em junho de 1900, Lord Rayleigh (John William Strutt, 1842-1919) mostrou que a chamada lei de equipartição da energia, um resultado fundamental da mecânica estatística clássica de James Clerk Maxwell (1831-1879) e de Boltzmann, conduzia a uma predição sobre a forma da lei universal procurada.

[...] Em outubro de 1900, Planck encontrou uma fórmula que interpolava entre essas duas leis e fornecia um excelente ajuste a todos os dados experimentais conhecidos. Nos três meses seguintes, ele buscou uma justificativa teórica para a sua fórmula, a partir de argumentos da teoria eletromagnética de Maxwell, da termodinâmica e da mecânica estatística.

[...] Ao invocar ideias da mecânica estatística para impor essa condição, Planck só conseguiu justificar sua fórmula introduzindo conceitos totalmente contraditórios à física clássica. Em lugar de tratar a energia total E dos osciladores como uma grandeza continuamente variável, disse: “Consideramos, porém – este é o ponto mais importante de todo o cálculo – que E é a soma de um número inteiro de partes iguais, e empregamos para isso a constante $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ erg $\cdot$ s. Essa constante, multiplicada pela frequência comum f dos osciladores, nos dá o elemento de energia e ”.

[...] Além de romper com a noção de continuidade da energia, Planck também usou um processo não ortodoxo de contagem no cálculo da distribuição estatística da energia.

Ironicamente, ele era por formação um físico muito conservador, convicto da validade da física clássica, com a qual procurou conciliar depois, durante vários anos, a ideia da “quantização”. Em 1931, disse que seu rompimento com a física clássica fora “um ato de desespero”. Havia considerado suas propostas como mera sugestão, sujeitas à verificação experimental. Por isso, Planck foi caracterizado pelo físico e historiador da ciência Abraham Pais como um “revolucionário relutante”.

Caso considere apropriado, você poderá utilizar esse texto na íntegra em sala de aula. Nesse caso, indique aos alunos que, após a leitura, respondam a questões como: Qual a importância de Planck na história da Física? Qual era o problema que o levou a formular suas ideias? Quais foram suas principais hipóteses e contribuições na solução desse problema? Em que sua teoria era contraditória com a Física clássica? Por que foi chamado, por Abraham Pais, de “revolucionário relutante”? Qual a relação entre a ideia fundamental formulada por Planck acerca da energia e a frase apresentada no início desse capítulo?

Um ponto importante que sugerimos que você ressalte é o papel da Física quântica no desenvolvimento tecnológico: o efeito fotoelétrico e a aplicação dos transistores e das *lasers*, por exemplo, têm produzido profundas mudanças na eletrônica, na Medicina, na biotecnologia e, conseqüentemente, com melhorias na qualidade de vida.

Na discussão sobre a radiação do corpo negro e a teoria quântica, você poderá utilizar os dois textos seguintes que fornecerão subsídios para os seus comentários.

Texto 1

[...] Em meados do século XIX, na Alemanha, que havia anexado ao seu território os centros de produção de carvão localizados na fronteira com a França, a indústria siderúrgica desenvolveu-se rapidamente. Foram construídas muitas instalações modernas, e enormes esforços foram feitos para produzir aço da melhor qualidade. O fator mais importante na produção de aço de primeira qualidade é o controle delicado da temperatura dos altos-fornos. Evidentemente, não se podem usar termômetros comuns para a medição de temperaturas tão altas. A fim de contornar esse problema, pesquisas foram feitas no sentido de determinar as temperaturas usando as cores das radiações térmicas, isto é, mais concretamente, foram recolhidas as luzes provenientes dos fornos às diversas temperaturas. Assim, analisando essas luzes pelos prismas e medindo as intensidades de cada parte espectral, foram obtidas as curvas da intensidade em função do comprimento de onda.

Em 1884, foi descoberta a lei empírica, conhecida como lei de Stephan-Boltzmann, que relaciona o fluxo total da radiação com a temperatura da cavidade.

Encorajados pelo êxito de Boltzmann, muitos tentaram explicar não só o fluxo total, mas também os espectros da cavidade, baseados na teoria clássica. Dentre eles, destacaram-se Wilhelm Wien (1864-1928), Lorde Rayleigh (1842-1919) e James Jeans (1877-1946).

OSADA, J. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Edgard Blücher/Ed. da Universidade de São Paulo, 1972. p. 48.

Texto 2

[...] Polkinghorne, no seu livro *O Mundo dos Quanta*, afirma que a grande revolução quântica começou indiretamente por volta de 1900, a partir dos trabalhos de dois físicos ingleses, Lorde Rayleigh e James Jeans, os quais estudaram um problema

fundamental que se relacionava com a possibilidade de encontrar uma fórmula matemática que pudesse prever com exatidão a quantidade de energia que um corpo aquecido, incandescente, iria irradiar. No fundo, aqueles dois cientistas tentaram resolver o problema do chamado “corpo negro”. Esta denominação é dada a um objeto que absorve toda a energia que incide sobre ele. Tais corpos negros não existem, em realidade, na natureza. O fato é que sua existência implicaria em que os mesmos não refletiriam nenhuma luz. Apesar de tal impossibilidade prática, em laboratório é possível construir exemplos de dispositivos que podem simular o comportamento de um corpo negro. O exemplo clássico é aquele de uma esfera oca com um pequeno orifício, onde qualquer luz, ou outra radiação que entre pelo orifício, irá ricochetear entre as paredes internas, até ser ao final absorvida. O fato de ser o orifício bastante diminuto é importante, pois muito pouca luz conseguirá escapar. Um outro dado importante é que se a esfera for aquecida, as suas paredes internas começarão a luzir, e a luz emitida do orifício será similar àquela que um “corpo negro”, concebido teoricamente, emitiria.

A obtenção da fórmula matemática, mencionada acima, frustrou os dois citados físicos e muitos outros; entretanto, a solução encontrada por Max Planck, em 1900, indicaria o nascimento da Teoria Quântica.

RIBEIRO Filho, A. Os quanta e a Física moderna. In: *Origens e evolução das ideias da física*. José Fernando M. Rocha (Org.). Salvador: EDUFBA, 2002. p. 304.

7. Efeito fotoelétrico

Neste tópico, apresentamos o fenômeno que rendeu a Albert Einstein o Prêmio Nobel de Física de 1921. O artigo, publicado em 9 de junho de 1905, “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”, contém a explicação quântica de como a radiação eletromagnética interage com a matéria. Nesse artigo, Einstein aplicou a quantização de energia para explicar o fenômeno que pode ocorrer com a luz quando interage com a matéria: o chamado efeito fotoelétrico.

Normalmente, quando citamos o Prêmio Nobel de Einstein é comum ouvirmos a pergunta: Por que Einstein não recebeu o Prêmio Nobel pela teoria da relatividade?

Vejamos o que nos diz Richard Brennan em seu livro *Gigantes da Física*, citado no início deste capítulo:

[...] Logo após a confirmação da teoria geral (da relatividade) veio o Prêmio Nobel de Física de 1921. De fato, o prêmio só foi concedido a Einstein em 1922 e, então, não pelas teorias da relatividade (especial e geral), mas por suas contribuições à física matemática e especialmente pela explicação do efeito fotoelétrico. Pensou-se na época que o comitê do Nobel não conseguiu perceber como a teoria da relatividade havia melhorado a condição da humanidade, algo especificado por Alfred Nobel como condição para o prêmio.

Sugerimos que você leia e verifique a possibilidade de utilização em sala de aula do artigo “Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades”, de Marisa Almeida Cavalcante e outros, publicado na revista *Física na Escola*, v. 3, n. 1, 2002, ou no site <www.sbfisica.org.br/fne> (acesso em abr. 2016). Segundo os autores, “o artigo pretende mostrar como podemos, utilizando recursos experimentais e computacionais, criar uma aula dinâmica e ao mesmo tempo interdisciplinar, envolvendo professores de Filosofia, Matemática e Física, através de um tema fascinante, como o comportamento dual da luz, suas aplicações tecnológicas e implicações filosóficas”.

Se você julgar necessário, e dispuser de tempo, poderá acrescentar mais algumas informações históricas a respeito do efeito fotoelétrico, que foi descoberto por Hertz em 1887 e recebeu essa denominação do físico italiano Augusto Righi (1850-1920) em 1888. Nesse sentido, o texto a seguir, que se encontra no livro *Nascimentos da Física (3500 a.C.-1900 a.D.)*, de José Maria F. Bassalo (Belém, EDUFPA, 1996, p. 354-355), certamente será útil:

[...] Em 1887, o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857--1894) publicou um trabalho sobre suas experiências com osciladores e com os mesmos produziu ondas eletromagnéticas, hoje conhecidas como micro-ondas ou ondas hertzianas. O oscilador de Hertz era constituído de duas esferas metálicas, cada uma portadora de uma haste, tendo em sua extremidade uma outra esfera metálica, porém pequena, estando ambas ligadas por uma bobina de Rühmkorff (1851). Ao alimentar essa bobina com um circuito elétrico oscilante, observou Hertz que havia faíscas (centelhas) entre as esferas metálicas, faíscas essas que deviam produzir uma radiação eletromagnética, conforme preconizou Maxwell, em 1865. Para poder detectar tal radiação, Hertz construiu um ressonador constituído por um grosso fio de cobre circular e interrompido por um pequeno arco, tendo em uma de suas extremidades uma pequena esfera e, na outra, um parafuso que podia avançar ou recuar para controlar a abertura do circuito. Quando esse ressonador captava uma onda eletromagnética, faíscas elétricas saltavam entre a esfera e a ponta do parafuso. Movendo esse dispositivo entre vários pontos do local onde realizava tal experiência, Hertz pôde calcular o comprimento de onda (distância entre pontos, onde a intensidade das faíscas era bem maior) da radiação eletromagnética, encontrando o valor de 66 cm. Por ocasião dessas experiências, Hertz observou que quando a esfera eletrizada negativamente (de seu dispositivo produtor de ondas eletromagnéticas) era iluminada com luz ultravioleta, as centelhas surgiam mais facilmente. Mais tarde, esse fenômeno foi identificado como o efeito fotoelétrico.

Física explica

Na seção, o destaque é para as células fotoelétricas, que controlam os dispositivos que utilizam o efeito fotoelétrico em seu funcionamento. É a tecnologia utilizando-se da ciência com implicações sociais, como, por exemplo, economia de água e de energia elétrica.

A seguir, sugestões de respostas para as questões propostas na seção.

1. A célula fotoelétrica permite o desligamento automático da torneira, evitando desperdício de água.
2. A luz incidente provoca a retirada de elétrons da célula, gerando corrente elétrica para os mais diversos usos.

8. Modelos atômicos

Julgamos importante que o plano de curso seja elaborado em conjunto com o professor de Química. Na verdade, tanto a Física quanto a Química investigam a constituição da matéria, mas com olhares diferenciados, havendo, portanto, intersecções nesses estudos, o que justifica um trabalho conjunto das duas disciplinas.

Para refletir

Na teoria de Demócrito, considerava-se que toda matéria era composta por elementos indivisíveis, denominados átomos. Na teoria atual, todos os elementos químicos constituintes da natu-

reza são compostos pelo que se convencionou chamar "átomos" que, conforme amplamente sabido, são divisíveis.

Isso não é suficiente para dizer que Demócrito não estava no caminho certo, dado que as divisões sucessivas dos "átomos" levam a subpartículas como quarks que, de acordo com o conhecimento atual, são indivisíveis. Talvez a diferença entre o pensamento de Demócrito e o pensamento científico atual esteja, apenas, na nomenclatura.

Como o tema deste tópico é apresentado por meio de uma narrativa histórica, sugerimos que você utilize também o artigo "A arquitetura da matéria", de Belita Koiller, publicado na revista *Física na Escola*, v. 6, n. 1, 2005. Segundo a autora,

O início da física moderna pode ser atribuído à descoberta, em 1897, da primeira partícula subatômica: o elétron. Estudos visando o entendimento microscópico do comportamento dos elétrons em sólidos abriram novas áreas da física básica. Abriam ainda a possibilidade de controle dos elétrons em diferentes materiais, levando a engenhosas invenções e à fabricação dos aparelhos eletrônicos que tanto impactam o nosso dia a dia. Neste artigo assinalamos as principais etapas destes desenvolvimentos básicos, bem como algumas aplicações e perspectivas futuras.

A autora encerra o artigo com uma referência às palavras de Richard Feynmann (1918-1988), um dos expoentes da Física do século XX, em sua obra *The Feynman Lectures on Physics*, sobre a importância dos átomos para a comunidade científica:

Se, em algum cataclisma, todo o conhecimento científico fosse destruído, e uma única frase passasse para a próxima geração de criaturas, que frase conteria mais informação no menor número de palavras? Acredito que seja a hipótese atômica, o fato de que todas as coisas são feitas de átomos – pequenas partículas em movimento perpétuo, que se atraem quando estão próximas, mas que se repelem quando pressionadas entre si. Nesta frase existe uma enorme quantidade de informação sobre o mundo, se um pouco de imaginação e pensamento forem aplicados.

Se houver disponibilidade de tempo e se você julgar necessário, poderá citar os trabalhos de Rutherford. Para isso, sugerimos o livro *Os grandes experimentos científicos*, de Michel Rival, especialista em questões científicas e técnicas, publicado por Jorge Zahar Editor, em 1997. Na página 124, encontramos o trabalho de Rutherford, de 1919, sobre as *transmutações dos elementos*.

Como o capítulo refere-se à Física quântica, o ponto culminante deste tópico sobre modelos atômicos é a discussão sobre o que levou o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), em 1913, a aplicar a quantização de energia ao átomo. Por esse trabalho e, certamente pelo conjunto de sua obra, Bohr, que é considerado por muitos como o "arquiteto da mecânica quântica", recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1922.

Sugerimos que você dê um destaque especial ao exercício 30, que solicita aos alunos uma pesquisa sobre o experimento idealizado por Robert A. Millikan (1868-1953) para a determinação do valor numérico de uma unidade de carga elétrica e que se tornou conhecido como "O experimento de Millikan". Em 1923, Millikan recebeu o Prêmio Nobel de Física.

Um aspecto importante neste tópico é que procuramos desenvolver nos alunos habilidades para a compreensão da ideia de modelo e de seu papel na evolução da ciência, uma vez que contribuem para a percepção de que a ciência é uma construção humana e que suas teorias não constituem verdades definitivas.

9. Bohr e o átomo de hidrogênio

Sobre Niels Bohr existem muitas publicações que você poderá consultar para enriquecer sua aula. Por exemplo, Bohr é um dos componentes do livro *Gigantes da Física*: uma história da Física moderna através de oito biografias, de Richard P. Brennan, já citado.

Outra fonte que julgamos importante é a publicação, em forma de revista, denominada *Quânticos*: os homens que mudaram a Física, que faz parte da série *Gênios da Ciência*, da Scientific American BRASIL. Além de Bohr, fazem parte da lista, Planck, Einstein, De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac e Pauli.

No volume IV – A ciência nos séculos XIX e XX – da obra *História ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge*, de Colin A. Ronan, publicado por Jorge Zahar Editor, 1997, você encontrará, na página 108, um texto muito interessante sobre Bohr, do qual apresentamos um pequeno trecho:

[...] Em 1912, o ano seguinte ao da proposição do modelo atômico de Rutherford, Niels Bohr, jovem físico dinamarquês, foi trabalhar em Manchester, e nessa cidade lançou os fundamentos da sua extraordinária teoria do átomo, que conseguiu completar no ano seguinte. Basicamente, o modelo de Bohr, que substituiu o de Rutherford, consistia em um núcleo com uma carga positiva, tal como acontecia no de Rutherford, mas em torno do qual orbitavam elétrons. No entanto, a tese era mais sutil do que essa simples descrição pode sugerir. Os elétrons orbitais só podiam mover-se em órbitas específicas, tal como os planetas só se movem em torno do Sol em órbitas determinadas. Quando o átomo de Bohr recebe energia, por aquecimento, talvez, ou por radiação eletromagnética, essa energia é distribuída entre um ou mais de seus elétrons, fazendo-os saltar instantaneamente para outras órbitas fixas mais distantes do núcleo. Depois de uma mínima fração de segundo, tais elétrons perturbados voltarão ao estado anterior e, ao fazê-lo, obrigarão o átomo a emitir radiação eletromagnética.

10. A dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza

Em uma visão geral da Física quântica, você não pode deixar de comentar esses dois aspectos fundamentais: a dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza. Ainda que essas ideias não sejam intuitivas, ou seja – que alguma coisa (a luz) possa ser concebida quer como onda, quer como partícula ou que é impossível conhecer ao mesmo tempo a posição e a velocidade de uma partícula – muitos alunos já podem ter ouvido falar nelas – em livros de divulgação, matérias de jornal, filmes e documentários, ou mesmo músicas. Assim, é importante que essas suas noções e informações prévias sejam compartilhadas, trazendo também exemplos do dia a dia, histórias, notícias, poemas, quadrinhos, etc. que tratem do tema.

A respeito disso, o físico Luís Carlos de Menezes, em seu livro *A matéria: uma aventura do espírito*, Livraria da Física, 2005, p. 144, afirma:

[...] Pode não ser muito fácil entender uma entidade que se propaga como onda, mas que atinge a matéria como partícula mas, de certa forma, percebemos cotidianamente esse caráter dual na luz, que projeta penumbra atrás de um anteparo em cujas bordas se difrata, mostrando que é onda, ao passo que, ao impressionar um filme fotográfico, interagindo com uma molécula de sal de prata ou ao emitir um elétron de uma placa metálica, deixa marca granular no ponto onde toca, revelando ser partícula.

Ainda em relação à dualidade onda-partícula, outro físico brasileiro, Marcelo Gleiser, assim se expressou:

[...] Com o desenvolvimento da mecânica quântica nas primeiras décadas deste século (século XX), ficou claro que as ondas aparecem até nos componentes fundamentais da matéria: as próprias partículas elementares, os blocos que usamos para construir o mundo, também podem ser descritas em termos de ondas! “Mas como?”, pergunta indignado o leitor. “Onda e partícula são aspectos completamente opostos do comportamento da matéria: uma partícula é uma entidade localizada, que ocupa um ponto ou um pequeno volume no espaço. Já uma onda é o oposto, algo que se espalha no espaço. Como é que um objeto pode ser ambos?”

Esse problema, conhecido como dualidade onda-partícula, é um dos aspectos mais fundamentais e mais intrigantes da mecânica quântica. A crise vem da nossa inabilidade de descrever, por meio de imagens mentais ou verbalmente, isto é, sem matemática, o comportamento bizarro dos objetos que habitam o mundo do muito pequeno. Um elétron (ou outra partícula) irá se manifestar como partícula ou onda, dependendo de como testarmos sua existência em uma determinada experiência. Se fizermos os elétrons colidirem entre si como bolas de bilhar, eles se comportarão como partículas. Se a experiência for de difração, por exemplo, passando os elétrons por fendas microscópicas, eles se manifestarão como ondas. Na verdade, os elétrons não são nem onda nem partícula. Somos nós, como observadores, que determinamos através de nosso experimento qual será sua natureza física. Onda e partícula são representações humanas desses objetos, imagens mentais que usamos para organizar o que observamos.

Esse texto encontrado na página 151 do livro *Retalhos cósmicos*, uma publicação da Companhia das Letras de 1999.

Para finalizar o capítulo, você poderá comentar os debates acalorados entre Einstein e Bohr a respeito da Física quântica. Para isso, sugerimos que você consulte no volume *Quânticos*: os homens que mudaram a Física, que faz parte da série *Gênios da Ciência*, da *Scientific American Brasil*, o artigo do físico e historiador de ciência, Roberto de Andrade Martins, “Albert Einstein: um olhar para o microcosmo”. Vejamos o que nos conta o historiador:

[...] Embora não tivesse participado dessa fase de criação da mecânica quântica, Einstein se envolveu no debate sobre seu significado. Em carta que enviou a Max Born em 1926, ele comentou: “A mecânica quântica é de fato imponente. Porém uma voz dentro de mim diz que ainda não é a verdadeira coisa. A teoria diz muito, mas não nos leva mais perto do segredo do Velho. Eu, de qualquer forma, estou convencido de que Ele não joga dados”. Bohr, mais tarde, comentou essa frase de Einstein, dizendo: “Pare de dizer a Deus o que Ele deve fazer!”.

Em 1927, durante o 5º Conselho Solvay, que foi dedicado à discussão da mecânica quântica, Bohr e Einstein tiveram um confronto não muito amigável. Em 1930, nova discussão ocorreu entre ambos. A “interpretação de Copenhague” defendida por Bohr e Heisenberg considerava a mecânica quântica como a teoria definitiva, a mais profunda possível para o estudo dos fenômenos microscópicos, e que não era possível afirmar nada sobre os detalhes dos movimentos individuais das partículas e sim apenas determinar as probabilidades de ocorrência daquilo que se pode observar. Einstein combateu essa visão, referindo-se que a mecânica quântica era incompleta (embora correta) e que devia ser possível ir além dela, atingindo nível mais profundo de conhecimento dos fenômenos, no qual já não haveria o total indeterminismo defendido por Bohr.

O ponto de vista de Einstein não foi aceito. Os argumentos de Bohr convenceram a maior parte dos físicos, e a interpretação de Copenhague para a mecânica quântica se tornou hegemônica durante mais de 20 anos. No entanto, as críticas de Einstein eram relevantes, e o último trabalho que publicou sobre esse assunto, em 1935, com a colaboração de dois outros autores (Boris Podolski e Nathan Rosen) acabou resultando em novas linhas de investigação sobre os fundamentos da mecânica quântica, a partir da década de 1960.

Ainda sobre a mecânica quântica, sugerimos a você outro artigo que poderá ser útil. Trata-se de “Mecânica quântica: uma nova imagem do mundo”, de A. F. R. de Toledo Piza, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, publicado na revista *Ciência Hoje*, vol. 36, n. 213, março de 2005.

Em construção

Neste capítulo, a nossa homenagem é para Albert Einstein. Como se trata de um resumo biográfico, destacamos a importância de uma pesquisa para conhecer um pouco mais da vida desse cientista, considerado o expoente máximo da Física.

Atividades complementares

1. (UFRN) O conceito de éter surgiu na Grécia antiga, significando uma espécie de fluido sutil e rarefeito que preenchia o espaço que envolvia a Terra. Esse conceito evoluiu para representar um referencial privilegiado, a partir do qual se poderia descrever toda a Física, inclusive seria o meio material no qual se propagariam as ondas eletromagnéticas (a luz). No entanto, as experiências de Michaelson-Morley, realizadas em 1887, mostraram a inconsistência desse conceito, uma vez que seus resultados implicavam que ou a Terra estava sempre estacionária em relação ao éter ou a noção de que o éter representava um sistema de referência absoluto era errônea, devendo, portanto, ser rejeitada.

As inconsistências do conceito de éter levaram Einstein a elaborar a teoria de que a velocidade da luz:

- a) é constante para qualquer observador e dependente de qualquer movimento da fonte ou do observador.
- b) é constante para qualquer observador e independente de qualquer movimento da fonte ou do observador.
- c) é constante e dependente do observador, porém independente de qualquer movimento relativo da fonte.
- d) é constante e independente do observador, porém dependente de qualquer movimento relativo da fonte.

Resolução:

De acordo com o 2º postulado da teoria da relatividade especial, a velocidade da luz no vácuo é constante em todas as direções e em todos os referenciais inerciais e independe da velocidade da fonte ou do observador.

Alternativa **b**.

2. (UFMG) Considere que, no ano de 2222, um trem expresso passa por uma estação à velocidade de $0,2c$, em que c é a velocidade da luz.

Henrique está dentro desse trem, em um vagão que mede 30 m de comprimento.

Quando o trem está passando pela estação, Henrique liga um *laser* situado no fundo do vagão. Esse *laser* emite um pulso de luz, que é refletido por um espelho posicionado na frente do vagão, retorna e atinge um detector situado junto ao *laser*.

1. No referencial de Henrique, CALCULE o intervalo de tempo entre o pulso sair do *laser* e atingir o detector.

Enquanto isso, Alberto, parado na estação, vê o trem passar.

2. Considerando essa informação, RESPONDA:

Qual é a velocidade do pulso de luz do *laser* medida no referencial de Alberto?

JUSTIFIQUE sua resposta.

Resolução:

1. Considerando a velocidade da luz dentro do vagão igual a $3 \cdot 10^8$ m/s, temos:

$$\Delta S = v \cdot \Delta t \Rightarrow 60 = 3 \cdot 10^8 \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

2. A velocidade da luz no vácuo é a mesma para qualquer referencial. Assim, a velocidade do pulso de *laser*, medida no referencial de Alberto, é $3 \cdot 10^8$ m/s.

3. (UFC-CE) No início do século XX, novas teorias provocaram uma surpreendente revolução conceitual na Física. Um exemplo interessante dessas novas ideias está associado às teorias sobre a estrutura da matéria, mais especificamente àquelas que descrevem a estrutura dos átomos. Dois modelos atômicos propostos nos primeiros anos do século XX foram o de Thomson e o de Rutherford. Sobre esses modelos, assinale a alternativa correta.

- a) No modelo de Thomson, os elétrons estão localizados em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo, e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.
- b) No modelo de Rutherford, os elétrons estão localizados em uma pequena região central do átomo e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.
- c) No modelo de Thomson, a carga positiva do átomo encontra-se uniformemente distribuída em um volume esférico, ao passo que os elétrons estão localizados na superfície da esfera de carga positiva.
- d) No modelo de Rutherford, os elétrons movem-se em torno da carga positiva, que está localizada em uma região central do átomo, denominada núcleo.
- e) O modelo de Thomson e o modelo de Rutherford consideram a quantização de energia.

Resolução:

Em relação aos modelos de Thomson e Rutherford, das alternativas apresentadas, a única correta é alternativa **d**.

4. (UFSC) Assinale a(s) proposição(ões) correta(s) e dê como resposta a soma dos números correspondentes.

01. A luz, em certas interações com a matéria, comporta-se como uma onda eletromagnética; em outras interações, ela se comporta como partícula, como os fótons no efeito fotoelétrico.

02. A difração e a interferência são fenômenos que somente podem ser explicados satisfatoriamente por meio do comportamento ondulatório da luz.
04. O efeito fotoelétrico somente pode ser explicado satisfatoriamente quando consideramos a luz formada por partículas, os fótons.
08. O efeito fotoelétrico é consequência do comportamento ondulatório da luz.
16. Devido à alta frequência da luz violeta, o “fóton violeta” é mais energético do que o “fóton vermelho”.

Resolução:

01. **Correta.** Trata-se da dualidade onda-partícula.
02. **Correta.**
04. **Correta.**
08. **Errada.** Comportamento corpuscular.
16. **Correta.** A frequência da luz violeta é maior do que a frequência da luz vermelha.
- Soma = 23 (01 + 02 + 04 + 16)

Resolução dos exercícios

1. Analisando as afirmações, temos:
- I. **Errada.** O evento – medida de um comprimento – é um conceito relativo, ou seja, depende da velocidade relativa entre os observadores.
- II. **Certa.** De acordo com o primeiro postulado da teoria da relatividade especial: “As leis da Física são as mesmas para todos os observadores em sistemas de referência inerciais”.
- III. **Errada.** De acordo com o segundo postulado da teoria da relatividade especial: “A velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor em todas as direções e em todos os referenciais inerciais e não depende da velocidade da fonte.”
2. A velocidade com que o *flash* luminoso aproxima-se do foguete é de 300 000 km/s, de acordo com o segundo postulado da teoria da relatividade especial (ver resposta do item III do exercício 1).
3. Os dois observadores, um na nave e o outro no planeta, medem o mesmo valor para a velocidade da luz: 300 000 km/s, de acordo com o segundo postulado da teoria da relatividade especial.
4. Lembrando que a **medida própria** é aquela feita por um observador para o qual o **objeto de medida está em repouso**, então a medida própria é aquela feita pelo seu amigo, que se encontra dentro do carro.
5. Para o astronauta a viagem durou 8 meses. Mas, para o pessoal da Nasa que ficou em Terra, a viagem durou mais de 8 meses (dilatação do tempo). Portanto, o astronauta ficou surpreso porque recebeu **mais** do que esperava.
6. Isso acontece devido ao efeito de dilatação temporal. Alternativa **e**.

7. O intervalo de tempo de 12 minutos é uma medida própria: $\Delta t_0 = 12$ min. Para um observador que ficou na Terra, esse intervalo é de:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \Rightarrow \Delta t = \frac{12}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,8 \cdot c}{c}\right)^2}} \Rightarrow \Delta t = 20 \text{ min.}$$

Para o observador na Terra, o evento durou 20 minutos.

8. a) No referencial da espaçonave, o intervalo de tempo é a medida própria, Δt_0 . Sendo $\Delta t = 20$ meses, obtemos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \Rightarrow 20 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,8 \cdot c}{c}\right)^2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t_0 = 12 \text{ meses.}$$

- b) A medida própria é aquela feita no referencial da espaçonave.

$$9. \frac{\Delta t_1 \cdot c}{2} = \frac{\Delta t_2 \cdot 0,80c}{2} \Rightarrow \frac{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8}{2} = \Delta t_2 \cdot 1,2 \cdot 10^8$$

$$\Delta t_2 = 3,0 \mu\text{s}$$

Alternativa **c**.

10. De acordo com o 2º postulado da teoria da relatividade especial, a velocidade da luz no vácuo é constante em todas as direções e em todos os referenciais inerciais e independe da velocidade da fonte ou do observador. Portanto, os intervalos de tempo total dos sinais emitidos, respectivamente, pela base (t_b) e pela nave (t_N) **são iguais**. Alternativa **d**.

11. a) Se a velocidade da barra é desprezível em relação à velocidade da luz, os efeitos relativísticos não são percebidos pelo observador. Neste caso, o comprimento da barra não se altera.

- b) Se a velocidade da barra é comparável à velocidade da luz, os efeitos relativísticos devem ser levados em conta. Assim, o comprimento da barra, medido pelo observador será menor do que 2,0 m (medida do comprimento da barra em repouso).

12. Como a régua está em repouso em relação à pessoa, o comprimento da régua não sofrerá efeitos relativísticos. Assim, para a pessoa dentro da nave, o comprimento da régua **não** parecerá contraído.

13. Para o observador em S, como a barra movimenta-se na direção de seu comprimento, ela sofrerá uma contração no seu comprimento. Portanto, para esse observador, o comprimento da barra será **menor** que 1,70 m.

14. Como o painel tem 5,0 m de comprimento e 3,0 m de largura e, quando em movimento, um corpo sofre contração na dimensão paralela ao movimento, então, para que o formato do painel pareça quadrado, é preciso que ele se movimente em uma direção paralela ao comprimento do painel, ou seja, o lado mais comprido do painel. Alternativa **b**.

- 15 As leis a que o texto se refere podem ser entendidas como os efeitos relativísticos que afetam a massa e o tempo: aumento de massa e dilatação do tempo em virtude da velocidade, matematicamente expressas pelas equações $E = mc^2$ e pela transformação de Lorentz relativa à dilatação do tempo:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

- 16 Não. Na mecânica clássica, a energia cinética é dada por:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}.$$

Como a massa é constante, a energia cinética é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade. Por outro lado, na mecânica relativística, como a massa varia com a velocidade, a energia cinética é dada por:

$$E_c = E - E_0 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2$$

De acordo com essa expressão, a energia cinética não é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade.

- 17 Se uma massa de 1,0 kg for convertida em energia, obteremos, em joule, uma quantidade de energia igual a:

$$E = m \cdot c^2$$

$$E = 1,0 \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E = 9,0 \cdot 10^{16} \text{ J}.$$

A quantidade de energia obtida será de $9,0 \cdot 10^{16} \text{ J}$.

Comente o resultado com os alunos. Isso é muito? É pouco? Peça que comparem com valores de energia em dadas situações, quer do cotidiano, quer em eventos que envolvam altas velocidades ou energias (por exemplo, compare esse resultado à energia elétrica consumida em uma residência, à energia cinética de um automóvel, à energia de combustão de certa massa de carvão ou de gasolina, ou à energia de uma partícula em um acelerador de partículas).

- 18 A energia de repouso é dada por:

$$E_0 = m_0 c^2$$

$$E_0 = 0,2 \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E_0 = 1,8 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

A energia total é dada por:

$$E = m \cdot c^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \cdot c^2$$

$$E = \frac{0,2}{\sqrt{1 - \left(\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}c}{c}\right)^2}} \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E = 3,6 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

E a energia cinética é dada por:

$$E_c = E - E_0$$

$$E_c = 3,6 \cdot 10^{16} - 1,8 \cdot 10^{16} \Rightarrow E_c = 1,8 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

- 19 Embora todos os corpos irradiem energia na temperatura ambiente, essa energia concentra-se na região infravermelha do

espectro eletromagnético. Assim, quer com iluminação, quer no escuro, essa radiação não é visível para nós. Como curiosidade, alguns animais, por exemplo, as cobras, têm visão sensível à radiação infravermelha e conseguem localizar suas presas mesmo em completa escuridão.

- 20 a) De acordo com a lei de Wien, obtemos o comprimento de onda máximo para a temperatura de 35°C (308 K):

$$\lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T} \Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{308} \Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}.$$

- b) Essa radiação encontra-se na faixa do infravermelho do espectro.

- c) As pessoas não brilham tanto porque a radiação emitida está na faixa do infravermelho e nossos olhos não são sensíveis a essa radiação.

- 21 a) De acordo com a lei de Wien, obtemos o comprimento de onda máximo para a temperatura de 3000 K :

$$\lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T} \Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{3000} \Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = 9,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}.$$

- b) Observe na figura dada que os triângulos citados têm a mesma altura. Portanto, a razão entre suas áreas é a razão entre as suas bases. Logo:

$$\frac{E_{\text{luminosa}}}{E_{\text{infravermelha}}} = \frac{3}{13}$$

A potência total irradiada corresponde à soma das áreas. Assim, a porcentagem de energia luminosa, em relação à total, vale:

$$\frac{E_{\text{luminosa}}}{E_{\text{total}}} = \frac{3}{(13 + 3)} \Rightarrow \frac{E_{\text{luminosa}}}{E_{\text{total}}} = 19\%.$$

- 22 Uma grandeza é quantizada quando só é possível obter determinados valores para a grandeza e esses valores são múltiplos de um valor fundamental. A grandeza “intervalo de tempo” não é quantizada, pois podemos obter qualquer valor para determinado intervalo de tempo, mas a grandeza “quantidade de carga elétrica” é quantizada, pois uma carga livre só pode assumir valores múltiplos da carga elementar ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$). Se quiser, você pode aproveitar a questão para pedir outros exemplos de coisas de nosso mundo que são quantizadas e coisas que não são.

- 23 a) A frequência da radiação emitida na transição do nível inicial para o nível final é dada por:

$$E = h \cdot f$$

$$3,4 \cdot 10^{-19} = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot f \Rightarrow f = 5,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}.$$

- b) O comprimento de onda correspondente a essa radiação é dado por:

$$\lambda \cdot f = c$$

$$\lambda \cdot 5,2 \cdot 10^{14} = 3 \cdot 10^8 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda = 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 5800 \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

Com base na tabela dada, a cor da luz correspondente à radiação emitida é amarela.

24 Para responder a essa questão, os alunos podem utilizar o texto do livro. A ideia é que percebam que para interpretar o efeito fotoelétrico, descoberto por Hertz (aliás, paradoxalmente, já que esse cientista concebia a luz como onda), Einstein precisou lançar mão do modelo corpuscular da luz, pois o modelo ondulatório, predominante nesse momento, não dava conta da explicação do fenômeno. Quanto a essa questão (modelo corpuscular $\times$ modelo ondulatório), você pode explicar que o modelo corpuscular da luz já havia sido defendido em outras épocas e por outros cientistas, como o próprio Newton, “pai da Física clássica”, mas parecia ter sido definitivamente “derrubado” pelos estudos de fenômenos luminosos, como a interferência e a difração, que levaram à aceitação do modelo de luz como onda. Pode, ainda, adiantar (o que será tratado no tópico 5 desse capítulo) que hoje, nem um nem outro modelo é mais correto, mas ambos são aceitos. Para explicar alguns fenômenos, o modelo ondulatório é mais apropriado ou “correto” e, para outros, como é o caso do efeito fotoelétrico, o corpuscular é o “correto”. Ou seja, essa questão traz uma boa oportunidade para discutir aspectos importantes da evolução da ciência.

25 Desde que os dois feixes de luz consigam arrancar elétrons das placas metálicas, o de maior intensidade conseguirá arrancar mais elétrons da placa.

26 Para o efeito fotoelétrico ocorrer em dado metal, existe uma frequência mínima (f_0) da luz incidente, ou seja, somente quando usamos luz de frequência igual ou maior que f_0 , elétrons podem ser arrancados do metal. Se um dos feixes de luz não conseguiu produzir o efeito, podemos atribuir isso ao fato de ser sua frequência menor do que a mínima necessária para aquela placa (f_0).

27 A frequência de $5,0 \cdot 10^{14}$ Hz corresponde à frequência mínima para a qual ocorre o efeito fotoelétrico. Nesse caso, a energia cinética dos elétrons arrancados é zero. Portanto, a função trabalho (W) do metal é dada por:

$$E_{C(\text{máx.})} = hf - W$$

$$0 = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 5,0 \cdot 10^{14} - W \Rightarrow W = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Sendo $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, então a função trabalho do metal é:

$$W = \frac{3,3 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow W = 2,1 \text{ eV.}$$

28 Embora nos dias atuais a ciência tenha desenvolvido uma concepção sobre os átomos que responde às questões antes não explicadas, ela, com certeza, não é definitiva. Hoje, o átomo perdeu o *status* de partícula indivisível devido às descobertas do elétron, do próton e do nêutron, que são os constituintes básicos do átomo e, também, pelo conhecimento das reações, tanto as atômicas quanto as nucleares. Dessas três partículas, hoje somente o elétron é considerado uma partícula elementar. O próton e o nêutron são constituídos de *quarks*, conforme será visto no Capítulo 11 deste volume.

29 No modelo de Thomson, o átomo era concebido como um “pudim positivo” no qual estavam incrustadas “passas negativas” distribuídas de tal forma que o conjunto era eletricamente neutro. No modelo de Rutherford, o átomo é formado por uma região central muito pequena, denominada **núcleo**,

no qual se concentra toda a sua carga positiva e a maior parte da massa, e por uma nuvem de elétrons em órbitas em torno desse núcleo. Ou seja, ambos os modelos descrevem o átomo como constituído de cargas elétricas positivas e negativas, de modo que no conjunto, o átomo seja eletricamente neutro. A grande diferença entre eles reside na forma como essas cargas estão distribuídas.

30 É preciso que você oriente os alunos sugerindo as fontes de pesquisa. A seguir, listamos algumas referências que podem ser úteis:

I. KAPLAN, Irving. *Física nuclear*, 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. p. 22-23.

II. ATKINS, Peter; JONES, Loretta. *Princípios de Química*: questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre: Bookman, 2001. p. 47.

III. <www.if.ufrgs.br/historia/millikan.html>. Acesso em: maio 2016.

Os alunos podem se dividir em grupos para realizar a pesquisa e apresentar seus resultados em painéis para serem expostos na sala de aula. Se você achar adequado, também pode orientá-los na apresentação de seminários.

31 Segundo o modelo quântico de Bohr, permanece a ideia de um núcleo central, com elétrons orbitando ao seu redor. No entanto, há uma restrição: os elétrons somente podem ocupar determinadas órbitas, nas quais podem permanecer por determinado tempo sem irradiar energia. Essas órbitas correspondem a situações estáveis, chamadas de estados estacionários. Só há emissão de energia quando o elétron muda de um estado estacionário para outro, de energia mais baixa. E, em concordância com a quantização de energia, já postulada por Einstein, o elétron apenas pode saltar para certas órbitas, emitindo uma quantidade predefinida de energia a cada salto (emissão de fóton), de uma órbita de raio maior para uma de raio menor, ou absorvendo também quantidade definida de energia quando salta de uma órbita de raio menor para uma de raio maior (absorção de fóton).

32 a) Quando a volta do elétron ao estado fundamental é feita em duas etapas, as energias dos fótons emitidos são diferentes, mas a soma delas corresponde à diferença entre o estado inicial (excitado) e o final (fundamental).

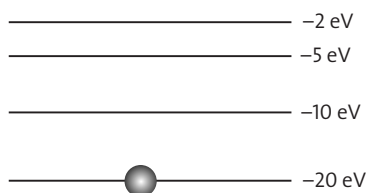
b) A soma das energias dos fótons emitidos em duas etapas é igual à energia do fóton emitido em um único salto.

33 a) De acordo com o diagrama dado neste exercício e sabendo que a energia é zero quando a distância entre o elétron e o núcleo é infinita (átomo ionizado), a energia necessária para ionizar o elétron, a partir do estado fundamental ($n = 1$) é 20 eV:

$$\Delta E = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}$$

$$\Delta E = 0 - (-20) \Rightarrow \Delta E = 20 \text{ eV.}$$

b) A partir do estado fundamental, se o átomo absorve 18 eV, o elétron passa para o estado correspondente a $n = 4$, conforme mostra a figura seguinte.



Ao retornar ao nível fundamental, existem as seguintes possibilidades para o salto do elétron:

- Diretamente em uma única etapa, de $n = 4$ para $n = 1$. Neste caso, a energia do fóton emitido é igual a 18 eV $[-2 - (-20)]$;
- Em duas etapas, de $n = 4$ para $n = 3$ e de $n = 3$ para $n = 1$. Neste caso, temos: no primeiro salto, a energia é de 3 eV $[-2 - (-5)]$ e, no segundo salto, de 15 eV $[-5 - (-20)]$;
- Em duas etapas, de $n = 4$ para $n = 2$ e de $n = 2$ para $n = 1$. Neste caso, temos: no primeiro salto, a energia é de 8 eV $[-2 - (-10)]$ e, no segundo salto, de 10 eV $[-10 - (-20)]$;
- Em três etapas, de $n = 4$ para $n = 3$; de $n = 3$ para $n = 2$ e de $n = 2$ para $n = 1$. Neste caso, temos: no primeiro salto, a energia é de 3 eV; no segundo salto, de 5 eV e, no terceiro salto, de 10 eV.

Então, as energias possíveis para os fótons emitidos são: 3 eV; 5 eV; 8 eV; 10 eV; 15 eV e 18 eV.

34 Analisando as afirmativas, concluímos que:

- Errada.** A dualidade onda-partícula significa que a luz pode se comportar como onda ou como partícula, porém esses comportamentos não ocorrem simultaneamente.
- Certa.** O princípio da incerteza de Heisenberg é relevante no mundo quântico. Para objetos macroscópicos, do nosso cotidiano, as incertezas são desprezíveis.

35 De acordo com o texto, o ato de observar algo tão minúsculo quanto um elétron produz uma considerável incerteza ou em sua posição ou em sua quantidade de movimento linear. Alternativa **b**.

Retomando

- 36 a) A energia cinética máxima $E_{c(\text{máx})}$ que o elétron ejetado (fotoelétron) pode ter é dada por: $E_{c(\text{máx})} = E - W$, em que E é a energia do fóton incidente e W é a função trabalho do material da placa metálica, que depende do tipo de metal utilizado. Assim, a energia cinética máxima não depende da intensidade da luz policromática incidente. Quanto maior a intensidade da luz sobre a placa, maior a quantidade de elétrons arrancados, mas não aumenta a energia dos fotoelétrons.
- b) Cada elétron necessita receber uma quantidade mínima de energia para ser arrancado. Se a energia do fóton não superar essa quantidade mínima, o elétron não é arrancado e o efeito fotoelétrico não acontece. No experimento mostrado na questão, isso só acontece com fótons que possuem energia mínima de 6,0 eV.

37 A teoria da relatividade não se opõe à Física clássica, mas sim a complementa, em um cenário de altas energias. Alternativa **d**.

38 A velocidade da luz não depende do observador. Alternativa **c**.

39 Como $\Delta E = h \cdot f$, temos:

$$[-1,3 - (-2,6)] \cdot 10^{-19} = 6,62 \cdot 10^{-14} \text{ Hz} \cdot f \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f = \frac{1,3 \cdot 10^{-19}}{6,6 \cdot 10^{-34}} = 2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Alternativa **b**.

40 a) Como a massa do pósitron é igual à massa do elétron, temos:

$$E = \frac{-13,6}{1+1} = -6,8 \text{ eV}$$

b) A energia de cada fóton corresponde à metade da energia total, ou seja:

$$E_f = m \cdot c^2 = 9,0 \cdot 10^{-31} \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E_f = 8,1 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

CAPÍTULO 10 – Física nuclear

A abertura do capítulo é uma reflexão sobre um dos temas mais polêmicos da atualidade e diz respeito a todos nós: Você é a favor ou contra as usinas nucleares?

Para que cada um possa se posicionar a favor ou contra a energia nuclear (e suas aplicações) é preciso **conhecimento**. Este é o principal objetivo deste capítulo: fornecer aos alunos subsídios para que possam emitir juízos próprios e exercer o direito de todo cidadão de avaliar prós e contras levando em conta que, se de um lado a energia nuclear melhora a qualidade de vida das pessoas, por outro lado ela traz riscos que precisam ser ponderados para um posicionamento responsável.

Se você julgar interessante que os alunos tenham alguma informação inicial antes de iniciar a discussão dos conceitos relativos ao tema, sugerimos a apresentação do texto seguinte, que poderá contar com a participação do professor de História:

Em 1945, o mundo tomou conhecimento de uma das maiores atrocidades cometidas contra a humanidade: a explosão de bombas atômicas nas cidades de Hiroshima e Nagasaki, no Japão. Era a energia nuclear a serviço da intolerância.

Esses eventos marcaram profundamente todos aqueles que direta ou indiretamente tiveram participação no Projeto Manhattan – programa nuclear americano – e, a partir deles, a energia nuclear passou a ser vista como sinônimo de destruição.

No Brasil, em 2007, o anúncio pelo governo da retomada do projeto nuclear de Angra dos Reis, RJ, mobilizou diversas ONGs (Organizações Não Governamentais), entre elas o Greenpeace:

Brasília e Angra dos Reis (RJ), Brasil – Baseado em parecer do renomado jurista José Afonso da Silva, Greenpeace entra com ação civil pública e mandado de segurança para barrar construção da usina nuclear. Medida judicial também foi tomada no TCU. Para frear a retomada da aventura nuclear pelo governo brasileiro, fizemos ações para mostrar os perigos que Angra 3 oferece às pessoas e ao meio ambiente, relembrando tragédias como a do Césio-137 e Chernobyl, na Ucrânia, e mostramos por A + B que a energia nuclear não se sustenta financeiramente, por ser cara, ineficiente e depender de subsídios governamentais. Ainda assim, o Conselho Nacional de Política

Energética (CNPE) determinou em agosto de 2007, a construção da terceira usina nuclear brasileira. Chegou, portanto, o momento de ir à justiça.

Notícia publicada em 5/11/2007. Disponível em: <www.greenpeace.org/brasil/pt/Noticias/ANGRA-3-E-ILEGAL-inconstituci/>. Acesso em: abr. 2013.

Mas existe o outro lado da moeda. Não podemos ficar alheios aos inegáveis benefícios para a humanidade advindos da utilização pacífica da energia nuclear. Os reatores nucleares têm permitido a produção de isótopos radioativos com inúmeras aplicações na Medicina. É a energia nuclear a serviço de uma melhor qualidade de vida.

A polêmica sobre construções de usinas nucleares está longe de uma solução. A posição dos ambientalistas é muito clara: a energia nuclear expõe a sociedade a riscos desnecessários e que, portanto, podem ser evitados, além de exigir um alto investimento. Em contrapartida, vários países do mundo estão voltando suas atenções para a utilização de energia nuclear na produção de energia elétrica por dois motivos. O primeiro, relacionado à saúde do planeta – na usina nuclear, não há emissão de gases que afetam o efeito estufa – e, o segundo, os altos preços do petróleo e do gás usado nas usinas termoeletricas.

Por desconhecimento ou por modismo, muitas pessoas entendem a palavra “nuclear” como algo letal ou como uma criação diabólica da Ciência. É importante lembrar que a energia nuclear (e os elementos radioativos) já existia muito antes do surgimento da espécie humana e controlar essa força da natureza foi uma grande missão para cientistas do século XX.

Ferramentas e máquinas inventadas para melhorar a produtividade e a qualidade de vida podem se transformar em armas letais, como a faca, a foice, os automóveis e os aviões, por exemplo. No entanto, ao longo da história, nunca o ser humano havia tido em suas mãos uma fonte de energia tão poderosa quanto a nuclear. Uma fonte de energia capaz de abastecer milhões de lares, indústrias, hospitais e escolas e, ao mesmo tempo, considerando os arsenais bélicos existentes, capaz de destruir o planeta várias vezes.

O acidente nuclear acontecido em Fukushima, no Japão, em 11 de março de 2011, trouxe novos questionamentos acerca da constituição de usinas nucleares.

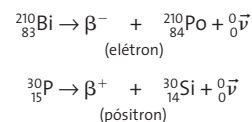
1. Radioatividade

O entendimento sobre a energia nuclear exige o conhecimento da radioatividade. Sugerimos logo de início comentar que, ao final do século XIX, na falta de uma descrição apropriada para as emissões radioativas, foram usadas as letras gregas α , β e γ , mas que as descobertas posteriores mostraram que α e β são partículas materiais, enquanto a emissão γ é uma onda eletromagnética altamente energética.

Julgamos importante enfatizar que a radioatividade é um processo exclusivamente nuclear. Aproveite para comparar com as reações químicas em geral, como a combustão, que são processos que acontecem na eletrosfera, já alertando que as energias envolvidas nos processos nucleares são milhões de vezes maiores que as dos processos químicos.

Adicionalmente, se você considerar pertinente, pode comentar também a desintegração β^+ (pósitron) e que as desintegrações β

são acompanhadas da emissão de neutrinos (ν) ou antineutrinos ($\bar{\nu}$), conforme o exemplo a seguir.



Para a discussão do conceito de **meia-vida**, embora possa parecer óbvio, é preciso explicar que a meia-vida **não** é metade da vida radioativa da amostra. Como a cada meia-vida o número de núclídeos radioativos cai à metade, a rigor, em uma sucessão de meias-vidas, sempre restará metade da nova metade e, portanto, a radioatividade da amostra nunca ficará nula. Ou seja, matematicamente falando, o tempo para que a radioatividade de uma amostra se esgote totalmente é infinito.

No entanto, em termos práticos, chegará um instante no qual a radioatividade se reduziu a valores tão baixos (por exemplo, 1 desintegração por mês) que poderemos desconsiderá-la.

A hipótese de que todos os núcleos tenham a mesma probabilidade de desintegração considera que cada núcleo por si ignora o passado, isto é, nos instantes futuros ele terá a mesma probabilidade de se desintegrar que os outros.

Embora a hipótese pareça simples, nessas considerações está embutida uma ideia nova em relação à Física clássica: a incapacidade de se prever qual núcleo vai desintegrar-se. Não sabemos, a natureza não sabe, mas a abordagem estatística corrobora a hipótese.

A incerteza que temos a respeito da desintegração de um núclídeo individualmente não provém da ignorância a respeito do fenômeno, mas é uma incerteza inerente à própria natureza.

Para refletir

Antes de você comentar sobre isótopos, os alunos podem responder à questão com base nas aulas de Química.

A seguir, uma sugestão de resposta.

- Os três são isótopos, têm a mesma quantidade de prótons (82) e diferem na quantidade de elétrons: chumbo 206 tem 124 elétrons, chumbo 207 tem 125 elétrons e chumbo 208 tem 126 elétrons.

2. Radiações: interações e aplicações

Física explica

Nesta seção, com o texto “Vivemos em um mundo radioativo”, sobre as aplicações pacíficas das radiações na medicina, na agricultura, na indústria e na arqueologia, procuramos desmistificar o estigma que acompanha a palavra “radioatividade” e mostrar aos alunos o uso pacífico da energia nuclear para melhoria da qualidade de vida.

As respostas das duas questões propostas no texto sobre a água mineral radioativa são:

- a) Mache é uma antiga unidade de radioatividade, proposta pelo físico austríaco Heinrich Mache (1876-1954), definida como a quantidade de radônio por litro de ar.
b) $24,72 \text{ maches} \cdot 12,8 = 316 \text{ Bq/L}$
- De acordo com o texto, a água mineral radioativa é adequada para o consumo e não traz danos à saúde das pessoas.

3. Reações nucleares

Para refletir

Na comparação das reações químicas com as reações nucleares – partículas, isótopos, energia, tipo de interação (eletromagnética e nuclear) – os alunos poderão concluir que não vivenciamos as reações nucleares em nosso dia a dia.

Física tem História

Com base no texto da seção, três pontos merecem ser comentados com os alunos:

- A explicação de que para a partícula α atingir o núcleo do átomo de nitrogênio, ela deverá ter energia suficiente para superar a repulsão elétrica que o núcleo exercerá sobre ela até atingir a região em que entrará em ação a interação nuclear, que é a região do próprio núcleo.
- Rutherford obtinha as partículas α altamente energéticas a partir de desintegrações de núcleos radioativos. Madame Curie era a grande fornecedora do material radioativo para obtenção dessas partículas, suprimindo os pesquisadores em Física nuclear da época.
- No começo do século XX, tanto a partícula quanto o núcleo de hélio eram concebidos como compostos de 4 prótons e dois elétrons, pois o nêutron ainda não havia sido descoberto. As partículas carregadas, por serem ionizantes, deixam um traço na câmara de nuvens. Por conservação do momento, James Chadwick (1891-1974) percebeu que faltavam traços em determinados experimentos, levando-o a concluir que partículas com massa muito semelhante à do próton, mas com carga nula existiam no núcleo: o nêutron. Essa descoberta lhe rendeu o prêmio Nobel, em 1935.

Com base nas aulas de Química, os alunos farão o balanceamento (de massa e de carga elétrica) da equação relativa à reação nuclear produzida por Rutherford:

- Massa: $14 + 4 = 17 + 1$
- Carga elétrica: $7 + 2 = 8 + 1$

Para refletir

A velocidade dos prótons no LHC é de 99,9% da velocidade da luz.

4. Fissão nuclear e fusão nuclear

Sugerimos iniciar o tópico com a questão: Qual a diferença entre fissão e fusão? Fissão é ruptura e fusão é junção. Na apresentação da fissão nuclear, você poderá complementar a parte histórica utilizando-se do texto a seguir:

[...] Em 1938, enquanto se desenrolavam em Estocolmo, na Suécia, as cerimônias de entrega do Prêmio Nobel, na Alemanha, Otto Hahn e Fritz Strassman faziam uma das descobertas mais fundamentais da Física nuclear: a fissão nuclear. O nome fissão foi sugerido pelo biólogo americano William A. Arnold e está associado a processos de divisão celular que aparecem em Biologia.

[...] Sobre a descoberta da fissão é importante a palavra do próprio Otto Hahn:

“Em particular, Fermi [Enrico Fermi (1901-1954), físico italiano] concluiu que, ao irradiar urânio com nêutrons, ele havia obtido elementos transurânicos, isto é, elementos com número atômico mais elevado que o do urânio. A senho-

rita Lise Meitner, Fritz Strassmann e eu decidimos repetir e ampliar essas experiências muito interessantes. Nós nos consideramos bem qualificados para realizá-las. Lise Meitner e eu havíamos trabalhado juntos em problemas de radioatividade durante mais de 30 anos. Fritz Strassmann, meu amigo, possuía uma experiência única em Química Analítica Inorgânica, e eu havia estado no campo da Radioquímica desde os primeiros dias do começo do século com resultados muitos bons.”

“Durante os quatro anos de trabalho em conjunto, desde 1934 a 1938, publicamos numerosos trabalhos, acreditando que havíamos isolado isótopos dos elementos 93 a 96, e nossos resultados foram geralmente aceitos. Mas, no final do ano de 1938, quando Lise Meitner se viu obrigada a sair da Alemanha e havia emigrado para a Suécia, Dr. Strassmann e eu chegamos à espantosa conclusão de que o impacto de um nêutron sobre um núcleo de urânio produzia a sua fissão em dois núcleos de tamanho médio, processo que previamente não seria considerado possível. Esses resultados que nós publicamos com alguma vacilação foram prontamente confirmados por físicos da Dinamarca, Estados Unidos e outros países.”

A comunicação da fissão foi apresentada no dia 22 de dezembro de 1938 na revista “Naturwissenschaften”. Eles determinaram, sem sombra de dúvida, a presença de bário como produto do bombardeamento do urânio por nêutron, sendo o bário um fragmento da fissão.

Antes da publicação, Hans e Strassmann enviaram o trabalho a Lise Meitner e seu sobrinho, Otto Frisch. Hahn tinha uma grande admiração pela capacidade científica de Lise Meitner. Foi realmente muito desagradável que ela não tivesse participado diretamente da descoberta da fissão. Infelizmente, a perseguição aos judeus pelos nazistas não permitiu que uma grande cientista participasse de uma das maiores descobertas da Física Nuclear, pelo mesmo grupo de pesquisa na qual Lise Meitner fora uma figura exponencial.

[...] A teoria da fissão foi desenvolvida por Niels Bohr e John A. Wheeler, em 1939. Num livro de Acústica publicado em 1878 por John W. Strutt, Lord Rayleigh, denominado “The Theory of the Sound”, Lord Rayleigh apresenta um estudo detalhado sobre as formas apresentadas por gotículas de água emitidas por um desses aparelhos simples que os barbeiros utilizam para borrifar água nos cabelos. Verificou que, com uma lanterna de projeção, ele poderia verificar de maneira mais detalhada as configurações das gotículas que eram projetadas num anteparo.

[...] Para explicar o problema da fissão, Bohr e Wheeler utilizaram o modelo da gota líquida. Nesse modelo, o núcleo atômico era como uma gota líquida e apresentava as mesmas configurações geométricas que as das gotas do atomizador de Lord Rayleigh. O modelo da gota líquida é utilizado tanto na fissão espontânea do urânio-238 (muito rara) e na fissão induzida por nêutrons.

Martins, Jader B. *A História do átomo – de Demócrito aos quarks*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2001. p. 134-140.

Na mesma referência bibliográfica do texto, você encontrará na página 200 dados históricos sobre a fusão nuclear, dos quais transcrevemos um pequeno trecho.

[...] Um dos problemas que mais preocupou os homens de Ciência foi a determinação da fonte de energia emitida pelas estrelas e particularmente pelo Sol. O Sol, que não é uma estrela de grandes proporções, emite uma energia eletromagnética de $4 \cdot 10^{23}$ ergs/s ($4 \cdot 10^{16}$ J/s) e isso vem acontecendo há muitos bilhões de anos. A impossibilidade de explicar a emissão de

energia solar baseada em fontes ordinárias de energia levou os astrofísicos à hipótese de que a energia emitida deveria ser de natureza nuclear. Como a atmosfera solar é constituída praticamente por elementos leves, hidrogênio e hélio, os cientistas passaram a considerar que estes núcleos deveriam ser responsáveis, através de reações entre eles, pela energia solar. Em 1929, Robert Atkinson e Fritz Houtermans sugeriram que a energia liberada pelas estrelas deveria ser resultante de reações termo-nucleares de fusão. Em 1939, Hans Bethe passou a estudar o problema da fusão nuclear no cosmos.

[...] Bethe realizou a sua mais importante contribuição à Ciência em 1938, quando desenvolveu em detalhes o mecanismo nuclear que está envolvido na produção de energia das estrelas, um problema que estava sem solução desde a época de Lord Kelvin e Hermann von Helmholtz, transcorridos quase 75 anos. Bethe explicava a produção de energia nas estrelas por dois conjuntos de reações nucleares: o ciclo do carbono e a cadeia próton-próton. O ciclo do carbono foi proposto separadamente e de forma independente por C. F. von Weizsäcker.

Na hipótese de Bethe, ele considera como reação inicial a realizada entre um núcleo de hidrogênio (próton) e um núcleo de carbono-12, formando o nitrogênio-13. Isso acarreta uma série de reações nas quais 3 prótons são envolvidos, aparecendo no final um carbono-12 e um núcleo de hélio. Os núcleos envolvidos nas reações funcionam como catalisadores, que possibilitam a transformação de 4 prótons num núcleo de hélio.

5. Reatores nucleares

Para este tópico, sugerimos iniciar com uma analogia para exemplificar a reação em cadeia: vários palitos de fósforo espalhados pelo chão. Se eles estiverem muito próximos, isto é, com uma concentração razoável, ao acender um deles a energia liberada vai ativar os vizinhos e todos se queimarão. Por outro lado, se estiverem relativamente distantes, o acendimento de um deles não provocará a reação em cadeia. Analogamente, isso explica a necessidade do enriquecimento do urânio para que a reação em cadeia aconteça e se mantenha.

Em seguida, você pode comparar o funcionamento de reator de fissão com as máquinas a vapor, mostrando que a diferença básica é que as antigas locomotivas usavam carvão para gerar o calor, enquanto no reator nuclear o calor provém das reações nucleares, mas o princípio do funcionamento é o mesmo.

Alguns pontos que você pode abordar:

- No Brasil, os reatores de fissão de urânio permanecerão no futuro? Essa é uma questão muito difícil de ser respondida, mas, caso permaneçam, o domínio da tecnologia e as expectativas das reservas brasileiras mostram um cenário promissor para nosso país.
- A disponibilidade de energia elétrica é, sem dúvida, um fator decisivo para o desenvolvimento econômico. Quais os principais países que possuem reatores nucleares? A tabela seguinte sobre a distribuição de reatores nucleares no mundo pode ser um tema de discussão sobre energia e desenvolvimento, em conjunto com o professor de Geografia.

Observe que os dez países (um terço do total) com maior número de reatores nucleares instalados representam mais de 81% (360 de 441) do total de reatores do mundo.

Reatores Operacionais Dezembro 2015

País	Nº de reatores
Estados Unidos	99
França	58
Japão	43
Rússia	34
China	31
Coreia do Sul	24
Índia	21
Canadá	19
Reino Unido	16
Ucrânia	15

Fonte dos dados: ELETROBRÁS. Panorama da Energia Nuclear no Mundo - Edição de 2016. Disponível em: <www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=SG_9CnL80wM%3d&tabid=406>. Acesso em: 19 abr. 2016.

Paradoxalmente, muitas das pessoas contrárias à energia nuclear almejam residir e trabalhar em algum desses países mostrados na tabela.

Na discussão sobre o grave problema dos rejeitos (lixo) radioativos, sugerimos, se houver tempo e interesse, comentar sobre o **plutônio**, um subproduto das reações que acontecem na usina de fissão, sendo altamente radioativo. Acontece que o plutônio pode ser usado como combustível nuclear em outro tipo de usina, que também deixará dejetos radioativos, que poderão ainda ser usados em outras usinas, em um esquema de máximo aproveitamento em cadeia, como fazem vários diferentes tipos de reatores na França.

Mas 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 países belicosos. De certa forma, o plutônio é o “lixo” mais caro do mundo, dada a quantidade de energia que cada quilograma desse elemento pode liberar.

Você ainda pode comentar que o lixo nuclear é somente constituído de subprodutos da fissão. Todo o material do vaso de contenção da reação em cadeia, as tubulações primárias e as 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 desertas, em poços profundos e acondicionados em recipientes com espessas paredes de chumbo.

Em relação aos acidentes nucleares, sugerimos alguns comentários adicionais: Com as lições do passado, pode-se dizer que hoje em dia o risco de um acidente nuclear é muito baixo, considerando a rigorosa supervisão dos órgãos de controle e o aumento das medidas de prevenção. Mesmo assim, a Itália desativou todas as suas usinas nucleares e o parlamento alemão deliberou que todas as centrais nucleares daquele país sejam desativadas até 2021. No entanto, se como a Itália, a Alemanha passar a comprar energia da França, na prática, as usinas apenas mudaram de lugar. Isto é, a

questão é global, e não adianta empurrar o problema para o vizinho. As decisões entre riscos e benefícios são uma questão a ser resolvida pela sociedade mundial.

Física explica

Após esses comentários, peça a eles que leiam o texto da seção sobre os riscos de um acidente nuclear.

Ao final, na seção **Trabalho em equipe**, no debate sobre riscos e benefícios da energia nuclear, lembre que a completa abolição das centrais nucleares seria a ruína de muitos países desenvolvidos, como França e Japão, por exemplo. Nesse debate, provavelmente não haverá uma conclusão consensual, mas ele enriquecerá os conhecimentos dos alunos sobre o assunto e a capacidade de argumentação.

Em construção

Não é incomum encontrarmos artigos de divulgação científica que exageram na glorificação de alguns cientistas do passado, apresentando suas descobertas como fruto de pura genialidade. Isso pode ter um impacto negativo para aqueles que estão trilhando os primeiros passos em Ciências, por menosprezar a árdua fase de pesquisa que antecede os grandes resultados. Marie Curie, por exemplo, desmitificou essas versões ufanistas de História da Ciência e salientou a importância do suor do dia a dia na Ciência e no aprendizado.

Após os alunos lerem as duas biografias – Marie Curie e Irène Joliot-Curie, mãe e filha dedicadas à ciência – pergunte a eles por que na história da Física é tão pequena a presença feminina. Eram raríssimas as universidades que permitiam o ingresso de mulheres e, mesmo nestas, as oportunidades não eram igualitárias. Como descrito, Marie foi a primeira titular de uma cadeira na Sorbonne.

Atividades complementares

1. (UFMS)

Pacientes que sofrem de câncer de próstata terão, em breve, acesso facilitado a uma terapia que proporciona um índice de cura de até 88%. O tratamento utiliza cápsulas ou sementes radioativas de iodo-125 implantadas por meio de agulhas especiais na próstata do paciente. O domínio da tecnologia de produção dessas sementes foi obtido por uma equipe de pesquisadores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

Fonte: Pesquisa Fapesp, edição impressa 79, setembro de 2002.

Considerando que o isótopo iodo-125 possui meia-vida de aproximadamente 60 dias, e que as sementes radioativas implantadas contêm 5 mg desse isótopo, passado meio ano da data de início do tratamento terapêutico com essas sementes, que massa, em mg, de iodo-125 ainda está presente no organismo do paciente?

- a) 5,000
- b) 2,500
- c) 1,250
- d) 1,125
- e) 0,625

Resolução:

Como meio ano correspondem a 180 dias, temos 3 meias-vidas. Nesse intervalo de tempo, a massa do isótopo radioativo se reduziu a:

$$m = \frac{m_0}{2^3}, \text{ logo } m = \frac{5}{8} \Rightarrow m = 0,625 \text{ mg.}$$

Alternativa **e**.

2. (UFMS) Foi descongelado para pesquisa genética o corpo de Oetzi, nome dado pelos cientistas a um cadáver encontrado na fronteira da Itália com a Áustria.

O carbono-14 é um isótopo radioativo formado pela absorção de nêutrons dos raios cósmicos e existe naturalmente na natureza na proporção de 10 partes por bilhão (10 ppb). Ele é absorvido pelas plantas na forma de CO_2 , estando presente, portanto, nos fósseis animais e vegetais.

A idade de Oetzi foi determinada pela datação do carbono-14. A partir do momento de sua morte, Oetzi começou a perder carbono-14 a uma taxa relacionada à meia-vida deste isótopo. Sabendo que a meia-vida do carbono-14 é 5 600 anos e que a quantidade de carbono-14 encontrada foi de aproximadamente 5,19 ppb, a idade aproximada de Oetzi, em anos, está no intervalo entre

- a) 4 800 e 6 100
- b) 1 000 e 2 800
- c) 7 200 e 9 100
- d) 10 000 e 11 200
- e) 2 900 e 3 900

Resolução:

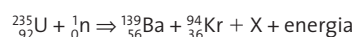
A razão entre a massa inicial e a massa atual é:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{5,19}{10} = 0,519.$$

Logo, o tempo decorrido é pouco menor do que uma meia-vida. Como a meia-vida é 5 600 anos, a idade aproximada, em anos, é um pouco menor que 5 600 anos; portanto, está entre 4 800 e 6 100 anos.

Alternativa **a**.

3. (UPM-SP) No dia 6 de agosto de 2006, o mundo relembrou os 60 anos do trágico dia em que Hiroshima foi bombardeada, reverenciando seus mortos. Uma das possíveis reações em cadeia, de fissão nuclear do urânio-235 usado na bomba, é



onde X corresponde a:

- a) ${}_1^3\text{H}$
- b) ${}_3^1\text{n}$
- c) ${}_2^1\text{n}$
- d) ${}_2^4\alpha$
- e) ${}_1^2\text{D}$

Resolução:

Considerando a massa dos reagentes e dos produtos, temos: $235 + 1 = 139 + 94 + m_x \Rightarrow m_x = 3$.

Pela conservação da carga elétrica, temos:

$$92 + 0 = 56 + 36 + q_x \Rightarrow q_x = 0.$$

A única alternativa que satisfaz às duas condições é **b**.

Alternativa **b**.

4. (UEL-PR) A Usina Nuclear de Angra dos Reis – Angra II – foi projetada para uma potência de 1309 MW. Apesar de sua complexidade tecnológica, é relativamente simples compreender o princípio de funcionamento de uma usina nuclear, pois ele é similar ao de uma usina térmica convencional. Sobre o assunto, considere as afirmativas apresentadas abaixo.

- Na usina térmica, o calor gerado pela combustão do carvão, do óleo ou do gás vaporiza a água em uma caldeira. Esse vapor aciona uma turbina acoplada a um gerador e este produz eletricidade.
- O processo de fusão nuclear utilizado em algumas usinas nucleares é semelhante ao processo da fissão nuclear. A diferença entre os dois está na elevada temperatura para fundir o átomo de urânio-235.
- Na usina nuclear, o calor é produzido pela fissão do átomo de urânio-235 por um nêutron no núcleo do reator.
- Na usina nuclear, o calor é produzido pela reação em cadeia da fusão do átomo de urânio-235 com um nêutron.

São corretas apenas as afirmativas:

- I e III.
- II, III e IV.
- I, II e IV.
- II e III.
- III e IV.

Resolução:

- Correta.** A afirmativa descreve o funcionamento das usinas térmicas.
- Incorreta.** Ainda não há usinas que utilizem o processo de fusão nuclear.
- Correta.** A fissão do urânio-235 ocorre após ele se transformar em U-236, ao capturar um nêutron.
- Incorreta.** A reação é de fissão.

Alternativa **a**.

5. (Enem) A falta de conhecimento em relação ao que vem a ser um material radioativo e quais os efeitos, consequências e usos da irradiação pode gerar o medo e a tomada de decisões equivocadas, como a apresentada no exemplo a seguir.

Uma companhia aérea negou-se a transportar material médico por este portar um certificado de esterilização por irradiação.
Física na Escola, v. 8, n. 2. 2007 (adaptado).

A decisão tomada pela companhia é equivocada, pois

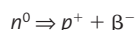
- o material é incapaz de acumular radiação, não se tornando radioativo por ter sido irradiado.
- a utilização de uma embalagem é suficiente para bloquear a radiação emitida pelo material.
- a contaminação radioativa do material não se prolifera da mesma forma que as infecções por microrganismos.
- o material irradiado emite radiação de intensidade abaixo daquela que ofereceria risco à saúde.
- o intervalo de tempo após a esterilização é suficiente para que o material não emita mais radiação.

Resolução:

Um material exposto à radiação não se torna radioativo.
Alternativa **a**.

Resolução dos exercícios

- 1 Não. A partícula β^- é emitida no decaimento de um nêutron, de acordo com a equação:



- 2 Temos: $m_x = 226 - 222 = 4$ e $q_x = 88 - 86 = +2$, portanto $X = {}_{+2}^4X$, ou seja, é uma partícula α .

- 3 a) A cada meia-vida, a massa do isótopo radioativo cai à metade.

Tempo (h)	0	13	26	39	52
Massa (g)	2	1	0,5	0,25	0,125

- b) De acordo com a tabela, 26 h.

- 4 Entre 13 h 30 min e 12 h, temos um intervalo de tempo de 1 h 30 min. Como a meia-vida do antibiótico é de 1 h, isso significa que no intervalo de 1 h 30 min, temos 1,5 meia-vida. Com base no gráfico, esse valor corresponde a 35%, ou seja, restará no organismo 35% da dose original. Alternativa **d**.

- 5 De acordo com o gráfico, a massa cai à metade em 4 h. Logo, a meia-vida do elemento é 4 h.

- 6 A meia-vida do cério-137 é de aproximadamente 30 anos. Seus isótopos possuem diversas aplicações, como por exemplo, o cério-133, o qual é utilizado na construção de relógios atômicos. O cério também é utilizado em células fotoelétricas e como catalisador na hidrogenação de alguns compostos orgânicos.

Seus isótopos radioativos são usados no tratamento contra o câncer e, mais recentemente, em sistemas de propulsão iônica.

- 7 O invólucro é suficiente para bloquear a emissão α mas não as emissões β e γ . Logo, essas duas últimas é que irão sensibilizar o filme.

- 8 Como a meia-vida do tecnécio é de 6 h, em uma semana terão se passado 28 meias-vidas. Dessa forma, a atividade terá decaído 2^{28} vezes, ou seja, bilionésimos do valor inicial e será praticamente indetectável.

- 9 A cada meia-vida, o decaimento do C-14 obedece a relação: $100\% \rightarrow 50\% \rightarrow 25\% \rightarrow 12,5\% \rightarrow 6,25\%$. Portanto, temos 4 meias-vidas. Se cada meia-vida corresponde a 5 700 anos, a morte do animal ocorreu há $4 \cdot 5\,700 = 22\,800$ anos.

- 10 Uma das diferenças é que as reações químicas envolvem as eletrosferas dos átomos e ocorrem devido às forças de origem eletromagnética. Já as reações nucleares ocorrem nos núcleos, sob a influência da interação forte. Outra diferença é que as energias envolvidas nas reações nucleares são milhões de vezes maiores que as das reações químicas.

- 11 Os reagentes são o alumínio (Al) e a partícula α que atinge o núcleo dos átomos desse elemento. Os produtos são o fósforo (P) e um nêutron que é emitido.

- 12 Nos aceleradores circulares (Fermilab) as partículas são aceleradas a cada volta, em determinada região, enquanto nos aceleradores lineares (Slac) elas são aceleradas ao longo de todo o percurso.

Outra diferença de grande importância é que nos aceleradores circulares pode-se efetuar a colisão de partículas que se movimentam em sentidos contrários, o que aumenta significativamente a energia dos elementos envolvidos na colisão, mas no acelerador linear a colisão é contra um alvo fixo.

- 13 Não. Os prótons lentos seriam repelidos pela carga elétrica positiva do núcleo.

- 14 Massa dos reagentes

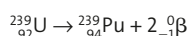
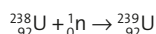
$$m_R = 235,0439 + 1,00867 \Rightarrow m_R = 236,05257 \text{ u}$$

Massa dos produtos

$$m_P = 142,9205 + 89,9196 + 3 \cdot 1,00867 \Rightarrow \\ \Rightarrow m_P = 235,86611 \text{ u}$$

Como a massa dos produtos é menor do que a dos reagentes, a reação nuclear libera energia.

- 15 As reações apresentadas no texto são:



Em um reator de fissão, há grande quantidade de urânio-238 e nêutrons. Dessa forma, o plutônio é um dos subprodutos desse tipo de usina.

- 16 a) Conforme o texto, a massa transformada em energia é $5 \cdot 10^6 \text{ ton} = 5 \cdot 10^9 \text{ kg}$. Como $E = mc^2$, obtemos:

$$E = 5 \cdot 10^9 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E = 4,5 \cdot 10^{26} \text{ J}$$

$$b) E_B = 590,5 \text{ TWh} = 590,5 \cdot 10^{12} \cdot 3 600 \text{ J} = 2,126 \cdot 10^{18} \text{ J}$$

O número de anos n é: $n = \frac{E}{E_B}$, logo:

$$n = \frac{4,5 \cdot 10^{26}}{2,126 \cdot 10^{18}} \Rightarrow n = 2,12 \cdot 10^8 \text{ anos} = 200 \text{ milhões de anos.}$$

- 17 Porque quando consideramos a energia liberada por núcleon (ou por grama de reagente) a energia obtida na fusão é praticamente 8 vezes maior que a energia liberada na fissão.

- 18 Como $1 \text{ ton} = 1000 \text{ kg}$, o rendimento é:

$$\eta = \frac{1,5}{1000} \cdot 100\% \Rightarrow \eta = 0,15\%$$

Alternativa **b**.

- 19 A diferença entre os três tipos de usinas elétricas citadas é a matéria-prima usada para movimentar as turbinas e gerar energia elétrica. Na hidroelétrica, a matéria-prima é a água; na termoeletrica, normalmente é um combustível fóssil e na nuclear é um material físsil (urânio).

- 20 I. **Incorreta**. O texto afirma que o risco sempre existirá, mas não que sempre haverá acidentes.
II. **Incorreta**. O aumento do uso de energia nuclear ocorreu a despeito das proporções do acidente de Chernobyl.
III. **Correta**. Mas existe o problema dos resíduos radioativos.
IV. **Incorreta**. Ainda não há uma solução satisfatória para o problema do lixo nuclear.

- 21 Das propostas apresentadas, temos:

- I. **Incorreta**. Os materiais radioativos têm várias aplicações e proíbem a eliminação de muitas possibilidades de tratamento do câncer, por exemplo. Portanto as propostas adequadas são: II, III e IV.

Alternativa **e**.

Retomando

- 22 Todas as afirmativas estão corretas. Alternativa **e**.

- 23 Analisando as afirmativas, temos:

- I. **Correta**. De fato, o aumento de temperatura reduz a solubilidade do oxigênio na água.
II. **Correta**. A redução do teor de oxigênio afeta diretamente os peixes.
III. **Incorreta**. Em determinada faixa, o aumento de temperatura favorece o crescimento de bactérias (temperaturas de cultura).

Alternativa **d**.

- 24 As afirmativas I e II são corretas, conforme o funcionamento do reator apresentado no esquema. A III é incorreta, pois no condensador a água é resfriada.

Você pode comentar que o esquema do reator é simplificado, pois o vapor de água que move a turbina é do circuito secundário, que por sua vez é aquecido pelo circuito primário. A água do circuito secundário não entra em contato com material radioativo.

Alternativa **d**.

- 25 O problema do aquecimento das águas já foi comentado na questão 23. Alternativa **a**.

- 26 O primeiro argumento é favorável às usinas nucleares, enquanto o segundo nos alerta sobre os perigos dessa forma de geração, mas ambos são válidos. Alternativa **d**.

- 27 É interessante comentar que, embora se tenham desenvolvido vários processos para produzir artificialmente elementos radioativos, não há ainda uma forma artificial para o procedimento contrário, isto é, transformar o material radioativo em elementos estáveis. Alternativa **a**.

- 28 O plutônio é um dos subprodutos do funcionamento do reator. Uma das preocupações dos órgãos de controle internacionais é o aproveitamento desse elemento na construção de material bélico. Ao contrário do urânio-235, que precisa de processos físicos para ser separado do urânio-238, o plutônio, por ser quimicamente distinto, pode ser separado quimicamente, o que facilita muito o processo de purificação. Alternativa **c**.

- 29 a) Como a meia-vida é de 20 min, terão se passado 3 meias-vidas, a atividade terá caído a $\frac{1}{8}$ do valor inicial, logo $N_{B_{\text{final}}} = 20 000 \text{ cont/min}$.

- b) Podemos montar a proporção:

$$\begin{array}{l} 10 \text{ cm}^3 \rightarrow 40 \\ V \rightarrow 20 000 \end{array} \Rightarrow V = 5 000 \text{ cm}^3 \text{ ou } 5 \text{ L}$$

- 30 Alternativa **d**.

Compreendendo o mundo

- 1 O óxido de urânio encontrado na natureza é muito pobre em urânio físsil, o urânio-235; apenas 0,7% dos átomos de urânio presentes nesse óxido são de urânio-235. Para provocar reações de fissão nuclear em cadeia nos reatores é preciso dispor de um urânio que contenha em torno de 3% do isótopo U-235. Assim, é necessário “enriquecer” o urânio.
- 2 À mesma temperatura, as energias cinéticas do hexafluoreto de ^{235}U e do hexafluoreto de ^{238}U são iguais. Sendo $E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$, quem possui menor massa possui maior velocidade. Como a massa molecular do hexafluoreto de ^{235}U é menor do que a do hexafluoreto de ^{238}U , ele possui maior velocidade.
- 3 Vida curta e vida longa se referem à meia-vida física do radioisótopo, ou seja, o intervalo de tempo necessário para que a radioatividade de uma amostra se reduza à metade.
- 4 Resposta pessoal.
- 5 Resposta pessoal.

CAPÍTULO 11 – Cosmologia e partículas elementares

A busca incessante do ser humano por conhecer as suas origens e compreender o mundo em que vive está diretamente ligada às partículas elementares e à cosmologia. Enquanto as partículas elementares constituem os menores corpúsculos da matéria que compõe o Universo, a cosmologia trata dos maiores aglomerados de matéria desse mesmo Universo. Embora possa parecer estranho, existe uma estreita relação entre essas duas áreas. Enquanto as partículas elementares evoluíram do átomo aos *quarks*, o estudo da estrutura, evolução e destino do Universo evoluiu da astronomia à cosmologia moderna. Como ponto de partida neste capítulo, sugerimos comentar essa estreita relação entre essas duas áreas aparentemente antagônicas: o mundo do infinitamente grande com o mundo do infinitamente pequeno. Para isso, o texto seguinte poderá ser útil:

Após as observações do astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953) e a constatação de que as galáxias estão se afastando de nós, podemos retroceder no tempo e inferir que, em um passado longínquo, as galáxias estiveram todas juntas, comprimidas em um ponto de densidade e energia extremamente grandes. Os cientistas calculam que o início do Universo deve ter ocorrido há aproximadamente 15 bilhões de anos, a partir da expansão desse ponto: teoria do *big-bang*.

Então, adotando-se esse instante como o instante inicial ($t = 0$), os físicos das partículas elementares contam a história dos três primeiros minutos onde tudo aconteceu:

- A partir de uma imensa energia confinada em um ponto e que se expande, as três forças da natureza (forte, fraca e eletromagnética) agem como uma única força. Com a diminuição da temperatura, partículas (*quarks*) e antipartículas são formadas; *quarks* e *antiquarks* se aniquilam, dando origem aos fótons;

- Em seguida, os *quarks* se fundem dando origem aos prótons e aos nêutrons. Após 10^{-5} s do início, o Universo é composto por *quarks*, léptons e fótons;
- Após 3 minutos do início, o processo fundamental está terminado. Ao longo do primeiro milhão de anos, prótons e nêutrons se juntam para formar os elementos conhecidos, hidrogênio, hélio, etc.
- 1 bilhão de anos do instante inicial, graças à força gravitacional, as primeiras galáxias começam a ser formadas. Estima-se que o Sol e a Terra foram formados há cinco bilhões de anos.

Mas o que leva os cientistas a se preocuparem tanto com temas como partículas elementares, forças fundamentais, *big-bang*, origem e evolução do Universo?

À medida que a tecnologia se torna cada vez mais poderosa e as energias envolvidas nas pesquisas se tornam cada vez maiores fazendo com que partículas adquiram velocidades próximas à da luz, mais os físicos procuram entender o grande momento: a criação do Universo. Experiências nos aceleradores de partículas têm permitido recriar condições que só existiram frações de segundos após o início de tudo. É a busca do ser humano para entender suas origens.

O que não podemos negar é o lado prático dessas pesquisas; elas têm produzido um desenvolvimento tecnológico sem precedentes, responsável direto pelo estilo de vida moderno. Por outro lado, essas pesquisas têm proporcionado reflexões sobre questões filosóficas tão importantes quanto as questões científicas. Muitos físicos têm se preocupado com as conexões entre ciência e teologia.

Neste capítulo, procuramos desenvolver habilidades para que os alunos possam adquirir uma compreensão cósmica do Universo, das teorias relativas ao seu surgimento e à sua evolução, de forma a poder situar a Terra, a vida e o ser humano em suas dimensões espaciais e temporais no Universo.

1. A criação

Neste tópico procuramos mostrar a concepção da criação do Universo segundo algumas culturas, cuja escolha foi por assim dizer um pouco arbitrária. Mas se você julgar interessante, poderá solicitar aos alunos uma pesquisa, por exemplo, como a cultura indígena, ou os incas, a umbanda, ou ainda os maias, imaginam a Criação.

Em relação à teoria de Darwin, o argumento mais usado pelos defensores do ensino do criacionismo é que é uma teoria incompleta. O que provamos quando dizemos que uma teoria é incompleta? Que ela está errada? Provamos somente que ela é incompleta, nada mais.

Julgamos importante você ressaltar que, mesmo em épocas nas quais a ciência era incipiente, havia a necessidade humana de explicar de onde viemos. Alguns alunos vão achar os mitos engraçados, mas como nos verão nossos descendentes daqui a 2 000 anos?

2. A vida de uma estrela

A origem, a composição e o futuro de nosso Universo é tema recorrente a todo momento na mídia. O telescópio espacial Hubble ampliou milhares de vezes os limites observáveis da Astronomia e permitiu aprimoramentos nos modelos cosmológicos. Em suma, a Cosmologia é um tema cada vez mais presente no dia a dia dos noticiários, programas educativos e livros de divulgação científica.

A Cosmologia moderna teve início com a teoria da relatividade de Albert Einstein, que incorporou às questões gravitacionais, a relação espaço-tempo e a distribuição da matéria no Universo. É sob a luz dessa teoria, da mecânica quântica e das observações astronômicas que as atuais teorias sobre o Universo estão fundamentadas.

A ideia central neste tópico é uma apresentação básica da Cosmologia que possa servir como pano de fundo, como instrumento motivador e indagador. Sugerimos mostrar como a Biologia, que tem na diversidade a sua maior riqueza, dialoga com a Física, que procura a unificação.

Uma questão que os alunos podem levantar é: Por que começar com as estrelas? Nossa escolha recaiu sobre elas porque são as fornalhas em que foram forjados todos os elementos químicos. Como gostava de dizer Carl Sagan, nós só existimos por causa dos restos da poeira estelar.

3. Origem do Sistema Solar

Para este tópico, você encontrará em *O livro de ouro do Universo*, de Ronaldo R. F. Mourão, nas páginas 293 a 296, um texto sobre a Idade e origem do sistema solar, subsídios para suas aulas.

Física explica

Na seção solicite aos alunos a leitura do texto “*Nasa lança telescópio em busca de nova ‘Terra’*”. As questões propostas envolvem habilidades de leitura e interpretação de texto. As respostas são:

1. O trânsito ocorre quando, para determinado observador, o planeta passa em frente à sua estrela.
2. Segundo o texto, pelo menos três trânsitos.

4. O Universo

Neste tópico, sugerimos ênfase para a lei de Hubble. É interessante salientar o quanto o trabalho de Henrietta Leavitt, sobre as Cefeidas, tornou possível a Hubble formular a sua hipótese do Universo em expansão, tendo em mãos as distâncias de algumas galáxias.

Uma pergunta muito comum dos alunos é: O que aconteceu antes do *big-bang*? Ora, se tivesse acontecido alguma coisa antes, o instante do *big-bang* não seria o inicial. É bom mostrar que a pergunta, como dizem os matemáticos, é **malposta**, pois o “antes” pressupõe a negação do que se está perguntando.

Outra pergunta frequente é: Dentro de que está se expandindo o Universo? Como gostamos de falar, o espaço é um tecido que interliga os astros, galáxias e foi se ampliando com a expansão do Universo. Não há um “fora” do Universo. Novamente, a pergunta é malposta, pois se houvesse alguma coisa fora do Universo, o Universo seria apenas uma parte do Universo.

Uma outra pergunta comum é: Em que lugar aconteceu o *big-bang*? Todos os lugares (espaço) que temos hoje estavam confinados naquela singularidade.

5. Os tijolos da matéria

Comente inicialmente que o termo **átomo** (cujo significado é: a – não, tomo – divisão, não divisível) não é mais adequado para nomear o menor representante de um elemento químico, pelo fato de o átomo ser divisível. Jorge Luis Borges (1899-1986), escritor argentino laureado com prêmio Nobel de Literatura, comentou que a Física incorreu em um escândalo filológico ao fraturar o átomo. Comente com os alunos. Agora eles entenderão por que Gell-Mann escolheu um termo sem compromisso para nomear os *quarks*.

Física explica

O texto apresentado na seção aborda o tema da miniaturização dos gravadores de informação. O que queria dizer Feynman com a frase: “Há muito mais espaço lá embaixo”? Muito provavelmente, que, embora 1 mm^2 seja uma área extremamente pequena, ela contém muitos bilhões de átomos e muita informação pode ser nela gravada.

Aproveite também para mostrar a questão cultural do apego ao livro, com o texto de Antonio Prata.

Respostas das questões:

1. Podemos aplicar a regra de três simples abaixo:

$$170 \text{ mm}^2 \rightarrow 17.000 \text{ livros}$$

$$1 \text{ mm}^2 \rightarrow x$$

$$\text{Logo } x = \frac{17.000}{170} \Rightarrow x = 100 \text{ livros.}$$

2. Ambos são imitações.

6. Interações fundamentais e o modelo-padrão

Apresente, inicialmente, a seguinte questão para os alunos: Com as 26 letras do alfabeto podemos escrever todas as palavras que existem no mundo. Quais as regras para combinar essas letras? Há uma gramática tanto na formação das palavras quanto na formação de sentenças, combinando palavras.

Qual é a gramática da natureza na combinação das partículas elementares? Essa é a questão a ser tratada neste tópico.

Como fechamento do tópico, sugerimos, se houver disponibilidade, comentar sobre a teoria das cordas. O texto seguinte pode auxiliá-lo.

Nos últimos trinta anos de sua vida, Einstein buscou sem descanso a chamada teoria do campo unificado – uma teoria capaz de descrever as forças da natureza por meio de um esquema único, completo e coerente. As motivações de Einstein não eram as que normalmente inspiram os empreendimentos científicos, como a busca de explicações para este ou aquele conjunto de dados experimentais. Ele acreditava apaixonadamente que o conhecimento mais profundo do universo revelaria a maior das maravilhas: a simplicidade e a potência dos princípios que o estruturam.

Einstein queria iluminar os mecanismos da natureza com uma luz nunca antes alcançada, que nos permitiria contemplar, em estado de encantamento, toda a beleza e elegância do universo.

Ele nunca realizou seu sonho, em grande parte porque as circunstâncias não o favoreciam, já que em sua época várias características essenciais da matéria e das forças da natureza eram desconhecidas ou, quando muito, mal compreendidas.

[...] E agora, tanto tempo depois de Einstein ter empreendido em vão a busca de uma teoria unificada, os físicos acreditam ter encontrado finalmente a forma de combinar esses avanços em um todo articulado – uma teoria integrada, capaz, em princípio, de descrever todos os fenômenos físicos: a teoria das cordas.

[...] No interior mais fundo da matéria vibram cordas, como as de um instrumento musical. Tudo o que existe e acontece no mundo, no universo, surge das vibrações dessas entidades centenas de bilhões e bilhões de vezes menores do que o núcleo de um átomo. A ideia de “cordas” abriu para a ciência a perspectiva de alcançar uma compreensão final sobre a estrutura e funcionamento do universo, pois ela permite compatibilizar os dois pilares antagônicos da física moderna: a relatividade geral e a mecânica quântica.

GREENE, Brian. *O Universo elegante: supercordas, dimensões ocultas e a busca da teoria definitiva*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

Em construção

Um dos aspectos interessantes na biografia de Edwin Hubble foi a sua versatilidade. Ele foi um esportista de destaque em seu estado, matemático, astrônomo, advogado e soldado.

Você pode comentar com os alunos que o pendur para determinada área do conhecimento, como Ciências Exatas, por exemplo, não deve ser uma barreira que impeça a compreensão e a dedicação também em outras áreas.

Após os alunos lerem o texto, solicite a eles que pesquisem alguns fatores que favoreceram o trabalho científico de Hubble. Essa conexão vai enriquecer o entendimento do capítulo e pode ser parte da avaliação. A seguir citamos alguns fatores:

- O trabalho de Slipher, medindo o espectro de galáxias distantes;
- A conclusão do telescópio Hooker, o maior de seu tempo, no qual Hubble pôde pesquisar;
- A descoberta de Henrietta Leavitt sobre as Cefeidas, que permitiu a avaliação de distâncias não mensuráveis pela paralaxe.

Em relação às duas questões, propostas no texto, temos:

1. O deslocamento na maioria das linhas espectrais era para o vermelho, indicio de que a maioria estava se afastando de nossa galáxia; e quanto mais distante estava uma galáxia, maior o deslocamento para o vermelho.
2. A explicação está de acordo com o efeito Doppler, variação da frequência da onda devido ao movimento relativo entre fonte e observador.

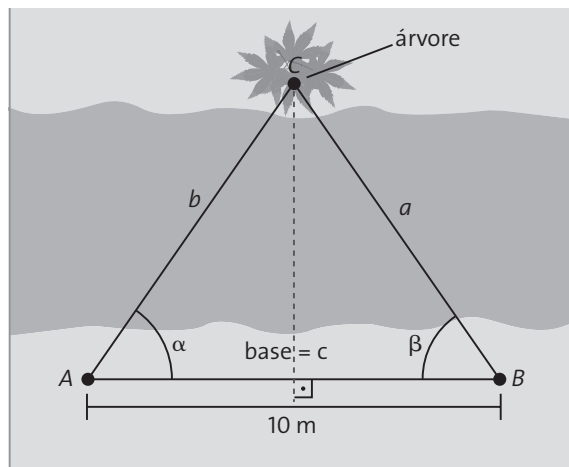
Experimento

O propósito dessa atividade é mostrar como podemos medir distâncias a pontos inacessíveis. Como a própria atividade mostra, as aplicações não são apenas na Astronomia.

Sugerimos que você divida os alunos em pequenas equipes que irão medir a largura do pátio da escola. Estamos supondo um pátio retangular.

Encarregue uma equipe de traçar a linha de base ao longo de um lado do retângulo e colocar uma estaca do outro lado em determinado lugar (ponto C). Com todas as equipes utilizando a mesma linha de base e o mesmo ponto C, será possível depois comparar os resultados.

A figura seguinte mostra a correspondência entre o pátio retangular e o rio. Se o pátio não for retangular, você pode fazer as devidas adaptações.



As respostas vão depender de como é o pátio de sua escola, mas podemos aqui fazer um comentário genérico (literal).

1. Os valores de α e β podem variar um pouco de um grupo para outro, conforme a precisão da medida.
2. O ângulo γ (vértice em C) pode ser obtido lembrando que a soma dos ângulos internos de um triângulo é 180° , isto é:

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ \Rightarrow \gamma = 180^\circ - \alpha - \beta.$$

Provavelmente, a maioria dos alunos vai obter a medida desse ângulo medindo-o diretamente no desenho em escala. Após comentar essa forma algébrica, peça que verifiquem a margem de erro.

3. Assim como nos itens anteriores, os valores podem variar um pouco de um grupo para outro.

Opcionalmente, se o tempo permitir e a turma puder acompanhar, você pode mostrar como obter os valores solicitados algebricamente, como segue:

$$\text{Pela lei dos senos, temos: } \frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}$$

O valor de c é conhecido (linha de base).

Para determinar o valor de a , observe que:

$$a = c \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$$

$$\text{Analogamente, para obter } b, \text{ temos } b = c \frac{\sin \beta}{\sin \gamma}.$$

4. Para obter a largura do rio (ou pátio) vamos observar que:

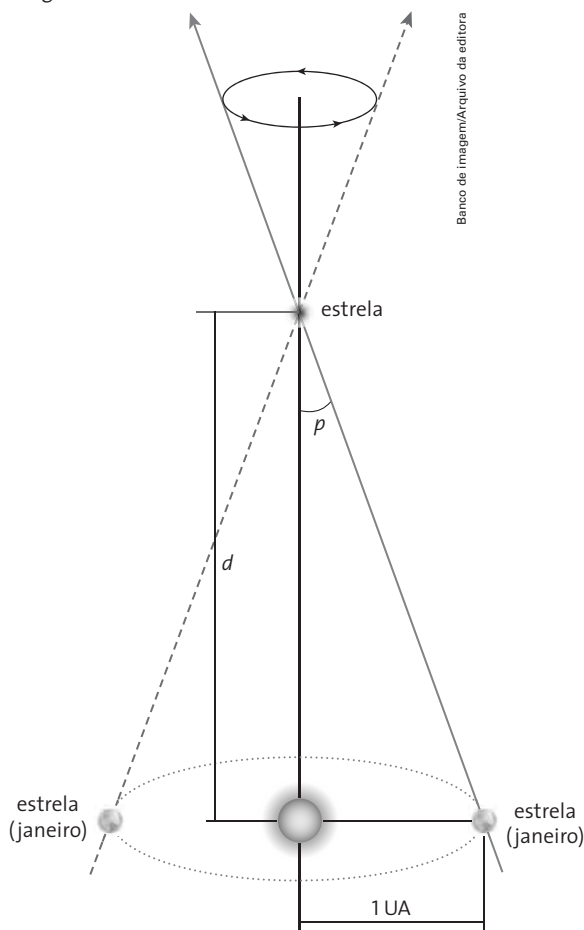
$$L = a \cdot \sin \beta \text{ ou } L = b \cdot \sin \alpha$$

Essa atividade propicia vários comentários finais. Por exemplo, comente com os alunos que, se eles quiserem utilizar esse processo para medir a distância até uma longínqua torre de televisão, eles

vão perceber que $\alpha \approx \beta \approx 90^\circ$. Isto é, não terão precisão para fazer essa medida e precisariam de uma linha de base muito maior para delinear bem os seus triângulos.

Proponha então a seguinte pergunta: Qual é a maior linha de base que poderíamos usar para medir a distância até uma estrela, por esse processo?

A resposta encontrada pela Astronomia foi utilizar os dois pontos de visada mais distantes possíveis para os astrônomos terrestres, quando a Terra, em sua órbita, estiver em pontos diametralmente opostos. Estes seriam os pontos de visada. A linha de base seria o dobro do raio da órbita da Terra, cuja medida é uma unidade astronômica (1 UA) conforme ilustra a figura seguinte.



Distância a uma estrela medida por paralaxe, tendo como linha de base o diâmetro da órbita da Terra (2 UA). A figura está fora de escala, para que se possa visualizar o triângulo usado para o cálculo.

Se a paralaxe (p), para uma estrela situada em um eixo perpendicular ao plano da órbita da Terra e na direção que contenha o centro dessa órbita (o Sol) for de 1 segundo de arco de grau, a distância é de um **parsec** (1 pc), uma espécie de abreviação, em inglês, de um segundo de paralaxe.

Como os ângulos das paralaxes estelares (p) são extremamente pequenos, se eles forem medidos em radianos, uma excelente aproximação é: $\tan p \approx p$.

Analisando a figura, vemos então que:

$$\tan p \approx p = \frac{1 \text{ UA}}{d}, \text{ logo } d = \frac{1 \text{ UA}}{p}, \text{ com } p \text{ medido em radianos.}$$

Com base no resultado apresentado na última expressão acima, e, sabendo que $1 \text{ UA} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$, vamos obter, em metros, a distância correspondente a 1 parsec.

Primeiramente, vamos converter o ângulo para radianos.

Devemos lembrar que em cada grau temos 60 minutos e, em cada minuto, 60 segundos de arco. Logo, 1 segundo de arco é $\frac{1}{3600}$ de grau.

Se a paralaxe é 1 segundo de arco, montamos a proporção:

$$\frac{180^\circ}{3600} \text{ — } \pi \Rightarrow \frac{1^\circ}{3600} \text{ — } p \Rightarrow \frac{1}{p} = 2,06 \cdot 10^5$$

$$\text{Assim, } d = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 2,06 \cdot 10^5 \Rightarrow d = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ m.}$$

Em relação a outras unidades astronômicas, temos:

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ anos-luz} = 3,09 \cdot 10^{13} \text{ km}$$

A estrela mais próxima da Terra (exceto o Sol), *Proxima Centauri*, está a uma distância de 1,30 pc = 4,24 anos-luz.

Pela limitação na precisão dos instrumentos e também devido às perturbações atmosféricas, com telescópios no solo não se consegue precisão melhor do que 0,01 segundo de arco, ou seja, não temos precisão para medir distâncias acima de 100 parsecs, usando a paralaxe, já que a margem de erro seria superior à própria medida.

Atividade complementar

(UnB-DF)

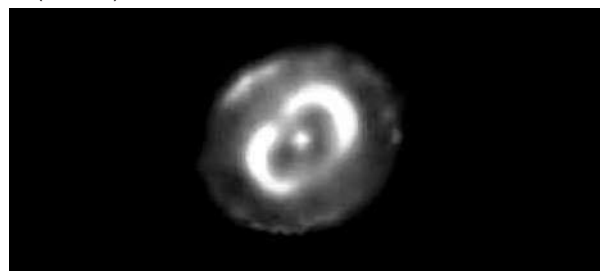


figura I

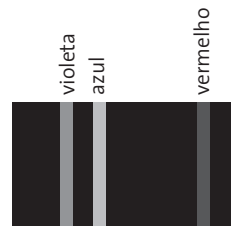


figura II

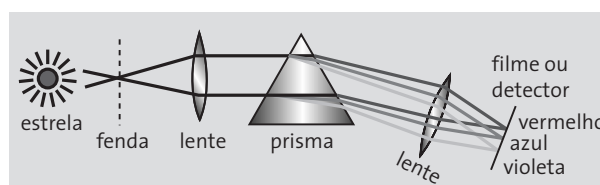


figura III

A figura I acima ilustra uma imagem da nebulosa planetária NGC 7662. Ao contrário do que essa imagem sugere, as nebulosas planetárias não são tão etéreas e tranquilas; na realidade,

são enormes e tempestuosas. Adornando toda a Via Láctea como enfeites de árvore de Natal, as nebulosas planetárias são os restos coloridos de estrelas de baixa massa – aquelas com o tamanho inferior a oito vezes a massa solar. As estrelas, ao morrerem, perdem suas camadas externas, que se transformam em uma espécie de vento, cuja velocidade atinge até 1000 km/s. As estrelas, gradualmente, vão-se desfazendo até chegarem às camadas mais quentes e profundas, quando emitem luz ultravioleta capaz de ionizar o vento e torná-lo fluorescente.

No fenômeno da fluorescência, um átomo absorve energia e a reemite na forma de radiação eletromagnética, composta de uma coleção de comprimentos de onda característicos, sendo parte deles compreendida na região do visível, conforme ilustra a figura II, que exemplifica o caso do átomo de hidrogênio. No estudo desse fenômeno, para se identificar a presença de cada elemento químico nas estrelas e nebulosas, usam-se cores, que podem ser determinadas por meio de um espectroscópio, cujo esquema básico é mostrado na figura III.

A partir dessas informações, assinale certo ou errado nas questões numeradas de 1 a 3.

1. Ao se usar o espectroscópio ilustrado na figura III para analisar a luz visível emitida pelo átomo de hidrogênio, obtêm-se três imagens da fenda sobre o filme ou detector, uma para cada cor, como mostra a figura II.

Resposta: Certo. De acordo com o texto.

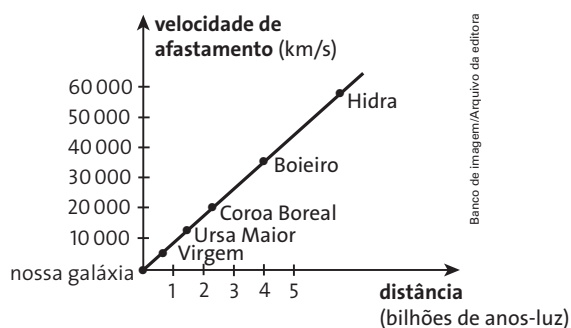
2. No prisma ilustrado na figura III, a velocidade de propagação da luz vermelha é menor que a velocidade de propagação da luz violeta.

Resposta: Errado. Como a luz vermelha sofre um desvio menor que a luz violeta, seu índice de refração é menor. Portanto, a velocidade da luz vermelha é maior que a velocidade da luz violeta.

3. Se o espectro da figura II tivesse sido obtido a partir da luz emitida por uma estrela que se afasta velozmente da Terra, então todas as linhas espectrais ficariam deslocadas à direita das linhas da figura II.

Resposta: Certo. Deslocamento para o vermelho.

4. (UFRN) A lei de Hubble fornece uma relação entre a velocidade com que certa galáxia se afasta da Terra e a distância dela à Terra. Em primeira aproximação, essa relação é linear e está mostrada na figura a seguir, que apresenta dados de seis galáxias: a nossa, Via Láctea, na origem, e outras ali nomeadas. (No gráfico, um ano-luz é a distância percorrida pela luz, no vácuo, em um ano.)



Da análise do gráfico, conclui-se que:

- a) Quanto mais distante a galáxia estiver da Terra, maior a velocidade com que ela se afasta da Terra.
- b) Quanto mais próxima a galáxia estiver da Terra, maior a velocidade com que ela se afasta da Terra.
- c) Quanto mais distante a galáxia estiver da Terra, menor a velocidade com que ela se afasta da Terra.
- d) Não existe relação de proporcionalidade entre as distâncias das galáxias à Terra e as velocidades com que elas se afastam da Terra.

Resposta:

Como podemos notar no gráfico, a relação entre velocidade e distância da galáxia é linear, assim quanto mais distante a galáxia está da Terra, maior é a velocidade que a galáxia se afasta. Podemos comparar as galáxias de Virgem e Boieiro, Virgem está próxima a Terra e sua velocidade de afastamento é baixa, já Boieiro está mais distante da Terra e sua velocidade de afastamento é alta. Alternativa **a**.

Resolução dos exercícios

- 1 a) O primeiro, da Babilônia, enxergava a divindade no céu, enquanto no cristianismo o centro de tudo é o ser humano.
b) Muitas pessoas leem horóscopos e acreditam na influência dos astros em seus destinos e temperamento. Sob esse aspecto, a Astrologia não pode ser ignorada. Por outro lado, ela não é científica.

- 2 a) Para o nosso Sol, o tempo de "vida" é: $T = \frac{k}{\sqrt{M^5}}$, em que k

é uma constante. Para a estrela com massa $4M$, teremos:

$$T' = \frac{k}{\sqrt{(4M)^5}} \Rightarrow T' = \frac{k}{\sqrt{2^{10}M^5}}$$

$$T' = \frac{k}{32\sqrt{M^5}} = \frac{T}{32}$$

Portanto, o tempo de vida da estrela mais massiva que o Sol é 32 vezes menor.

- b) Como $T' = \frac{T}{32}$, obtemos:

$$T' = \frac{10 \text{ bilhões de anos}}{32} \approx 310 \text{ milhões de anos}$$

- 3 Como o silício tem massa atômica inferior à do ferro, ele foi produzido pela estrela antes da fase de supernova, ou seja, na fase de gigante vermelha.

- 4 Sendo $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$, a energia produzida em 1 segundo equivale a:

$$3,9 \cdot 10^{26} = \frac{\Delta E}{1} \Rightarrow \Delta E = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ J.}$$

Dividindo esse valor pela energia liberada na fusão de 1 kg de hidrogênio, temos:

$$\frac{3,9 \cdot 10^{26}}{6,3 \cdot 10^{14}} \approx 6,19 \cdot 10^{11} \text{ kg.}$$

Portanto, a fusão de 1 kg de hidrogênio corresponde à queima de:

$$\frac{6,3 \cdot 10^{14}}{4,6 \cdot 10^7} = 14 \cdot 10^6 \text{ litros de gasolina.}$$

- 5 As luas não possuem massa suficiente para gerar gravidade que segure o hidrogênio, portanto, na formação desses astros, assim como na Terra, a abundância dos outros elementos é, na verdade, escassez de hidrogênio.
- 6 Como são elementos de massa atômica superior à do ferro, foram produzidos na explosão de uma supernova.
- 7 As noites seriam esplendorosamente claras.
- 8 Exemplo de efeito Doppler: variação na frequência do som de uma buzina ouvida por uma pessoa em movimento em relação à fonte sonora.
- 9 Na natureza não encontramos valores de carga fracionados, para se obter tal valor é necessário utilizarmos grandes energias para separar os *quarks*.
- 10 Porque átomo significa indivisível, e o átomo se revelou composto por outras partículas. O nome *quark* foi propositalmente escolhido de uma palavra sem significado, imitando o ruído dos patos, depois encontrado na literatura de Joyce.
- 11 Porque as energias envolvidas correspondem a temperaturas extremamente altas, como se imagina ter acontecido nos primórdios do Universo.
- 12 Como são 3 gerações, temos: 6 *quarks* e 6 *antiquarks*, o mesmo acontecendo para os léptons, totalizando 24 partículas elementares. Esse número não inclui as mediadoras das interações fundamentais.

- 13 As reações químicas são uma manifestação da força eletromagnética. Alternativa **b**.

- 14 A obtenção de temperaturas da ordem de 10^{32} K.

Retomando

- 15 Resposta pessoal.

- 16 Resposta pessoal.

- 17 a) A densidade da Terra é de $5,520 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, assim a densidade da anã branca é 10^3 vezes maior que a da Terra.

b) Figura 11.6

- 18 a) $1 \text{ pc} \approx 3,08 \cdot 10^{16} \text{ m}$

$$2 \cdot 10^6 = x$$

$$x \approx 6,176 \cdot 10^{22} \text{ m} \approx 6,176 \cdot 10^{19} \text{ km}$$

- b) $v = H \cdot d = 7 \cdot 10^{-11} \cdot 6,176 \cdot 10^{19} = 4,32 \cdot 10^9 \text{ km/ano} \Rightarrow$
 $\Rightarrow v = 1,36 \cdot 10^{17} \text{ km/s}$

- 19 I. **Falsa**. Esta é apenas uma boa explicação, talvez a melhor em nosso tempo. Certamente, há outras que ainda nem imaginamos.

II. **Falsa**. Eles procuram observar o que foi previsto teoricamente.

III. **Verdadeira**.

Alternativa **b**.

- 20 Como $v = H \cdot L$, temos, dimensionalmente, $L \cdot T^{-1} = [H] \cdot L$.

$$\text{Logo, } [H] = t^{-1} = \frac{1}{T}$$

Alternativa **c**.

